

Сканирование и форматирование: [Янко Слава](#) (Библиотека [Fort/Da](#)) || slavaaa@yandex.ru ||
yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Isq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера
страниц - внизу
update 19.11.06

ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ
Т.Я.ДУБНИЩЕВА
КОНЦЕПЦИИ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ



Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по социально-экономическим специальностям

5-е издание, переработанное и дополненное

Москва

2003

УДК 50(075.8) ББК 20я73

Д79

Рецензенты:

акад. *В. М. Титов* (Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения РАН);

проф. *С. М. Репинский* (Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН);

проф. *П. Е. Твердохлеб* (Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН)

Дубнищева Т.Я.

Д79 Концепции современного естествознания: Учеб. пособие для студ. вузов / Татьяна Яковлевна Дубнищева. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 608 с.

ISBN 5-7695-0999-6

В пособии через научные картины мира и программы гармонично согласованы вопросы истории науки и культуры с вопросами развития естественных наук. При изложении материала использованы системный подход, идеи синергетики и глобального эволюционизма, что способствует формированию целостного мировоззрения. Основные понятия, концепции и законы даны в развитии, показана независимость процесса познания, дающая навыки самостоятельных суждений и способствующая развитию ассоциативного мышления и формированию творческой личности.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по социально-экономическим специальностям.

УДК 50(075.8) ББК 20я73

ISBN 5-7695-0999-6

© Дубнищева Т.Я., 2003

© Издательский центр «Академия», 2003

Электронное оглавление

Contents

| | |
|--|----|
| Электронное оглавление | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| Глава 1. ЛОГИКА ПОЗНАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК | 12 |
| 1.1. Наука — часть культуры | 12 |
| 1.2. Формирование критерия научности | 15 |
| 1.3. Методы естествознания, всеобщность его законов. Системный подход | 17 |
| Научный метод | 18 |
| Теории — основная форма научного знания. | 18 |
| В описательных теориях | 18 |
| Понятия и термины | 18 |
| Наблюдения | 18 |
| Как метод научного познания анализ | 18 |
| Эксперимент | 19 |
| Создание моделей | 19 |
| Обращение к теории | 19 |
| Рис. 1.1. Модель научной теории в виде многослойной оболочки (наружная — непрерывно расширяющаяся сфера предсказаний, внутренняя — фундаментальные принципы) | 20 |
| Системный подход | 20 |
| 1.4. Понятия «научная программа» и «научная картина мира» | 22 |
| Научная картина мира (НКМ) | 22 |
| Механическая картина мира (МКМ) | 23 |
| Электромагнитная картина мира (ЭКМ) | 23 |
| Квантово-полевая картина мира (КПКМ) | 24 |
| Современная, эволюционная картина мира | 24 |
| 1.5. Математическая научная программа в развитии | 24 |
| 1.6. Понятия «научная парадигма» и «научная революция» | 25 |
| Научные парадигмы | 25 |
| 1.7. Оценки научных успехов и достижений | 27 |
| 1.8. Современная научно-техническая революция: достижения и проблемы | 28 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 30 |
| Глава 2. ПОНЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА, ВРЕМЕНИ И МАТЕРИИ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ | 31 |
| 2.1. Понятие «пространство» | 31 |
| 2.2. Масштабы расстояний во Вселенной. Методы оценок размеров и расстояний | 33 |
| Геоцентрическая система Мира (Солнечной системы) | 34 |
| Гелиоцентрическая система (от греч. helios — солнце) | 34 |
| Рис. 2.1. Определение размеров Земли по Эратосфену | 34 |
| Параллакс — угловое смещение предмета, которым можно характеризовать расстояние до него | 35 |
| Рис. 2.2. Метод триангуляции: | 36 |
| 2.3. Понятие «время» в своем развитии | 38 |
| Пространственно-временной континуум | 38 |
| Свойства пространства-времени в ОТО | 39 |
| Рис. 2.3. Экспериментальные подтверждения теории относительности, приведшие к изменению свойств времени и пространства: | 40 |
| 2.4. Временные масштабы во Вселенной. Методы измерения времени | 40 |
| Сутки | 40 |
| Рис. 2.4. Схема суточного и годового движения Солнца (плоскость горизонта проведена для наблюдателя средних широт Северного полушария) | 41 |
| Секунда | 41 |
| Календарем | 42 |
| Возраст Вселенной всего лишь в 2,5 раза превышает возраст Солнца | 44 |
| 2.5. Структурные уровни организации материи | 45 |
| Молекула | 45 |
| Атом | 45 |
| Микромир — мир очень малых микрообъектов, размеры которых от 10^{-10} до 10^{-18} м, а время жизни может быть до 10^{-24} с. | 45 |

| | |
|--|-----------|
| Макромир — это мир объектов, соизмеримых с человеческим опытом. Размеры макрообъектов измеряются от долей миллиметра до сотен километров — от секунд до лет | 46 |
| 2.6. Понятие «поле». Уравнения Максвелла. Свет — электромагнитная волна | 46 |
| Поле | 46 |
| Рис. 2.6. Электромагнитное поле: | 47 |
| Световая волна — это волна электромагнитная, | 48 |
| Плотность потока энергии в волне, | 48 |
| Импульс электромагнитной волны | 49 |
| 2.7. Типы фундаментальных взаимодействий в физике | 49 |
| Гравитация (от лат. <i>gravitas</i> — тяжесть) — исторически первое исследованное взаимодействие. | 50 |
| Электромагнитное взаимодействие, | 50 |
| Сильные и слабые ядерные взаимодействия | 51 |
| 2.8. Попытки построения Теории Всего Сущего | 51 |
| Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику | 53 |
| Теории супергравитации | 53 |
| Теория суперструн | 53 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 55 |
| Глава 3. МИРОЗДАНИЕ В СВЕТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМЫ | 56 |
| 3.1. Модель материальной точки и законы классической механики | 56 |
| 3.2. Масса инертная и гравитационная. Принцип эквивалентности | 58 |
| 3.3. Движения планет и законы Кеплера | 59 |
| Рис. 3.1. Схемы, поясняющие первый (а) и второй (б) законы Кеплера | 60 |
| 3.4. Закон всемирного тяготения | 61 |
| Рис. 3.2. Орбита кометы Галлея | 61 |
| 3.5. Связь законов сохранения со свойствами пространства и времени | 63 |
| 3.6. Колебания и волны в природе и их описание. Гармонический осциллятор | 66 |
| Рис. 3.3. Модель математического маятника | 66 |
| Рис. 3.4. Схема образования стоячей волны | 68 |
| 3.7. Распространение звука в средах и реакция организма на звуковые волны | 69 |
| 3.8. Волновое описание процессов. Типы и свойства волн. Спектр и его анализ | 71 |
| Рис. 3.5. Схема принципа Гюйгенса (если ширина щели велика по сравнению с длиной падающей волны, то она проходит через нее без искажений; влияние дифракции больше заметно у краев щели) | 72 |
| Рис. 3.6. Схема, поясняющая эффект Доплера | 73 |
| 3.9. Эффект Доплера, его исследование и значение для науки | 73 |
| Рис. 3.7. Колебания блеска цефеид | 75 |
| Рис. 3.8. Красное смещение в спектрах далеких галактик (к пояснению закона Хаббла) | 76 |
| 3.10. Явление резонанса. Резонансы в движении планет | 76 |
| Рис. 3.9. Схема, поясняющая образование для земного наблюдателя фаз Венеры, открытых М.В. Ломоносовым: | 77 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 77 |
| Глава 4. КОНЦЕПЦИИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ | 79 |
| 4.1. Теплота, температура и механический эквивалент теплоты | 79 |
| Рис. 4.1. Сравнение температурных шкал Фаренгейта, Цельсия и Кельвина | 80 |
| Рис. 4.2. Схема опытов Джоуля: | 81 |
| 4.2. Понятие «внутренняя энергия». Первое начало термодинамики | 81 |
| 4.3. Преобразование тепловой энергии в механическую работу | 83 |
| Рис. 4.3. Схема работы тепловой машины: | 84 |
| 4.4. Понятие «энтропия». Суть спора о «тепловой смерти Вселенной» | 85 |
| 4.5. Начала термодинамики. Энтропия и вероятность. Принцип Больцмана | 87 |
| 4.6. Микро- и макропеременные в описании систем. Основные модели | 89 |
| 4.7. Основные положения молекулярно-кинетической теории и эмпирические газовые законы | 90 |
| Рис. 4.4. График зависимости объема газа от температуры, экстраполированный к точке, в которой объем был бы равен нулю | 91 |
| 4.8. Связь параметров газа с его микроструктурой. Распределение Максвелла | 91 |
| Рис. 4.5. Распределение молекул по скоростям при температурах T_1 , T_2 , T_3 | 92 |
| 4.9. Распределение частиц газа во внешнем поле и в атмосферах планет | 93 |
| Число Авогадро | 94 |
| 4.10. Понятие «флуктуация» и точность измерений | 95 |
| 4.11. Процессы обратимые и необратимые. Принцип локального равновесия | 95 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 98 |
| Глава 5. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ МАТЕРИИ | 99 |
| 5.1. Ограниченность законов классической оптики. Измерение скорости света | 99 |

| | |
|--|------------|
| Рис. 5.1. Камера обскура и ход лучей в ней..... | 100 |
| Рис. 5.2. Схема получения голограммы: <i>a</i> — по методу Габора; <i>б</i> — по методу Денисюка (отражательная голограмма) | 101 |
| Рис. 5.3. Схема измерения скорости света..... | 102 |
| 5.2. Волновые свойства света. Спектр электромагнитного излучения | 103 |
| Рис. 5.4. Схема спектра электромагнитных волн..... | 105 |
| 5.3. Явление дисперсии сред и доказательство материального единства мира | 105 |
| 5.4. Законы теплового излучения, кризис классической теории и появление квантовой гипотезы..... | 107 |
| Рис. 5.5. Спектры излучения абсолютно черного тела при разных температурах (интенсивность — в относительных единицах) | 108 |
| Рис. 5.6. Ультрафиолетовая катастрофа в теории теплового излучения..... | 109 |
| 5.5. Открытие электрона и радиоактивности. Рождение представлений о сложном строении атома | 109 |
| 5.6. Планетарная модель строения атома. Современная наука и постулаты Бора..... | 112 |
| Рис. 5.7. Спектральные серии атома водорода..... | 113 |
| Рис. 5.8. Схема строения атома углерода: планетарная модель (<i>a</i>) и относительные размеры ядра и атома (<i>б</i>) | 114 |
| 5.7. Корпускулярные свойства света. Фотоны Эйнштейна и доказательство их реальности | 115 |
| Рис. 5.9. Схема эффекта Комптона..... | 116 |
| 5.8. Поглощение и испускание квантов света. Спонтанное и вынужденное излучения | 116 |
| Рис. 5.10. Схема получения вынужденного излучения | 118 |
| 5.9. Корпускулярно-волновые свойства вещества и значение их открытия..... | 118 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 119 |
| Глава 6. КОНЦЕПЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СТРУКТУР В МИКРОМИРЕ..... | 120 |
| 6.1. Описание движения микрочастиц. Принципы дополнительности и причинности | 120 |
| Волновая механика | 120 |
| Матричная механика..... | 121 |
| Квантовая механика | 121 |
| 6.2. Принципы соответствия и неопределенности. Роль прибора и процесса измерения в квантовой механике..... | 123 |
| 6.3. Строение химических элементов и понимание Периодической таблицы Менделеева..... | 125 |
| Рис. 6.1. К пояснению понятия спина электрона | 126 |
| 6.4. Радиоактивные элементы и возможности превращения элементов..... | 128 |
| Рис. 6.2. Диаграмма, иллюстрирующая правила смещений атомов при радиоактивных превращениях (по оси ординат — массы атомов, по оси абсцисс — порядковый номер элемента) | 129 |
| Рис. 6.3. Схема ядерного распада | 132 |
| 6.5. Представления о строении атомного ядра..... | 134 |
| Рис. 6.4. Зависимость удельной энергии связи от атомной массы | 135 |
| 6.6. Элементарные частицы и проблема поиска «первичных объектов»..... | 137 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 139 |
| Глава 7. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА (ОТ МИКРОМИРА К МАКРОМИРУ)..... | 140 |
| 7.1. Представление о строении молекул | 140 |
| Рис. 7.1. Ионная связь на примере структуры молекулы NaCl:..... | 141 |
| Рис. 7.2. Примеры химических связей: | 142 |
| 7.2. Развитие представлений о составе веществ. Законы стехиометрии..... | 143 |
| 7.3. Развитие структурной химии..... | 146 |
| Рис. 7.3. Первые три молекулы ряда углеродных молекул с линейными цепочками: | 146 |
| 7.4. Строение веществ в разных агрегатных состояниях | 148 |
| Рис. 7.4. Структура одного из типов кристаллов льда..... | 150 |
| Рис. 7.5. Структура графита | 150 |
| 7.5. Строение и свойства металлов..... | 152 |
| Таблица 7.1. Удельная теплоемкость с некоторых металлов при комнатной температуре | 153 |
| Рис. 7.6. Пример потенциальной ямы для электрона в твердом теле..... | 153 |
| Рис. 7.7. Энергетические зоны в металле (<i>a</i>) и образование зон при сближении атомов (<i>б</i>)..... | 154 |
| Рис. 7.8. Схема связи ширины запрещенной зоны и электрических свойств кристалла в металле (<i>a</i>), полупроводнике (<i>б</i>) и диэлектрике (<i>в</i>) | 155 |
| 7.6. Структура и уникальные свойства воды..... | 156 |
| Рис. 7.9. Вода в различных фазах | 156 |
| Рис. 7.10. Структура молекулы воды | 157 |
| 7.7. Строение и свойства атома углерода, определившие его роль в природе | 157 |
| Рис. 7.11. Схема соединения атомов углерода друг с другом в органических молекулах:..... | 159 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 160 |
| Глава 8. КОНЦЕПЦИИ ПРОЦЕССОВ И ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ..... | 161 |
| 8.1. Химический катализ и методы управления химическими процессами | 161 |
| (1)..... | 161 |
| (2)..... | 161 |
| (3)..... | 162 |
| (4)..... | 162 |

| | |
|--|------------|
| 8.2. Цепные реакции и свободные радикалы..... | 164 |
| 8.3. Особенности растворения в воде различных веществ..... | 165 |
| Рис. 8.1. Тройная точка воды | 166 |
| Аномальность свойств воды | 166 |
| Рис. 8.2. Водородные связи в молекуле воды:..... | 167 |
| Рис. 8.3. Шкала кислотности (щелочности) некоторых жидкостей | 167 |
| Химические свойства воды | 168 |
| 8.4. Процессы диффузии и осмоса, их роль в клеточных мембранах | 169 |
| Рис. 8.4. Примеры необратимых процессов: | 170 |
| 8.5. Понятия фазы и фазового перехода. Фазовые переходы первого и второго рода | 171 |
| 8.6. Сверхтекучесть и сверхпроводимость | 174 |
| Современная теория сверхпроводимости | 177 |
| 8.7. Возникновение самоорганизации в неравновесных системах. Понятие обратных связей | 177 |
| Рис. 8.5. Ячеистая структура жидкости при неустойчивости в ячейке Бенара | 178 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 179 |
| Глава 9. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАРОЖДЕНИЯ | |
| СТРУКТУР В МИРЕ ЗВЕЗД..... | 180 |
| 9.1. Строение типичной звезды. Источники энергии Солнца и звезд | 180 |
| Рис. 9.1. Схема внутреннего строения Солнца с распределением температур внутри него:..... | 181 |
| Магнитные поля играют на Солнце существенную роль..... | 181 |
| Рис. 9.2. Схема синтеза гелия из атомов водорода | 183 |
| 9.2. Звезды, их характеристики и эволюция | 184 |
| Светимость звезды | 185 |
| Рис. 9.3. Схема распространенности химических элементов во Вселенной | 185 |
| Спектральные классы ввел в 1900 г. американский астроном Э.Пикеринг, обозначив их буквами латинского алфавита..... | 186 |
| Рис. 9.4. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела (спектр — светимость)..... | 186 |
| Главная последовательность | 187 |
| Рис. 9.5. Схема возможного эволюционного трека звезды с массой, несколько большей массы Солнца ... | 187 |
| Масса звезды | 187 |
| Рис. 9.6. Распределение физических характеристик звезд и звездной эволюции | 188 |
| Рис. 9.7. Эволюция звезд, типы ядерных реакций в них и распределение химических элементов (характеристика «металличности» звезд)..... | 189 |
| 9.3. Переменные звезды и их эволюция. Конечные стадии эволюции звезд и Солнца..... | 189 |
| 9.4. Галактика, ее форма и строение. Солнечная система в Галактике..... | 192 |
| Рис. 9.8. Схема положения Солнечной системы в Галактике (отмечено крестиком):..... | 193 |
| Рис. 9.9. Подсистемы Галактики: | 193 |
| 9.5. Многообразие мира галактик. Содержание и значение закона Хаббла | 195 |
| Рис. 9.10. Местная группа галактик | 195 |
| Рис. 9.11. Галактики:..... | 196 |
| Черные дыры | 199 |
| 9.6. Сценарий стационарной Вселенной и «Космология Большого Взрыва» | 199 |
| Рис. 9.12. Схемы, поясняющие модель Большого Взрыва (1—4 — стадии развития взрыва)..... | 201 |
| 9.7. Рождение частиц по современной модели развития Вселенной | 202 |
| 9.8. Модель инфляционной Вселенной. Возникновение во Вселенной крупномасштабных неоднородностей..... | 203 |
| Рис. 9.13. Инфляционная модель развития Вселенной — последовательность событий в очень ранней Вселенной | 205 |
| Глава 10. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАРОЖДЕНИЯ | |
| СТРУКТУР В МИРЕ ПЛАНЕТ..... | 208 |
| 10.1. Элементы планетной космогонии | 208 |
| Рис. 10.1. Формирование планет из протосолнечной туманности | 210 |
| 10.2. Формирование малых тел Солнечной системы, Луны и Земли. Движения Земли, строение геосфер и изучение процессов..... | 212 |
| 10.3. Распространенность и круговороты химических элементов на Земле | 216 |
| Рис. 10.2. Относительная распространенность химических элементов в Солнечной системе в зависимости от порядкового номера | 217 |
| Рис. 10.3. Схема внутреннего строения Земли с указанием ведущих химических элементов в каждой оболочке..... | 218 |
| 10.4. Модели появления геологических структур на поверхности Земли | 220 |
| Рис. 10.4. Геохимические циклы Земли: | 221 |
| Рис. 10.5. Схема глобальной тектоники Земли (движение вещества показано стрелками)..... | 225 |
| 10.5. Геохронологическая шкала эволюции Земли..... | 225 |
| Рис. 10.6. Биогеологическая история Земли | 226 |
| 10.6. Самоорганизация при образовании планет и взаимодействии геосфер..... | 228 |
| Рис. 10.7. Земля как большой магнит (траектории заряженных частиц показаны штриховыми линиями, магнитные силовые линии — сплошными)..... | 229 |

| | |
|--|------------|
| Рис. 10.8. Наглядное представление системы Солнце — межпланетная среда — Земля | 230 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 232 |
| Глава 11. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ, СВОЙСТВА И УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ УРОВЕНЬ | 233 |
| 11.1. Общая характеристика науки о живом и развитие традиционной биологии | 233 |
| 11.2. Основные свойства живой материи | 236 |
| 11.3. Уровни организации живой природы на Земле | 238 |
| 11.4. Молекулярно-генетический уровень организации живой материи. Строение и структура макромолекул белков | 240 |
| Рис. 11.1. Схема упорядочения структуры белка — свертывание в глобулу | 242 |
| 11.5. Установление строения и структуры молекул ДНК и РНК | 243 |
| Рис. 11.2. Структурные формулы пуринов и пиримидинов: | 243 |
| 11.6. Молекулярные механизмы генетической репродукции, синтеза белка и изменчивости | 245 |
| Рис. 11.3. Репликация молекулы ДНК | 247 |
| Рис. 11.4. Схема биосинтеза белка: | 248 |
| Рис. 11.5. Процесс транскрипции: синтез РНК на ДНК-матрице | 249 |
| Рис. 11.6. Получение и клонирование рекомбинантной ДНК | 251 |
| Рис. 11.7. Основные этапы передачи генетической информации | 253 |
| 11.7. Молекулярный механизм процессов обмена веществ и энергии | 254 |
| Рис. 11.9. Схема, поясняющая функции процесса дыхания (высвобождение энергии, используемой в процессах метаболизма и образование строительных блоков, из которых в клетке синтезируются другие соединения) | 256 |
| АТФ — это аденозинтрифосфат | 256 |
| Лизосомы | 257 |
| 11.8. Молекулярные основы воспроизведения генетической информации и осуществления связи между клетками | 257 |
| Митоз (от греч. <i>mitos</i> — нить) | 257 |
| Рис. 11.10. Схема регулирования жизнедеятельности животных центральной нервной системой и гормональными механизмами | 259 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 260 |
| Глава 12. ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНИ. КОНЦЕПЦИИ ЭВОЛЮЦИОННОЙ БИОЛОГИИ | 261 |
| 12.1. Основные положения клеточной теории, методы изучения состава клетки | 261 |
| Клетка | 261 |
| Клеточная теория, или цитология (от греч. <i>kytos</i> ... — сосуд, клетка), | 261 |
| Рис. 12.1. Схема деятельности основных структурных компонентов клетки | 262 |
| Размеры клеток | 262 |
| Рис. 12.2. Специализация различных клеток: | 263 |
| 12.2. Строение и функции основных органелл клетки | 265 |
| Рис. 12.3. Интенсивность падающего на Землю солнечного излучения H_λ в зависимости от длины волны (λ): | 266 |
| На рис. 12.3, <i>а, б, в</i> | 266 |
| 12.3. Функции клеточных мембран. Работа «ионного насоса» | 268 |
| Рис. 12.4. Схема работы ионного насоса через клеточные мембраны | 268 |
| 12.4. Процессы фотосинтеза и клеточного дыхания | 269 |
| Рис. 12.5. Распределение мощности солнечного излучения, падающего на Землю | 270 |
| Рис. 12.6. Роль растений в процессе фотосинтеза | 270 |
| Рис. 12.7. Механизмы фотосинтеза растений: цепь переноса электрона с образованием АТФ и НАДФ ^Н и углеродный цикл | 271 |
| Рис. 12.8. Продукты световых и темновых реакций фотосинтеза | 272 |
| Рис. 12.9. Схема управляющих механизмов клетки | 274 |
| 12.5. Формирование идей эволюции в биологии | 274 |
| 12.6. Понятие о неодарвинизме и синтетической теории эволюции | 277 |
| 12.7. Понятия микро- и макроэволюции. Естественный отбор — направляющий фактор эволюции | 279 |
| 12.8. Основные гипотезы происхождения живого | 281 |
| Рис. 12.10. Схема, показывающая возможные пути происхождения жизни | 282 |
| 12.9. Концепция происхождения живого по гипотезе Опарина—Холдейна | 284 |
| Рис. 12.11. Схема опыта Миллера по синтезу органических веществ из смеси метана, аммиака и воды при искровом разряде | 285 |
| 12.10. Современная оценка концепции биохимической эволюции в биологии | 287 |
| Концепция Вернадского появилась в 1931 г. | 287 |
| Концепция «генобиоза» (информационная) появилась в 50-е гг. в связи с работами Холдейна. | 287 |
| Концепция голобиоза, признающая первичность белков, не потеряла своего значения. | 287 |
| Судьба коацерватной капли | 288 |
| Рис. 12.12. Схема гиперкаталитического цикла (по Эйгену) | 289 |
| Вопросы для самопроверки и повторения | 290 |
| Глава 13. КОНЦЕПЦИИ САМООРГАНИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В | |

| | |
|---|------------|
| СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ..... | 291 |
| 13.1. Возникновение упорядоченности в гидродинамике. Понятие хаоса..... | 291 |
| Хаотические эффекты,..... | 291 |
| Рис. 13.1. Пример хаотического движения:..... | 293 |
| 13.2. Порядок и хаос в больших системах. Понятие фрактала..... | 293 |
| Рис. 13.2. Фазовая траектория маятника: без затухания (а) и с затуханием (б)..... | 294 |
| Рис. 13.3. Странный аттрактор..... | 294 |
| 13.3. Пороговый характер самоорганизации и представление о теории катастроф..... | 296 |
| Рис. 13.4. Примеры проецирования поверхностей на плоскость:..... | 296 |
| 13.4. Математические закономерности эволюции. Понятие бифуркации..... | 297 |
| Рис. 13.5. К пояснению законов Фейгенбаума:..... | 298 |
| Рис. 13.6. Затягивание потери устойчивости при динамической бифуркации..... | 299 |
| 13.5. Синергетика — новый научный метод..... | 299 |
| Рис. 13.7. Биспиральные вихревые структуры в закрученных потоках, проявляющиеся посредством визуализации поля оптической фазовой плотности (а) и поля скоростей в заданном сечении (б)..... | 301 |
| Рис. 13.8. Визуализированные волновые структуры на поверхности вращающихся пластин при различных угловых скоростях и радиусах:..... | 301 |
| 13.6. Эволюционная химия. Возникновение упорядоченности в химических реакциях..... | 301 |
| 13.7. Возникновение самоорганизации в морфогенезе..... | 304 |
| 13.8. Моделирование отношений между трофическими уровнями в биоценозах..... | 305 |
| 13.9. Элементы теории самоорганизованной критичности..... | 308 |
| Рис. 13.9. Упорядоченные структуры, возникающие на поверхности песка при развитии сдвиговых деформаций..... | 308 |
| Рис. 13.10. Модель землетрясения..... | 309 |
| Вопросы для самопроверки и повторения..... | 310 |
| Глава 14. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА БИОСФЕРНОМ УРОВНЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ | 311 |
| 14.1. Биосферный уровень организации жизни. Основы учения В.И.Вернадского о биосфере..... | 311 |
| 14.2. Распределение на Земле солнечной энергии. Биотический круговорот..... | 313 |
| Рис. 14.1. Схема солнечно-земных связей..... | 314 |
| Рис. 14.2. Превращения солнечной энергии..... | 314 |
| Рис. 14.4. Круговорот азота в биосфере..... | 315 |
| Рис. 14.3. Пирамида преобразования энергии (а) и передача энергии по трофическим уровням (б)..... | 317 |
| Рис. 14.5. Круговорот органических веществ (в млрд кг) в биосфере:..... | 318 |
| 14.3. Связи между организмами в экосистеме..... | 318 |
| Рис. 14.6. Стадии роста и созревания плода растения, приведенные в относительных размерах, и интенсивности дыхания..... | 320 |
| Рис. 14.7. Связь между количеством выдыхаемой теплоты и массой тела..... | 320 |
| 14.4. Самоорганизация в формировании климата..... | 320 |
| 14.5. Концепции эволюции растительного и животного мира..... | 324 |
| Рис. 14.8. Биогеохимическая связь эволюции живого и планеты Земля, представленная в виде «спирали времени»..... | 325 |
| 14.6. Человек — качественно новая ступень развития биосферы..... | 327 |
| 14.7. Концепции коэволюции и ноосферы..... | 329 |
| 14.8. Естественно-научная картина мира и общественная мысль..... | 331 |
| Вопросы для самопроверки и повторения..... | 334 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 335 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 336 |
| ОГЛАВЛЕНИЕ..... | 337 |

ВВЕДЕНИЕ

Естествознание — неотъемлемый компонент культуры, определяющий мировоззрение человека. Научное мировоззрение обеспечивает восприятие достижений науки обществом и устойчивость к манипуляциям общественным сознанием. Рациональный метод, сформировавшийся в рамках естественных наук, проникает и в гуманитарную сферу, и в общественную жизнь. Он существенно дополняет художественный метод познания действительности.

В 70-е годы XX в. шли философские споры о *системном подходе* наук к своим объектам. Такой подход требовался в общественных науках, которые перешли к рассмотрению сложных, многоуровневых систем. Облик естествознания менялся в общекультурном и историческом контекстах.

Современная научная картина мира отличается сложностью рассматриваемых систем. Так, с помощью ЭВМ решаются задачи, которые не могли быть решены четверть века назад. Оказалось, что в сложных системах вдали от равновесия могут возникать из хаоса упорядоченные состояния. Хаос стал выступать созидательным началом, конструктивным и обязательным механизмом эволюции. В настоящее время обществу необходимо решать сложные задачи выхода из многочисленных кризисов, причем пути выхода не должны быть катастрофическими, фактически — это задачи балансировки между рисками и безопасностью. Проблемы выбора стратегии связывают с нелинейной динамикой, разработавшей различные пути перехода от хаоса к порядку. Явления самоорганизации начали изучаться в естествознании, экологии, экономике. Будущие специалисты во многих областях должны получить представление о современной научной картине мира.

Актуальность курса «Концепции современного естествознания» созвучна потребностям в целостном взгляде на окружающий мир. Данная дисциплина введена в учебные планы более чем сорока социально-экономических и гуманитарных специальностей вузов. Она является продуктом междисциплинарного синтеза, основанного на эволюционно-синергетическом подходе. К настоящему времени в основном определились цели, содержание и структура курса.

Предлагаемое учебное пособие написано в соответствии с Государственным образовательным стандартом. Методологические установки и релятивистское миропонимание включены в главы,

3

посвященные формированию научных программ и картин мира, понятий времени, пространства, движения и, конечно, космологии. Курс построен без традиционного деления на отдельные дисциплины и направлен на создание единой картины мира, которая включает терминологию, язык, сложившиеся понятия и современные достижения. Для удобства пользования пособием выделено 14 глав по основным темам.

Сначала в главе 1 рассматриваются вопросы логики познания, научного метода, процессов формирования картин мира и научных программ. Показано, как человек сумел расширить границы непосредственного восприятия мира, создавая методы, приборы, проникая и в микромир, и в космос; как он сумел узнать и, сопоставляя, измерить этот огромный мир. Рассмотрены изменения представлений о пространстве, времени и движении от Декарта, Галилея и Ньютона до Эйнштейна и его последователей. В главе 2 обсуждаются масштабы Вселенной и ее объектов в пространстве и во времени, иерархическое строение материи и фундаментальные взаимодействия. В главе 3 вводятся простейшие модели для описания движений изолированных систем. С помощью этих моделей описываются движения в макро- и мегамире; обсуждаются концепции детерминизма и причинности классической физики. Отмечено, что единство природы и универсальность ее законов наиболее ярко проявляются в колебательных и волновых процессах. Показано, как законы сохранения и принципы симметрии приобретают столь значимый статус в описании и восприятии природы человеком, как успехи точного естествознания повлияли на формирование понятий экономической теории. Выделена роль закона тяготения в становлении идеи единства материального мира. Глава 4 посвящена динамическим и статистическим закономерностям окружающего мира. Фактически это — переход от использования простейших классических моделей к сложным системам, когда необходимо сопоставлять микроскопическое описание систем с макроскопическим, когда модельные параметры на микроуровне сопоставляются с характеристиками сложной системы. Обсуждены начала термодинамики и основные понятия: теплота, равновесие, внутренняя энергия, энтропия.

Глава 5 посвящена концепции атомизма и ее приложению к организации материи в микро- и макромире. На примере корпускулярно-волнового дуализма света и вещества продемонстрирован переход от наглядного моделирования объектов мира к их объединению. В главе 6 рассмотрены особенности взаимодействий и структур в микромире. Уделено особое внимание мировоззренческим установкам так называемого неклассического описания мира, когда понятие вероятности становится основным. В главе 7 дается описание строения вещества от микрочастиц до объектов макромира, а в главе 8 — концепции взаимодействий и структур

4

объектов микро- и макромира, связанных с изменениями состояний и процессами.

В главе 9 детально рассмотрены процессы в мегамире — звезды, галактики, Вселенная. Обсуждаются концепции эволюции во Вселенной. В главе 10 представлена космогония тел Солнечной системы, геологическая и геохимическая история нашей планеты и ее спутника — Луны.

Затем (глава 11) рассмотрены основные формы, свойства и уровни организации жизни на Земле, более подробно представлены развитие биологии как науки о живой материи и традиционной и физико-химической биологии. Обсуждается самый глубокий уровень организации живого — молекулярно-генетический. Глава 12 посвящена онтогенетическому уровню организации жизни. Обсуждаются различные подуровни (клеточный, тканевый, органный, организменный, популяционный, видовой), а также концепции эволюции в науке о живом и биохимические процессы, приведшие к зарождению жизни. Выделены аналогии при изучении природных систем как систем сложных. В соответствии с общей направленностью курса после описания объектов природы, их строения и функций рассмотрены особенности их эволюции.

В главе 13 изложены основы концепции самоорганизации и построения теории описания неравновесных процессов в сложных системах. Показана роль обратных связей в организации процессов, происходящих в сложных системах, далеких от равновесия. Рассмотрены примеры возникновения самоорганизации материи в разных предметных областях. Дано представление о междисциплинарном подходе к изучению сложных систем — синергетики, теории диссипативных процессов и теории катастроф.

В заключительной главе представлены концепции эволюционных процессов в сложной системе — биосфере Земли. Рассмотрены явления самоорганизации и инертности человеческого общества и концепция коэволюции, взаимодействия внутри сложных систем, соотношения в сообществах и возможности компьютерного моделирования. Дана характеристика антропному принципу и космическому значению возникновения жизни на Земле.

Общепризнано, что образование, культура, наука — краеугольные камни развития общества. По отношению государства к этим трем сферам легко представить себе его будущее. Страна, недооценивающая роль указанных сфер, обречена на прозябание в постиндустриальном мире.

В 1992 г. состоялась беспрецедентная по масштабу и уровню Международная конференция по устойчивому развитию, на которой было признано, что существующая парадигма развития цивилизации должна быть кардинально изменена. В принятом участниками конференции (в том числе главами правительств и государств) документе «Повестка дня на XXI век» было признано,

5

что «развитие будет устойчивым», если «удовлетворяются потребности ныне живущих поколений без лишения возможности последующих поколений удовлетворять свои потребности». Но конкретные меры достижения как на этой, так и на последующей (Киото, 1997) конференции были далеки от практической реализации. Пропаганде концепции устойчивого развития много внимания уделял председатель Сибирского отделения РАН академик В. А. Коптюг. В одном из своих выступлений на Международном конгрессе «Наука и образование на пороге XXI века» он отметил: *«Всплеск в последнее время астрологии, парапсихологии и прочей псевдонаучной галиматии также не может не сказаться на формировании сознания россиян, которым предстоит жить в XXI в. Если мы хотим, чтобы представители общества действительно принадлежали к роду homo sapiens, то система образования должна на всех этапах содействовать развитию самостоятельного мышления, критического анализа и формированию духовного стержня».*

Исторический подход и использование аналогий при формировании современной картины мира важны для мировоззрения, оценки «масштаба» теорий, формирования образов, охватывающих естественно-научную картину мира, т. е. усвоения новых идей обществом. Учебное пособие дает не набор догм, а опыт отбора гипотез, развивает творческое мышление, пробуждает тягу к выработке собственного мнения относительно тех или иных несоответствий теории и опытов, к личному

активному участию в формировании современной картины явления.

Книга стала призером конкурса учебников и учебных пособий нового поколения по данной дисциплине, проводимого Министерством образования Российской Федерации в 2001 г.

Глава 1. ЛОГИКА ПОЗНАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

1.1. Наука — часть культуры

Понятия «наука» и «культура» столь многогранны, что не могут быть выражены каким-то одним определением, состоящим из совокупности признаков. Для термина «культура» существует около 200 смысловых определений и толкований. При деятельном подходе культура — способ регуляции, сохранения и воспроизводства общества, «технология» человеческой деятельности, некий «ген» жизнедеятельности людей. Под культурой понимается все, что создано человеческим трудом в ходе истории. Она не существует вне человека и общества. Процесс труда включает мышление, знания, волю и чувства человека. Осваивая достижения культуры, человек развивает свой внутренний мир, знания, навыки, мировоззрение, а создавая новые элементы культуры, становится ее творцом, его труд — творческим. В зависимости от целей культура может быть духовной, социальной и материальной.

К науке относят особую сферу человеческой деятельности, направленную на выработку, производство и систематизацию объективных знаний об окружающем мире. Наука — это и совокупность самих знаний, отвечающих определенным критериям, и социальный институт, т. е. совокупность организаций, занимающих определенное место в структуре общества и выполняющих общественные функции.

Наука — один из важнейших компонентов духовной культуры, в котором в наибольшей степени представлена познавательная сторона деятельности. В наши дни наука — мощный фактор развития самых различных областей человеческой деятельности. В принятой в 1996 г. «Доктрине развития российской науки» ей была дана следующая оценка: «Российская наука за свою многовековую историю внесла огромный вклад в развитие страны и мирового сообщества. Своим положением великой мировой державы Россия во многом обязана достижениям отечественных ученых». Основополагающая роль науки не может быть подменена организационными и срочными оперативными мероприятиями по обеспечению безопасности страны и человечества. Познание объективных законов мира дает возможность целенаправленного практического освоения и изменения окружающего мира, является неотъемлемым моментом практики материального его преобразо-

7

вания. Познание может быть донаучным, вненаучным и научным. Знания должны отвечать определенным критериям.

Донаучное и вненаучное (обыденное) познания описывают состояния предметов и некоторые факты, хотя повседневное сознание включает много конкретных знаний об окружающем мире.

В практической деятельности человек накапливал знания о местности, животных, растениях и самом себе. Эти отрывочные знания, рецепты и правила отражены на глиняных табличках Месопотамии. Письменность появилась в Вавилонии в середине IV тысячелетия до н.э., а в Египте — на 500 лет раньше. Давно эти народы начали пользоваться водяными и солнечными часами, ввели единицы веса, длины, площади и объема. Они знали 5 видимых планет и целый ряд созвездий, научились предсказывать затмения. Свитки папируса, обнаруженные в долине Нила, относятся ко II тысячелетию до н. э. Египетские жрецы пользовались снадобьями для лечения и умели бальзамировать трупы. Знания частично классифицировались сначала образно, а затем и количественно. В Вавилоне и Древнем Египте были попытки упорядочить данные опытов и наблюдений. Около 5 тыс. лет назад появились определенные приемы счета времени по Луне и Солнцу; при этом ритмики природы, организма и трудовой деятельности связывались между собой. Разработку медных рудников, освоение рудного дела и плавку металла относят к V тысячелетию до н.э. Затем сложилось бронзолитейное производство, а ко второй половине IV тысячелетия до н.э. — производство рудного железа. Использование металлических изделий повысило производительность труда в несколько раз; появились плуг и мелкое ремесленное производство. Познавательной **предпосылкой науки** явилось развитие критических функций разума и абстрактного мышления в Древнем Египте и Древнем Вавилоне. Человек стал выделять себя из мира природы, почувствовал себя активной силой, преобразующей ее для своей пользы. Общественное разделение труда поделило жизнь человека на личную, бытовую и производственную, трудовую. Так как последняя ориентировалась на рациональное сознание, она стала предпочтительней в развитии цивилизации, порождая конфликт личного и общественного. Накопление рациональных знаний и рост практических потребностей общества начали противоречить мифологическому сознанию. И хотя умозаключения еще делались на основе наблюдений, созерцания и рассуждений, в Древней Греции VII—VI вв. до н.э. возник интерес к пониманию мира в целом.

Переход к научному познанию предполагал выработку нового отношения к миру и человеку, был

противоречивым и долгим. Постепенно формировались идеология и психология разделения общества на классы. Сознание человека разделилось на мораль, искусство, религию, философию и т.д. и было готово подняться до уровня абстракции, позволяющей задаться вопросом о первооснове бытия.

8

На возникновение науки и истоки научного метода существует несколько точек зрения.

В соответствии с одной из концепций освобождение сознания от мифологии — основной признак перехода к научному мышлению. Евклид и Архимед стремились выявить закономерности, строили свои теории согласно логике и обоснованности и только после этого выясняли возможности их практического использования. Обобщенная форма восприятия и объяснения явлений окружающего мира природы, зародившаяся в античности в трудах Гераклита, Демокрита, Аристотеля и послужившая началом формирования науки в целом, получила название *натурфилософии*. Ее подход соответствовал эмпирическому уровню исследования. Она существовала многие века как единая наука о природе и обществе. Наблюдаемые явления сопоставлялись со здравым смыслом, сформировавшимся на основе других наблюдений и логики. Из обобщений формулировали гипотезу происходящего, затем — новые наблюдения и проверки, которые могли привести к открытию новых закономерностей и предсказанию неизвестных явлений. Формулировка законов выводила науку на теоретический уровень исследования. В период возникновения наука практически не отличалась от философии, ученые называли свои труды «позитивной экспериментальной философией». Существенный вклад в обоснование науки и ее методов внесли такие мыслители, как Ф.Бэкон, Р.Декарт, Дж.Локк, Г.Лейбниц и др. Но с развитием специфических особенностей эксперимента и технологии примерно с XVI—XVII вв. единая наука разделилась.

Другая концепция относит возникновение науки к XVI — XVII вв., когда появились работы И. Кеплера, Г. Галилея, И. Ньютона, Хр. Гюйгенса и др., и связывает рождение науки с *естествознанием*. Естествознание создает идеалы и критерии научности. Постепенно из натурфилософии выделилась *философия*, обретя свой предмет среди проблем, которые не могут быть решены объективно: проблемы смысла, души, духа, сознания, бытия. Философская мысль только создает предпосылки для индивидуального поиска ответа на вечные вопросы бытия вообще и собственного — в особенности. Поэтому рассмотрение мироздания в целом, размышление о вечности и бесконечном разнообразии природы связаны в ней с жизненными ценностями исследователя, с его пониманием смысла жизни.

Способность опознавать образ — одно из фундаментальных свойств мозга. Реализуемая так информация — содержательная основа мышления. Окружающий мир отражается в сознании человека во всем многообразии. Сведения о нем поступают через органы чувств, затем передаются в мозг единственным способом — модуляцией нервных импульсов. Импульсы идут по разным волокнам в разные участки мозга. Пространственное и вре-

9

менное суммирование импульсов, связанная с ним мозаика процессов возбуждения и торможения в коре головного мозга — это физиологическая основа человеческого мышления. Но еще необходимо отфильтровать шумы и выделить структурный инвариант, лежащий в основе формирования образа.

Принято разделять мышление образами (конкретное) и понятиями (абстрактное), причем правое полушарие головного мозга специализируется на образах реальных объектов и эмоциональных реакциях, а левое — формирует абстрактное мышление. Из-за асимметрии мозга обычно одна из его частей доминирует, поэтому считают, что «правополушарное мышление» настраивает на более успешные занятия гуманитарными науками или искусством, а обладатели «левополушарного мышления» должны выбирать научно-технические области деятельности. Но исследования нейрофизиологов показали, что правое полушарие распознает текст целиком, а левое — поэлементно. Поэтому и функции их можно считать синтетической и аналитической соответственно, и обе они должны находиться в гармонии для адекватного познания действительности как отдельным человеком, так и наукой в целом.

Наука стремится к *объективности*, исключая личностное восприятие мира, и это отличает ее от других компонент духовной культуры. *Гуманитарное знание* включает этику, историю, философию, юриспруденцию, педагогику, филологию, искусствоведение и т. п. Кроме того, существует ряд наук о человеке (физиология, психология), которые используют гуманитарные и естественно-научные методы исследования. *Естествознание* направлено на изучение природы, в которой действуют независимые от человека законы, которые он пытается постичь. Сначала в нем преобладали причинные объяснения явлений, но выяснение причины явлений еще не означает понимания или получения полного знания о предмете или явлении. Так, у Ньютона сила — причина ускорения, а Аристотель к силе как причине движения относил и цель («отец — причина ребенка»). В гуманитарных науках такое объяснение не всегда возможно, да и не всегда нужно, часто важнее раскрыть цели, мотивы или намерения в поведении людей. В гуманитарной методологии понимание достигается через истолкование явлений, текстов и событий; такой метод часто называют герменевтическим по имени бога Гермеса, служившего посредником между богами и людьми и способного истолковывать людям волю богов. Общественные науки больше используют гуманитарное знание, так как в обществе ничего не происходит без действий и намерений человека.

Английский писатель Ч.Сноу в Кембридже прочитал лекцию «Две культуры и научная революция» (1959),

вызавшую много споров. Отмечая факт разрыва между «естественно-научной и гуманитарной культурами» в XX в., Сноу указывал на необходимость срочных мер по их сближению. Почти одновременно и в СССР

10

возникла дискуссия о «физиках» и «лириках». Но разрыва не произошло, наука и искусство продолжают сосуществовать и развиваться. Они разными способами исследуют окружающий мир и отражают его в сознании; научные понятия и художественные образы по-разному воссоздают его, но они совместимы. Их сосуществование даже плодотворно, о чем говорят примеры истории науки (Леонардо да Винчи, М.В.Ломоносов, И.В.Гете, А.П.Бородин). Именно успехи математики меняют ситуацию «размежевания культур». Постулаты Евклида или закон Архимеда были связаны с *эстетическими критериями*: круг — идеальная замкнутая кривая, регулярно повторяющееся движение должно совершаться равномерно по круговым орбитам; целые числа являются чудом, лежащим в основе мироздания, они определяют гармонию прекрасных созвучий и т.д. И такое знание согласовывалось с гармонией мира. Эти гармонии подвергались проверке и часто не выдерживали ее (например, круговые орбиты в системе мира Птолемея и Н. Коперника были заменены под давлением результатов тщательных наблюдений эллипсами — искаженными окружностями Кеплера). Но П.Кеплер обнаружил *новую гармонию* в установленном им по результатам наблюдений законе площадей. И подобное происходило многократно в истории науки. Грандиозные успехи математизированного естествознания и порожденной им техники вызвали стремление к совершенствованию его структуры для достижения идеальной дедуктивной конструкции каждой научной дисциплины. Если в математике идеал самодостаточности ограничен теоремой Геделя, то ограниченная форма этой структуры сохранила определяющее значение. И данное обстоятельство заслонило важность интуитивных, внелогических элементов теории. В естественных науках внелогический элемент сведен к суждению о достаточности опыта, а все прочие должны быть совместимы с положительным знанием и логикой, тогда как в науках гуманитарных и повседневной практической деятельности внелогические суждения разнообразны и являются основными.

В настоящее время возникает и некий протест против чисто аналитического подхода к природе, отстаивается иная логика. Как подметил французский биохимик Ж. Л. Моно, «наилучшие литературные произведения, написанные в течение последних 30 лет, полностью ненаучны или даже антинаучны. От Кафки до Беккета, через Камю и Сартра можно проследить, что большинство писателей нашего времени... так или иначе принадлежат этой школе». Имена, упомянутые здесь, не играют особой роли, но притягательности внелогичного в форме или содержании раньше не было. «Ненаучность» содержания — преобладание интуитивного, повышение требований к ассоциативной способности у слушателя, зрителя, читателя — становится все более доминирующим в любом виде искусства.

В религии аналогом доказательности для утверждения этических норм является авторитет постулированного высшего существа, аб-

11

солютного духа. Ее вечные истины тем самым опираются тоже на интуитивные суждения. Множество примеров из области *искусства* показывают его способность нести достоверность в самом себе через свои «сверхзадачи», убеждающие удовольствием, правдоподобием, своими многообразными частными функциями. И эти многообразные функции притягательны для потребителя искусства, они дают наслаждение, чувство гармонии, убеждают в правильности той или иной позиции. При выборе решения, модели или суждения, как видно из истории открытий в науке, эти функции искусства очень важны и являются условием выживания человечества. И чем больше логические функции психики передаются машине, тем ярче выступает внелогическая функция интеллекта. И в научном творчестве естествознания все более проявляются черты, свойственные художественному творчеству и научной работе гуманитария.

Сейчас на границе между «двумя культурами» возникло много новых дисциплин. Так, филология разветвилась на лингвистику, поэтику, литературоведение, фольклористику; появились психофизиология и математическая лингвистика. Проникают внелогические элементы в кибернетику. Переход к системному анализу, диалоговым ЭВМ означает включение элементов, которые не связаны с числом, не формализуются. Это — и синтетическая оценка ситуации, и неформализуемый отбор существенных факторов в отличие от несущественных и т.д. И не случайно ЭВМ требуют создания рабочих коллективов, где математики работают вместе с лингвистами и психологами. Стремительно возрастающая роль интеллектуальной деятельности, которая может быть передана машине и которую машина способна выполнить быстрее, подвергает формализации не только мыслительную способность человека, но и внелогические компоненты мышления. И это составляет сущность новой «интеллектуальной революции», называемой так по аналогии с «промышленной революцией» XVIII — XXI вв. Ныне не только простые вычисления, но и испытание, и количественная проверка моделей могут быть переданы машине. Тем самым поиски новых моделей, принимаемых в науке и искусстве с учетом интуиции, остаются человеку и, составляя основу творческой деятельности интеллекта, создают почву для взаимопонимания и сближения «двух культур».

Современный уровень развития естествознания, обретение им глубоких взаимосвязей с другими науками, прямое и опосредованное влияние на развитие производительных сил включают его в решение *общесоциальных задач*. Наряду с материальным эффектом, новациями от применения достижений

естественных и математических наук и способом рационализации, выходящим за пределы естествознания и техники, возникают новые нравственные ценности — образцы объективности, добросовестности, честности, реализуемые в труде. Эта крепнущая связь и взаимо-

12

действие науки, техники и общества превратили науку в *движущую силу общества*. Наука все более ориентируется на человека, на развитие его интеллекта, творческих способностей, культуры мышления, на создание материальных и духовных предпосылок его целостного развития.

В настоящее время складывается и особая дисциплина, называемая *этикой науки*, которая была впервые сформулирована английским ученым Г. Спенсером. Нравственность, по его мнению, есть форма развития эволюции живой природы, определенной фазой которой является человеческое общество. Сторонники этого представления о нравственности развивают концепцию эволюционного гуманизма. Дж.Хаксли, К.Уоддингтон, П.Тейяр де Шарден, русские мыслители-космисты — Н.Ф.Федоров, В.И.Вернадский, А.Л.Чижевский пытались найти объективные (естественно-научные) основания морали. Эти проблемы широко обсуждаются в обществе и особенно в таких науках, как социобиология, генетика, этология.

Цикличность исторических процессов на основе обобщения за 2500 лет исторических событий исследовал А.Л. Чижевский, динамику процессов в природе и циклический характер перехода биосферы в ноосферу — В. И. Вернадский, социокультурный аспект циклов — П. А. Сорокин. За последние 25 лет сильно вырос интерес к идеям космистов (особенно после кризисов середины семидесятых годов XX в. и последующих перестроек в структуре общества). Русский циклизм явился продолжением идей космизма. Основы общей теории кризисов как неизбежной стадии в циклической динамике систем в природе и обществе заложил А.А. Богданов. Широко известно учение Н. Д. Кондратьева о больших циклах конъюнктуры, которое было распространено Й.Шумпетером и явилось основой для исследований долгосрочных циклов в экономике и общественной жизни. Появился ряд монографий, проводятся междисциплинарные дискуссии по проблемам теории циклов и кризисов, социогенетике и прогнозированию. Внутри самого естествознания укрепляются представления о необходимости соответствия научных концепций гармонии и красоте. Концепция устойчивого развития направлена на соотнесение и гармонизацию в единстве экологических, социальных и технологических программ развития. Она названа академиком Н.Н.Моисеевым *стратегией выживания человечества*.

1.2. Формирование критерия научности

Наука — исторически сложившаяся система познания объективных законов мира. Она нацелена на получение и систематизацию объективных знаний о действительности, на объяснение и

13

предсказание явлений и процессов на основе открываемых ею законов. Научное познание помимо описания выявляет причины явлений, пытается объяснить происходящее. Для него существенным было формирование критерия истинности и разграничение наук по предметам и методам исследования мира. Гармония и соразмерность, как и в жизни, важны в научных теориях. С Фалесом связывают первую постановку вопроса о первоначале всего и первые математические доказательства. Эти два достижения ориентировали развитие научного метода познания.

Пифагор видел гармонию в «математическом узоре», который лежит в основе совокупности всех явлений природы. Его идеи прослеживаются у Филолая, Гераклита, Евклида, Архимеда, Платона, Аристотеля. «Начала» Евклида заложили основы геометрии, все положения которой были обоснованы и взаимосвязаны. Евклид и Архимед выделяли математические закономерности, причем они интересовали их сами по себе.

Система доказательности и обоснованности знания стала складываться в математике еще в античные времена, в диалогах Платона арифметика есть чистое знание и центр всего космоса знаний. Впоследствии стало ясно, что математические закономерности отражают глубинную сущность законов природы, а не только внешнюю их сторону. Об этом писали Леонардо да Винчи, Р.Декарт, И.Кеплер, Г.Галилей, Х.Гюйгенс, И.Ньютон и другие. Структура наук формировалась постепенно.

У Платона «тот, кто не умеет правильно считать, никогда не станет мудрым», наука о числе — высшая мудрость, «все искусства совершенно исчезли бы, если бы было исключено искусство арифметики» («Послезаконие»). Арифметика — наука, ведущая к размышлению и познанию чистого бытия, искусство счета (логистика) отделено от абстрактной арифметики («Государство»). За ней в структуре знаний следуют геометрия, которая также «влечет к истине и воздействует на философскую мысль, стремя ее ввысь», стереометрия, «касающаяся измерений кубов и всего того, что имеет глубину», астрономия, изучающая «вращение тел»; завершает ряд математических наук учение о гармонии. Если астрономия — умозрительное изучение числовых соотношений в движении небесных светил, то гармония — умозрительное изучение числовых соотношений в музыкальных созвучиях. Это позволяет человеку «посредством только одного разума, минуя ощущения, устремляться к сущности любого предмета и не отступать, пока при помощи самого мышления не достигнет сущности блага. И он оказывается на самой вершине умопостигаемого». Это восхождение души есть освобождение от оков, поворот от теней к образу и свету, подъем из подземелья к Солнцу. Знание делится на практическое и познавательное, а последнее — на повелевающее и искусство

суждения. А арифме-

14

тика может применяться для измерения поверхностей, глубин и скоростей.

У Аристотеля «Первая философия» — это учение о божестве как неподвижном перводвигателе, бестелесной чистой форме. Далее следуют физические науки, так как их предметом является сущность, имеющая в себе начало движения и покоя. Математика не исследует бытие в движении и потому уступает физике, хотя более доказательна, абстрактна и истинна. В сочинении «О небе» Аристотель широко использует числовые соотношения. Арифметика выше геометрии, так как основана на меньшем числе начал. Все остальные представления о мире еще формировались путем догадок, рассуждений, наблюдений и сопоставлений. Оптику, гармонику и астрономию Аристотель причисляет к наиболее физическим, так как «они в известном отношении обратны геометрии. Ибо геометрия рассматривает физическую линию не как материалистическую, так как она не существует физически, а оптика — математическую линию как физическую» («Физика»). Его воззрения основаны на наблюдениях и соответствии здравому смыслу, поэтому больше относятся к натурфилософии, чем к физике.

Проблема несоизмеримости диагонали квадрата с его стороной, воспринимаемая пифагорейцами как «козни злых сил», привела Евдокса к разработке теории пропорций и приложению ее к геометрии. Он стал беспрестанно уменьшать остатки, строя доказательства путем исчерпывания. Так появились иррациональные числа, что заставило задуматься над основаниями математики и доказательствами. Аксиомы Евдокса вошли в «Начала» Евклида и работы Архимеда, продвинули логику Аристотеля и других учеников Платона; возросла роль чертежа и доказательств «от противного». И это была попытка единого толкования окружающей природы — натурфилософия, и, по современным воззрениям, она не была еще наукой. Постепенно сведения о явлениях становились более конкретными, описание природы вытеснялось *экспериментальным* изучением ее законов, выделились разные предметы познания и соответствующие им исходные понятия и методы.

Физика изучает наиболее простые и общие свойства материального мира. Ее законы являются обобщением многих специально поставленных опытов, они справедливы на Земле и в Космосе, отражая материальное единство мира. Возрождение Галилеем математического метода Архимеда означает переход к науке Нового времени, с XVII в. наступил период *аналитического* естествознания; природе стали задавать вопросы и пытались ответить на них с помощью специальных опытов, а полученные результаты записывались, обобщались и анализировались с помощью математики. Стройные естественно-научные теории сначала были созданы в механике, а затем в других областях физики. И экспери-

15

ментально-математическое естествознание надолго определило идеал и критерии научности. В физике переход к доказательности и обоснованности знания произошел в XVII в., в химии — в XVIII в., в биологии — в XIX в. и т.д.

Естествознание исследует органическую и неорганическую природу на Земле и во Вселенной. Сфера исследования включает объекты микро-, макро- и мегамиров. Специфика естествознания в том, что знание отличается высокой степенью *объективности*, постоянно совершенствуется и представляет собой наиболее достоверную часть всего знания человечества. Были открыты фундаментальные законы, объяснившие множество фактов и явлений; на основе этих законов были сформулированы принципы, которые составили фундаментальные теории различных дисциплин. Но менялось и отношение человека к процессу исследования природы, формировалась стратегия познания. Человек в XVII в. отделял себя от изучаемой природы, выделял повторяющиеся явления и объяснял их на основе наглядных представлений и однозначного соответствия результата действия причине, вызвавшей его (*принцип детерминизма*). Большое значение для формирования так называемой классической науки сыграли успехи метода Галилея — Ньютона, позволившего с большой точностью дать проверяемые предсказания. В арсенале знания к концу XIX в. были значительные достижения: в физике, кроме классической механики, — оптика, термодинамика, законы электричества и магнетизма и др.; в математике — аналитическая геометрия и математический анализ; в химии — учение о составе веществ, изучение основных свойств химических соединений, Периодическая система элементов, структурная химия и др.; в биологии — классификация и изучение основных свойств живых существ, теория клеточного строения, эволюционная теория Ч. Дарвина и др. Складывалось впечатление, что стройное здание науки близко к завершению, остаются некоторые «детали». Была уверенность в познаваемости мира «до конца», т.е. все расхождения теории с опытом могут быть преодолены уточнением либо эксперимента, либо теории. Наблюдатель находился вне исследуемых явлений, выводы соответствовали классической, булевой логике («или — или»). Методология классической науки предполагала мысленную операцию отстранения исследователя от исследуемой природы.

К началу XX в. в физике произошли изменения, кардинально расширившие представления о естественно-научной рациональности. Выяснилось, что операция устранения субъекта осуществима далеко не всегда и не для всех объектов познания. Квантовая гипотеза излучения, квантовая теория атома, теория броуновского движения изменили представления о воспроизводимости результатов исследования, роли измерительных приборов (и наблюдателя), *случайности* в исследовании природы. Сформировалась *не-*

16

классическая стратегия познания, в основе которой лежит признание случайности в качестве фундаментального свойства природы, а все выводы опираются на логику «дополнительности» («и — и») и уходят от привычного, наглядного. Принципиально дискретный взгляд на мир из области физики микромира постепенно распространился на другие области науки (и не только естествознания), а включенность наблюдателя (или прибора) в систему не нарушила объективности получаемого знания. Родился новый взгляд на мир в целом, и естествознание обогатило культуру человечества и самого человека.

В настоящее время наука переходит к новой стратегии познания, в так называемый *постнеклассический период*. Интегративный характер постнеклассической науки проявляется в создании общенаучных дисциплин и методов, появлении таких дисциплин, как теория систем, синергетика, системный и структурный подходы и т.д. Обнаружение принципиальной хаотичности и неопределенности ряда процессов и состояний привело к тому, что все большую роль, помимо динамических закономерностей, стали играть вероятностно-статистические законы. Формируются общенаучные методы, среди которых методу моделирования принадлежит особая роль.

Современная наука — целостный динамически организованный и саморазвивающийся организм. Она насчитывает около 15 тыс. научных дисциплин, число ученых превосходит 5 млн человек, а научная информация удваивается каждые 10—15 лет. С развитием методов исследования конкретных естественно-научных дисциплин фундаментальные науки — физика, химия, астрономия, биология — сформировались к середине XX в., стали «обрастать» смежными дисциплинами. Появились биохимия, геофизика, химическая физика, физическая химия, астрофизика, молекулярная биология, геохимия, астробиология, астронавтика и др.

Система наук многообразна и сложна. К *общественным* относят такие науки, как историю, археологию, экономику, статистику, демографию, историю государства и права, этнографию и др.; к *естественным* — конкретные научные дисциплины: механику, астрономию, физику, химию, геологию, географию, биологию, а также биохимию, биофизику, астрофизику, космологию, химическую физику, физическую химию, ботанику, зоологию, антропологию, генетику и др. Все активнее развиваются *технические науки*, нацеленные не на познание, а на преобразование мира. Появились теоретические прикладные науки: физика металлов, физика полупроводников, катализ, аэро- и гидродинамика, а также практические прикладные науки: металловедение, астронавтика, электроника, полупроводниковая и лазерная технология и др. Прикладные науки нацелены на разработку способов применения знаний, полученных в фундаментальных науках, для удов-

17

летворения жизни общества. Более 90 % всех важнейших достижений научно-технического уровня сделаны в XX в.

В средневековье политическая и духовная власть принадлежала религии, что сказалось на понимании истины: наука должна была объяснять и доказывать теологические положения. В эпоху Возрождения произошел резкий скачок в развитии культуры. «Коперниканская революция» ознаменовала начало современной науки. В ее основе — признание материального единства мира, единства законов на небе и на Земле. Это означало отказ от представлений Аристотеля, канонизированных Ватиканом, и возможность изучать явления на Земле, чтобы сделанные из опытов выводы и закономерности были справедливы вне лаборатории (даже в Космосе). Галилей начал ставить специальные опыты и обрабатывать их результаты математически — так в науку вошел эксперимент и математически сформулированный закон, создавалась современная научная методология. Математик и философ М. Клайн заключил: «Все, что планируется на основе развитой Ньютоном математической теории, действует безотказно. Сбои, если таковые случаются, обусловлены лишь несовершенством созданных человеком механизмов».

1.3. Методы естествознания, всеобщность его законов. Системный подход

Природа есть сложная система, сложный организм, где все связано со всем. По выражению современного философа К. Ясперса, «существуют отдельные науки, а не наука вообще как наука о действительном, однако каждая из них входит в мир беспредельный, но все-таки единый в калейдоскопе связей». Аналитический метод и выделение какой-то стороны предмета или явления — наиболее критикуемые стороны научного метода познания. Наука с самого начала стала отвлекаться от вопросов «почему?» и вопросов общего характера, занявшись исследованием «как все происходит?». Путь аналитического естествознания, заданный Ньютоном, превратил общие соображения в четко поставленную математическую задачу, и ученый, не вдаваясь в выяснение физической природы тяготения, решил ее разработанным им же математическим методом.

И. Ньютон пишет: «Причину же этих свойств силы тяжести я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным выше законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря...». На склоне лет он сказал своему племяннику: «Не знаю, кем я кажусь миру, но самого себя я вижу всего лишь мальчиком, играющим на берегу океана, который забавляется, выбирая

18

то обкатанный камешек, то красивую раковину, в то время как необъятный океан истины простирается передо мною, уходя в неведомые дали».

Научный метод

Научный метод независимо от конкретных приемов и способов исследования в разных научных дисциплинах отражает единство всех форм знаний об окружающем мире. Исторически сложились общие требования к последовательности действий в труде; с появлением потребности получения знаний возникла потребность в анализе и оценке разных методов — *методология*. Можно сказать, что конкретные научные методы отражают тактику исследований, а общенаучные — стратегию.

Теории — основная форма научного знания.

Теории — основная форма научного знания. Их разделяют на описательные, научные и дедуктивные. С содержательной стороны они состоят из эмпирического базиса и логического аппарата теории, а с формальной — это совокупность допущений, аксиом, постулатов, общих законов.

В описательных теориях

В **описательных теориях**, выделив группу явлений или объектов, формулируют общие закономерности на основе эмпирических данных. Эти теории носят качественный характер, так как не проводится логический анализ и корректность доказательств. Таковы первые теории в области электричества и магнетизма, физиологическая теория И.Павлова, эволюционная теория Ч.Дарвина, современные психологические теории и т.п. В **научных теориях** конструируют идеальный объект, замещающий реальный. Обычно они основаны на нескольких аксиомах, принимаемых без доказательств, из которых логически выводятся остальные положения. Часто к основным аксиомам добавляют гипотезы. Следствия теории проверяются экспериментом. Таковы физические теории, использующие логику и достаточно строгий математический аппарат. Третий тип — **дедуктивные теории**. Первая из них — «Начала» Евклида (сформулирована основная аксиома, потом к ней добавлены положения, логически выведенные из нее, и все доказательства проводятся на этой основе). В таких теориях разработан специальный формализованный язык, все термины которого подвергаются интерпретации.

Понятия и термины

Понятия и термины теории формируются в процессах абстрагирования и идеализации, используемых во всех теориях. Понятия отражают существенную сторону явлений, появляющуюся при обобщении исследования. При этом из целого объекта или явления выделяется только некоторая сторона его, понятие может быть сформировано на основе опыта или теории. Так, понятию «температура» может быть дано операционное определение (показатель степени нагретости тела в определенной шкале термометра), а с позиций молекулярно-кинетической теории температура — это величина, пропорциональная средней кинетической энергии движения частиц, составляющих тело.

19

При абстрагировании игнорируют свойства объекта, которые считают несущественными. Таковы модели точки, прямой линии, окружности, плоскости, материальной точки и т.д. Реальные объекты в каких-то задачах могут быть заменены этими абстракциями. Землю при движении вокруг Солнца можно считать материальной точкой, но нельзя — при движении по ее поверхности.

При идеализации выделяют какое-то свойство или отношение, и возникающий в результате идеальный объект обладает только этим свойством или отношением. Наука выделяет в реальной действительности общие закономерности, которые существенны и повторяются в различных предметах, поэтому приходится идти на отвлечения от реальных объектов. Таковы популярные модели «абсолютно черного тела», «идеального газа», «сплошной среды» и т.д.

Но при применении теории необходимо вновь сопоставить полученные и использованные идеальные и абстрактные модели с реальностью, т. е. исключить абстракции. Поэтому важны выбор абстракций в соответствии с их адекватностью данной теории и последующее исключение их.

Наблюдения

Наблюдения еще не связаны с какой-либо теорией, но формулировка вопросов вызвана какой-то проблемной ситуацией. Наблюдение предполагает наличие определенной программы исследования, какой-то пробной гипотезы, подвергаемой анализу и проверке. На наблюдениях и аналогиях строилась натурфилософия. Наблюдения и ныне — начальный источник информации, целенаправленный процесс восприятия предметов или явлений. Они используются там, где нельзя поставить прямой эксперимент, например в вулканологии или космологии. Каждая наука использует свои методы познания мира в зависимости от характера решаемых задач. Сначала на опытной стадии за систематическими наблюдениями следует специально поставленный эксперимент, в котором производятся измерения. Сравнение и измерение — частные случаи наблюдения.

Как метод научного познания анализ

Как метод **научного познания анализ** — одна из начальных стадий исследования, когда от цельного описания объекта переходят к его строению, составу, признакам и свойствам; он основан на мысленном или реальном расчленении предмета на части. **Синтез** заключается в соединении различных элементов предмета в

единое целое и обобщении выделенных и изученных особенностей объекта; результаты синтеза входят в теорию объекта, определяющую пути дальнейших исследований. Индукция состоит в формулировании логического умозаключения на основе обобщений данных эксперимента и наблюдений. Эти обобщения рассматриваются как эмпирические законы. Логические рассуждения идут от частного к общему, обеспечивая лучшее осмысление и переход на более общий уровень рассмотрения проблемы.

20

Индуктивный метод используют при решении задач, связанных с систематизацией, классификацией, научным обобщением. **Дедукция** — метод познания, состоящий в переходе от некоторых общих положений к частным результатам. Этим методом выявляют конкретное содержание выдвинутых предположений или гипотез. Дедуктивный метод лежит в основе современных методологий (например, системного анализа). Гипотеза — предположение или предсказание, выдвигаемое для разрешения неопределенной ситуации. Она должна объяснить или систематизировать некоторые факты, относящиеся к данной области знания или находящиеся за ее пределами, но не должна противоречить уже существующим. С гипотезой имеет сходство аналогия.

При количественном сопоставлении исследуемых свойств, параметров объектов или явлений говорят о методе сравнения. В некотором смысле метод сравнения противоположен методу аналогии, поскольку выделяет отличия. Метод сравнения составляет основу любых **измерений**, т.е. основу всех экспериментальных исследований и науки в целом.

Гипотеза должна быть подтверждена или опровергнута. Процесс установления истинности гипотезы на опыте называют *верификацией*. Если опыт не опровергает гипотезу, должна быть выдвинута альтернативная гипотеза. Так, гипотеза М.Планка о квантовом характере испускания света привела к созданию квантовой механики; гипотезы де Бройля (корпускулярно-волновой дуализм материи) и Н. Бора (модель строения атома) обобщали многие факты и потом были подтверждены. Гипотеза Г.Гельмгольца о дальнодействующем характере электрических явлений была опровергнута экспериментом Герца, обнаружившим ток смещения, отделившийся от источника тока. Это подтвердило введение Дж. Максвеллом тока смещения в уравнения поля из соображений симметрии.

Эксперимент

Эксперимент, поставленный вслед за наблюдениями, уже выделяет интересующее явление среди других; предполагает опытное определение параметров исследуемых явлений или объектов. Галилей проверял гипотезы экспериментом, производил измерения и обрабатывал результаты математически. Измерения позволяют поставить в соответствие физическим величинам некоторые числа. С той поры, названной Новым временем, измерения проводятся более точно, их результаты обрабатываются специальными вычислительными приемами, да и сами эксперименты усложнились технически. И многие науки изменили свой облик.

Из предварительной гипотезы путем логики выводят следствия, которые и проверяют с помощью наблюдений и экспериментов. Но все измерения проводятся с определенной точностью, и, как выяснилось в XX в. при изучении микромира, не всегда ее можно повысить и не всегда условия эксперимента можно точно повто-

21

рить. Меняется и понятие средней величины. Если над телами сложно или невозможно провести эксперимент, все чаще пользуются *косвенными экспериментами*.

Создание моделей

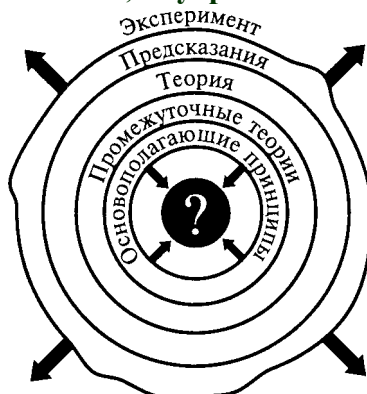
Создание моделей — основа многих научных концепций, адекватность моделей подтверждается опытом или практикой. Моделирование обычно упрощает изучаемое природное явление, касаясь лишь некоторых его сторон. Иначе, по мнению одного из основоположников кибернетики, английского математика А. Тьюринга, сложность изучения идентичной объекту модели будет соответствовать сложности самого объекта исследования. Физическое моделирование опыта широко применяют в гидро- и аэродинамике, где разработаны соотношения подобия для тех или иных потоков. Помимо модельного эксперимента в этих случаях проводят мысленный эксперимент. В таких экспериментах оттачивается представление об идеальной модели явления; они имели место в рассуждениях Г. Галилея, И. Ньютона, А. Эйнштейна. Распространено и математическое моделирование, предполагающее формирование систем уравнений, которые описывают исследуемое природное явление, и их решение при различных начальных или граничных условиях. В последнее время в эти уравнения вводят вероятностные оценки некоторых параметров, изменяемых случайным образом. Такие уравнения решают с помощью компьютерной техники. Иногда данные методы называют вычислительным экспериментом или имитационным математическим моделированием.

Обращение к теории

Обращение к теории как к более высокому уровню научного исследования завершает научные исследования. На этой стадии прибегают к формированию понятий и абстракций, строят теории и новые гипотезы, и, проверяя экспериментально выводы из них, приходят к формулировке законов природы. Но не всякое подтверждение гипотезы опытом подтверждает ее истинность. Поэтому необходимо найти много

следствий гипотезы или теории, которые подтверждаются опытом (рис. 1.1). В естествознании результаты эксперимента — решающий аргумент признания теории. В основе методов естествознания — единство эмпирической и теоретической сторон. Они взаимно связаны и взаимообусловлены. Методы разделяют на три группы:

Рис. 1.1. Модель научной теории в виде многослойной оболочки (наружная — непрерывно расширяющаяся сфера предсказаний, внутренняя — фундаментальные принципы)



22

общие, касающиеся любой науки, — фактически общеполитические методы познания природы. Эти методы могут связывать все стороны процесса познания (например, единство логического и исторического или восхождения от абстрактного к конкретному);

особенные, связанные лишь с какой-то одной стороной изучаемого предмета (например, анализ, синтез, дедукция, индукция, измерение, сравнение, эксперимент);

частные, действующие в определенной области знаний. Но в процессе развития науки научные методы могут переходить из одной группы методов в другую. Например, многие частные методы физики перешли в другие области знаний и привели к созданию биофизики, физической химии, геофизики, астрофизики и др. Многие методы химии используют как в биологии, так и в физике. Законы термодинамики дали основу понимания хода химических реакций. Впоследствии термодинамика охватила теорию упругости, учение об электричестве и магнетизме, возникла теория электролитической диссоциации. Создание молекулярной биологии, изучающей проявление жизни на молекулярном уровне, отражает понимание того, что многие важные процессы, считавшиеся монополией биологии (дыхание, ощущение, раздражение), являются химическими процессами. Химическую природу имеет и процесс деления клетки. Но жизнь не сводится к физико-химическим процессам. Физики расшифровали рентгенограммы молекулы ДНК и сумели проникнуть в самые сложные тайны жизни. **Статистические методы**, позволяющие получить средние значения измеряемых величин для общей характеристики изучаемых явлений, получили широкое распространение. Изобретение Ньютоном и Лейбницем дифференциального и интегрального исчисления, развитие методов статистической обработки результатов опыта способствовали использованию математики во всех областях естествознания. Была «непостижима эффективность применения математики», но по ее законам были «на кончике пера» открыты планеты Нептун и Плутон, ток смещения в уравнениях Максвелла, электромагнитная природа света, нестационарность модели Вселенной А. Фридмана, обнаружено красное смещение в спектрах далеких галактик и многое другое. Природа таких математических предсказаний реальности вызывает многочисленные философские дискуссии.

Развитие математики и появление ЭВМ позволили решать невероятно сложные нелинейные уравнения теории с огромным числом взаимосвязанных параметров. Такие уравнения описывают сложные системы, более реальные, чем идеальные модели классической науки. Созданы совершенно новые разделы математики — кибернетика, теория катастроф и др. И от статических моделей систем, находящихся почти в равновесии, переходят к

23

моделированию сложных систем в далеких от равновесия состояниях. Широко используют понятия случайности, вероятности, выбора варианта развития, эволюции, скачкообразных переходов. Необратимость процессов, существование обратных связей и нелинейность стали главными доминантами современного описания процессов.

Системный подход

Системный подход используют, когда каждое явление или предмет рассматривается как часть целостного организма. Взаимодействие частей друг с другом придает системе свойства, которых нет у ее отдельных элементов. Это свойство систем называют эмерджентностью, и оно фактически является определяющим для системы. Все компоненты системы находятся в тесной взаимосвязи. Совокупность этих взаимосвязей и взаимодействий, обеспечивающую возникновение целостных свойств всей сложной системы, называют ее *структурой*. Выделение системы из других, с которыми она взаимодействует непосредственно, приводит к

понятию окружающей среды. Второе важное свойство систем — иерархичность любого системного образования, т.е. существование различных взаимосвязанных структурных уровней рассмотрения систем. Строение системы определяется ее компонентами — подсистемами и элементами. Так, живой организм состоит из пищеварительной, нервной, дыхательной и других подсистем; подсистемы — из органов, органы — из тканей, ткани — из клеток, клетки — из молекул. По подобному иерархическому принципу построены многие системы.

Третьим важнейшим свойством систем является их **открытость**, т.е. степень связанности с внешней средой. Все реальные системы в природе являются открытыми, т.е. взаимодействующими с окружающей средой путем обмена веществом, энергией или информацией. Последний обмен имеет место в живых, социально-экономических и других системах. При полном отсутствии связей с окружающей средой говорят о том, что система *изолирована*, и никакое взаимодействие с ней невозможно в принципе. Поскольку это представление абстрактно, можно говорить лишь о степени изолированности системы от окружающей среды. Если внешний мир влияет на систему, а система не откликается на внешнее воздействие, то ее называют *закрытой*. Полная определенность и предсказуемость описания и поведения систем характеризуется *детерминированностью*. Это свойство является некоей удобной при расчетах идеализацией, поскольку все явления обладают стохастичностью (вероятностным характером протекающих процессов).

Стационарность — следующее важное свойство систем. Стационарны системы, параметры которых не меняются во времени. Но таких систем в природе тоже не бывает (за исключением внутренних областей звезд типа черных дыр), поэтому определяют интервал времени, в течение которого система может

24

считаться стационарной. Большинство систем являются нестационарными.

Устойчивость отражает свойство системы возвращаться в равновесное состояние после прекращения внешних воздействий. Это свойство может исчезать при изменении внешних условий или самой системы. Поэтому приобрело большое значение определение границ устойчивости систем. Вблизи этих границ система находится в неравновесном состоянии, что может служить одним из условий возникновения в ней перестройки и появления самоорганизации и являться, в свою очередь, основой для системной эволюции.

При различных нестационарных процессах может проявляться другое свойство систем — **колебательность**, или способность систем к периодическому изменению своих параметров при приближении к новому состоянию. В некотором роде это свойство связано с консерватизмом систем. Свойство систем сопротивляться воздействию окружающей среды характеризуется **инерционностью**. Инерционность отражает консерватизм природы и присуща всем системам, хотя и в разной степени. Мерой инерционности в механике служит масса, в электродинамике — индуктивность, в биологии — наследственность. Эти последние два свойства выделяются как динамические среди прочих общесистемных свойств.

Фундаментальная роль системного подхода заключается в его междисциплинарности, с его помощью единство знания достигается наиболее полно. Системный подход дает возможность рассматривать проблему как бы сверху, с более высокого уровня системной иерархии; решать сложную проблему как систему в целом, во взаимосвязи ее с другими проблемами и большим числом внешних и внутренних связей. Это позволяет выбрать наиболее оптимальный путь решения проблемы, реализуя общенаучный метод дедукции, — от общего рассмотрения сложной проблемы к частному оптимальному ее решению. Возможность использовать общий подход к процессам управления в системах различной природы ненова, этим занимается кибернетика. В ней создан мощный аппарат количественного описания процессов, основанный на методах теории информации, теории динамических систем, теории алгоритмов и теории вероятностей. Рассмотрение управляемых систем в развитии изменило подходы к их изучению. Управляющие воздействия могут переводить управляемую систему в одно из возможных состояний, появляется выбор возможного изменения, а потенциальной возможностью к управлению обладают организованные системы. Так, на первый план вышли проблемы устойчивости систем, наличие прямых и обратных связей. О важности проблем, решаемых методами системного анализа, свидетельствует факт создания в Российской академии наук специаль-

25

ного Института системного анализа. Использование системного подхода не только в естествознании, но и в общественных науках имеет большое мировоззренческое значение.

«Попытка понять Вселенную — одна из вещей, которые приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии», — писал американский физик, лауреат Нобелевской премии Стивен Вайнберг. Потому проблемы мироздания так притягивают к себе, заставляя разбираться в огромном числе разных фактов, наблюдений и связывать их воедино. Фундаментальная наука влечет людей по разным причинам. Это и наслаждение удовлетворением собственного любопытства, и осознание своего вклада в человеческую культуру, и священное чувство приобщения к великому наследию многих поколений великих ученых.

Культурная ценность науки — основной движущий мотив труда ученых. Потребность создать гармоничную картину мира и осознать свое место в нем имеет всеобщий универсальный характер. Ради этой цели общество выбрало путь рационального объяснения природы. Сам процесс научной работы, изучение экзотических и казалось бы, далеких от нас областей микро- и макромира отражают рационалистический

подход к восприятию мира, присущий обществу. Открываются удивительные взаимосвязи: в далеком космосе найдены органические молекулы, а изучение нейтринных пучков, получаемых на ускорителях, меняет взгляды на эволюцию Вселенной. Они показывают единство мира природы. Эти представления являются общими для разных культур, основы их идут от философов Древней Греции — Природа экономна, в ней действуют единые законы. Представление об единстве науки способствовало укреплению веры в единство человечества.

Понимания Вселенной мы, возможно, могли бы достичь, если бы сумели свести наблюдаемые факты к простейшим понятиям, пользуясь небольшим числом фундаментальных частиц и фундаментальных взаимодействий, в которые они могли бы вступать.

1.4. Понятия «научная программа» и «научная картина мира»

Понятие «научная программа» сформировалось в методологии науки. Научная программа (НП), включающая в себя систему единых принципов, претендует на всеобщий охват и объяснение всех явлений. В отличие от философской системы она определяет не только характеристику предмета исследования, но и возможность методов проверки заявленных принципов, без чего они не станут теорией. Во всякой теории много допущений, принимаемых на веру, причем их изменения могут вызвать пересмотр или даже

26

отмену теории. Ф. Энгельс писал: «...философия каждой эпохи располагает в качестве предпосылки определенным мыслительным материалом, который передан ей предшественниками». Научные программы связывают научные картины мира (НКМ) с умонастроениями в обществе, задают идеал научного объяснения и организации знания, положения, которые считают доказанными или достоверными. Связь эволюции науки с материальной и духовной культурой общества отражена в том, что научные революции не вытекали из логики развития науки. Изменение НКМ и НП перестраивают весь стиль научного мышления и вызывают изменения в характере научных теорий. Например, первая теория эволюции была выдвинута Ж. Б. Ламарком за 50 лет до Дарвина, но в науке не укрепилась и не потому, что была слабо доказательна. Причина — в неподготовленности умов к ее восприятию.

Сложившиеся в науке представления оказывают через мировоззрение влияние на жизнь общества. Исследование трансформации НП при смене культур важно для развития и общества, и науки.

Первые научные программы сформировались в Древней Греции с VI по III в. до н. э. и надолго определили развитие науки. К ним относятся математическая, континуальная и атомистическая НП. Каждая программа формировалась в несколько этапов.

Математическая программа выросла из философии Пифагора и Платона, континуальная началась с Аристотеля, с его физической школы перипатетиков, и просуществовала до науки Нового времени, т.е. почти 20 веков. Атомистическая программа, идущая от представлений Демокрита и Эпикура, стала активно развиваться после XVII в. Но ранние пифагорейские представления отличны от программы Платона. Данные изменения связаны с развитием общества за 300 лет. За это время произошел перелом в мышлении, связанный с философией эгейской школы, когда возникли первые (из известных нам) попытки критики оснований знания. Изменения в социальной жизни Эллады существенно повлияли на общемировоззренческие ориентиры ученого, на его понимание природы и места человека в ней, а отсюда и на научное мышление, на методы исследований и формирование идеалов и норм научного познания. Этический индивидуализм («индивидуум» — латинский перевод греческого «атом») и естественно-научный атомизм в XVII — XVIII вв. воспринимались как две стороны одного мировосприятия: самостоятельные индивиды (атомы, корпускулы) управляются механическим образом и регулируются жестким внешним законом. И механическая картина мира с законом тяготения Ньютона рассматривалась экономистами как природное обоснование экономических учений. Так, Адам Смит считал, что частнопредпринимательский интерес соответствует моральной гравитации.

Поскольку материальный мир един и подчиняется простым законам, не имеет цели развития, не способен ставить человеку цели, человек обретает свободу выбора цели сам. И наибольшей ценностью данной программы являлось ее нравственное значение, а вовсе не эффективность решения научных или практических задач. В мире атомистической

27

программы человек мог свободно действовать, отвечая за последствия своих деяний, он стал полновластным хозяином вещей. Идея механистичности природы связана у Р. Бойля, Р. Декарта и других мыслителей и ученых XVII в. с признанием уникальности человека и ответственности его как единственного сознательного начала в природе. Именно человеку вменена «обязанность» заботы о ее спасении и дано право познавать природу и господствовать над нею. Эта позиция отвечала потребностям материального производства периода раннего капитализма, она формировала иное поведение и обосновывала его.

Научная картина мира (НКМ)

Научная картина мира (НКМ) — общая система представлений и понятий в процессе формирования естественно-научных теорий. Наука античности особо ценила математику, но считала ее применимой только к «идеальным» небесным сферам, а для описания земных явлений использовала качественные

«правдоподобные» описания. Обращение к опыту подразумевало и иное, более активное отношение к природе. Вселенная классической науки стала объединяться едиными законами движения, к механике сводились все процессы в мире, из научного мировоззрения были изгнаны «цели» и «целеполагания», понятия механики приобрели общезначимость.

Переход к экспериментальному естествознанию и математическая обработка результатов экспериментов позволили Г.Галилею открыть законы падения тел, отличные от аристотелевых. Опора на полученные из наблюдений результаты изменила представления о движении и на небе — И.Кеплер открыл новые законы движения планет. Создание математического анализа позволило Ньютону сформулировать законы механики и закон всемирного тяготения. Он писал: «Как в математике, так и в натуральной философии исследование трудных предметов методом анализа всегда должно предшествовать методу соединения. Такой анализ состоит в производстве опытов и наблюдений, извлечении общих заключений из них посредством индукции и недопущении иных возражений против заключений, кроме полученных из опыта или других достоверных истин. Ибо гипотезы не должны рассматриваться в экспериментальной философии... Путем такого анализа мы можем переходить от соединений к инградиентам, от движений — к силам, их производящим, и вообще от действий — к их причинам, от частных причин — к более общим, пока аргумент не закончится наиболее общей причиной». И механика стала доминантой естествознания.

Механическая картина мира (МКМ)

Механическая картина мира (МКМ) создана трудами Галилея, Кеплера, Гюйгенса, Ньютона. Главной задачей Ньютона и был «синтез системы мира». Положенная в основу его труда механика давала научное объяснение природы. Для Ньютона было важно не только доказать, как Гюйгенс и Кеплер, правдоподобность идей Коперника на основе наблюдений, но и математически обосновать

28

предпосылки всей системы, что делало ее «абсолютно достоверной». В «Математических началах натуральной философии», как видно уже из названия, Ньютон ориентировался на аксиоматический метод Евклида, только у него вместо аксиом — принципы, управляющие явлениями природы. Ньютон уходил от причин тяготения, от гипотез «о скрытых качествах», заменяя эти натурфилософские размышления результатами эксперимента. И описание движения было сведено к математическому: знание координат и скоростей тел в начальный момент по уравнениям движения определяло динамику в последующие моменты. Три закона механики Ньютона управляют движениями объектов, заполняющих пространственно-временную сцену.

Пространство трехмерно и евклидово, и траектории тел также подчиняются геометрии Евклида. Время и пространство у Ньютона — абсолютны, не оказывают влияния на тела, размещенные в них. Сила тяготения распространяется в пространстве с бесконечной скоростью и не меняет ход времени. Можно было проанализировать прошлое и предсказать будущее динамическое состояние системы, так как замена знака времени в уравнениях Ньютона не оказывает влияния на движение. Уравнения динамики Ньютона линейны, действие равно противодействию; интенсивность следствия определяется интенсивностью причины. Поэтому все в мире предопределено, строго детерминировано. Когда Ньютон сформулировал свою первую в истории научную картину мира, этого термина еще не существовало, но он имел его в виду, называя свой труд «натуральной философией». Это была первая научная теория в современном смысле, поэтому 1687 г. часто называют годом рождения современного естествознания.

В рамках МКМ построена космогония Солнечной системы, открыты законы взаимодействия электрических зарядов и взаимодействия точечных магнитных полюсов. П.Лаплас строил небесную механику и «молекулярную» механику, но при построении последней ему пришлось вводить гипотезы, силы притяжения и отталкивания. Такая универсальная механика присутствовала в курсе физики, написанном П.Лапласом и Ж.Б.Био, продолжал ее строить и Ампер. М.В.Ломоносов с помощью кинетической теории объяснял упругие свойства газов. К научному обоснованию теории стоимости Адам Смит пришел под влиянием идей Ньютона. В течение XVIII в. механика Ньютона была приведена в стройную систему, были разработаны методы вычисления (строгие и приближенные) задач движения. Л.Эйлер, Ж.Даламбер, Ж.Л.Лагранж сделали механику аналитической (1788), обладающей строгостью математического анализа. Понятие МКМ существенно расширилось. Закон сохранения и превращения энергии вышел далеко за пределы механики. Лаплас и Лавуазье считали, что теория теплоты должна строиться на принципе сохранения «живых сил».

29

Концепция Лапласа о полной детерминированности явлений природы — основа мировоззрения многих естествоиспытателей — вызвала впоследствии критику. По мнению Герца, принципы механики дают «простейшую картину» мира. Тенденция свести все виды движения к механическому стала называться *механицизмом* и привела к метафизическому мышлению.

Электромагнитная картина мира (ЭКМ)

Электромагнитная картина мира (ЭКМ) основана на идее динамического атомизма, континуальном понимании материи и связанном с ним понятии *близкодействия*, которое внес М. Фарадей. Уравнения Дж.

Максвелла отразили эти идеи и привели к понятию поля без построения механических корпускулярных моделей. Попытку соединить идеи поля и частиц-электронов предпринял Х.А.Лоренц, но возникла проблема увеличения эфира быстро движущимися частицами. Эта проблема была решена только созданием специальной и общей теорий относительности (СТО и ОТО). Ожидали, что всеобщий охват мира природы способна дать электродинамическая картина мира, соединявшая СТО и ОТО с теорией Максвелла и механикой. Свойства пространства-времени начали зависеть от распределения и движения масс, т. е. стали относительными, понятие поля — универсальным, структуру поля стали отождествлять со структурой Вселенной. На основании понятия поля старались единообразно описать все взаимодействия в природе. Сочетанием непрерывности и дискретности отличалась модель атома Бора (1913).

Квантово-полевая картина мира (КПКМ)

Квантово-полевая картина мира (КПКМ) отразила открытия, связанные со строением вещества и взаимосвязью вещества и энергии. Изменились представления о причинности, роли наблюдателя, самой материи, времени и пространстве. Во Вселенной, подчиненной законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и его структура должны флуктуировать, так как квантовый мир никогда не находится в покое. Поэтому понятия прошлого и будущего, последовательность событий в таком мире тоже должны быть иными. Пока обнаружены не все изменения, так как квантовые эффекты проявляются в исключительно малых масштабах. Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику, и хотя такой синтез пока осуществить не удалось, на этом пути было открыто много нового и интересного.

Основная цель картин мира — объяснение и истолкование фактов и теорий, тогда как одной из целей теорий является описание опытных фактов. Планк считал, что НКМ «служит лишь средством связи между реальным миром и чувственными восприятиями естествоиспытателя», большое значение ей придавали А. Эйнштейн, Д. И. Менделеев, В. И. Вернадский и другие ученые. Более широко НКМ понимали как мирозерцание. В этом случае НКМ отождествляли с философскими учениями о мире в целом. До середины

30

XX в. под картиной мира понималось представление о природе в целом, составленное на основании достижений физики.

Современная, эволюционная картина мира

Современная, эволюционная картина мира отражает появление междисциплинарных подходов и технические возможности описания состояний и движений сложных систем, позволившие рассматривать единообразно явления живой и неживой природы. Синергетический подход ориентируется на исследование процессов изменения и развития. Принцип самоорганизации позволил изучать процессы возникновения и формирования новых, более сложно организованных систем. Современная картина мира включает естественно-научное и гуманитарное знание.

1.5. Математическая научная программа в развитии

Математическая программа, выросшая из философии Пифагора и Платона, начала развиваться уже в античные времена. В основе программы лежит представление о Космосе как упорядоченном выражении начальных сущностей, которые могут быть разными. Для Пифагора это были числа.

Арифметика трактовалась как центральное ядро всего Космоса в раннем пифагореизме, а геометрические задачи — как задачи арифметики целых, рациональных чисел, геометрические величины — как соизмеримые. Как заметил Ван-дер-Варден, «логическая строгость не позволяла им допускать даже дробей, и они заменяли их отношением целых чисел». Постепенно эти представления привели к возвышению математики как науки высшего ранга. Поздний пифагорец, Архит, писал: «Математики прекрасно установили точное познание, и потому вполне естественно, что они правильно мыслят о каждой вещи, какова она в своих свойствах... Они передали нам ясное и точное познание о скорости (движении) звезд, об их восхождениях и захождениях, а также о геометрии, о числах, о сфере и в особенности о музыке». Картина мира гармонична: протяженные тела подчинены геометрии, небесные тела — арифметике, построение человеческого тела — канону Поликлета.

Переход от наглядного знания к абстрактным принципам, вводимым мышлением, связывают с Пифагором. Софисты и элеаты, разработавшие системы доказательств, стали задумываться над проблемами отражения мира в сознании, так как ум человека влияет на его представление о мире. Платон отделил мир вещей от мира идей — мир вещей способен только подражать миру идей, построенному иерархически упорядоченно. Он утверждал: «Необходимо класть в основу всего число». Мир идей создается на основе математических закономерностей по божественному плану, и по этому пути математического знания об идеальном мире пойдет наука. Открытие несоизмеримости стороны квадрата и его Диагонали, иррациональности чисел нанесло серьезный удар не

31

только античной математике, но и космологии, теории музыки и учению о симметрии живого тела.

Математики стали задумываться над основаниями своей теории. Ее основой выбрали *геометрию*, сумевшую представить отношения, невыразимые с помощью арифметических чисел и отношений. Геометрия

Платона — «наука о том, как выразить на плоскости числа, по природе своей неподобные. Кто умеет соображать, тому ясно, что речь идет здесь о божественном, а не о человеческом чуде». Евдокс сформулировал *теорию пропорций* и ее приложения к геометрии. Он пришел к изучению сложных форм несоизмеримости с помощью беспредельного уменьшения остатков. Как позже писал Евклид: «Новое, более широкое понимание пропорций означало, что здесь, по сути дела, закладываются новые основания математики, новые представления об ее исходных понятиях, где иррациональные величины уже охвачены ими». Геометрия Евклида определила во многом структуру всей науки. Исходные понятия — точка, прямая, плоскость, на них построены «идеальные объекты второго уровня» — геометрические фигуры. При этом исходные понятия задаются системой аксиом.

Галилей и Ньютон создавали *классическую физику* по образцу «Начал» Евклида. Они сохранили системность и иерархичность. Частицы и силы — «первичные идеальные объекты», заданные в рамках определенного раздела науки. С XVII в. утвердился взгляд на научность (достоверность, истинность) знания как на степень его математизации. «Книга природы написана на языке математики», — считал Галилей. Математический анализ, развитие статистических методов анализа, связанных с познанием вероятностного характера протекания природных процессов, способствовали проникновению методов математики в другие естественные науки. И. Кант писал: «В любом частном учении о природе можно найти науки в собственном смысле лишь столько, сколько в ней имеется математики». Уравнения Максвелла оказались «умнее автора», показав, что свет есть волна электромагнитная. Специальная и общая теории относительности Эйнштейна опираются на новое представление о пространстве и времени. Продолжением их являются многочисленные программы «геометризации» различных физических полей по образцу гравитационного, по созданию многомерных пространств, в связи с чем появляются и различные обобщения римановой геометрии.

Главное достоинство математики в том, что она может служить как языком естествознания, так и источником моделей природных процессов. Хотя модели несколько односторонни и упрощены, они способны отразить суть объекта. Одна и та же модель может успешно применяться в разных предметных областях, и потому ее эвристические возможности возрастают. А в чем «непостижимая эффективность математики» в естественных науках —

32

вопрос дискуссионный. Использование ЭВМ для облегчения умственного труда подняло метод моделирования на уровень наблюдения и эксперимента как основных средств познания. Среди всех преобразователей информации (зеркало, фотоаппарат, поэтический текст) ЭВМ при работе с любыми входными воздействиями перед совершением операции приводит их к «одному знаменателю», представляя их в виде конечности последовательности цифр — информационной модели. Появились возможности оптимизировать сложные системы и уточнять цели и средства реконструкции действительности. Кибернетика дает новое представление о мире, основанное на связи, управлении, информации, вероятности, организованности, целесообразности. Вихрь компьютеризации захватывает все новые территории, но может ли компьютеризация биологии, к примеру, сделать ее дедуктивной наукой (наподобие физики)? Или лишь увеличит информационный шум?

1.6. Понятия «научная парадигма» и «научная революция»

Научные парадигмы

Научные парадигмы — это совокупность предпосылок, определяющих данное конкретное исследование, признанных на данном этапе развития науки и связанных с общефилософской направленностью. Понятие парадигмы появилось в работе Т. Куна «Структура научных революций». В переводе оно означает «образец», совокупность признанных всеми научных достижений, определяющих в данную эпоху модель постановки научных проблем и их решение. Это — образец создания новых теорий в соответствии с принятыми в данное время. В рамках парадигм формулируются общие базисные положения, используемые в теории, задаются идеалы объяснения и организации научного знания. Работа в рамках парадигмы способствует уточнению понятий, количественных данных, совершенствованию эксперимента, позволяет выделить явления или факты, которые не укладываются в данную парадигму и могут послужить основой для новой.

Задачи ученого: наблюдение, фиксация сведений о явлениях или объектах, измерение или сравнение параметров явлений с другими, постановка экспериментов, формализация результатов до создания соответствующей теории. Ученый собирает новую конкретную информацию, перерабатывает, рационализировать и выдает в виде законов и формул, и это не связано с его политическими или философскими взглядами. Наука решает конкретные проблемы, т.е. претендует на частное познание мира; результаты науки требуют экспериментальной проверки или подвержены строгому логическому выводу. Научные истины общезначимы, не зависят от интересов определенных слоев общества. Но парадигмы функционируют в рамках научных программ, а научные программы —

33

в рамках культурно-исторического целого. И это культурно-историческое целое определяет ценность той или иной проблемы, способ ее решения, позицию государства и общества по отношению к запросам ученых.

Научное знание постоянно изменяется по своему содержанию и объему, обнаруживаются новые факты, рождаются новые гипотезы, создаются новые теории, которые приходят на смену старым. Происходит научная революция (НР). Существует несколько моделей развития науки:

- история науки: поступательный, кумулятивный, прогрессивный процесс;
- история науки как развитие через научные революции;
- история науки как совокупность частных ситуаций.

Первая модель соответствует процессу накопления знаний, когда предшествующее состояние науки подготавливает последующее; идеи, не соответствующие основным представлениям, считаются ошибочными. Эта модель была тесно связана с позитивизмом, с работами Э.Маха и П.Дюгема и некоторое время была ведущей.

Вторая модель основана на идее абсолютной прерывности развития науки, т.е. после НР новая теория принципиально отличается от старой и развитие может пойти совсем в ином направлении. Т. Кун отметил, что гуманитарии спорят больше по фундаментальным проблемам, а естественники обсуждают их столь много только в кризисные моменты в своих науках, а в остальное время они спокойно работают в рамках, ограниченных фундаментальными законами, и не раскачивают фундамент науки. Ученые, работающие в одной парадигме, опираются на одни и те же правила и стандарты, тем самым наука — есть комплекс знаний соответствующей эпохи. Парадигму, по его словам, составляют «признанные всеми научные достижения, которые в течение определенного времени дают модель постановки проблем и их решений научному сообществу». Это содержание попадает в учебники, проникает в массовое сознание. Цель нормального развития науки — увязать новые факты и их объяснение с парадигмой. Парадигма обуславливает постановку новых опытов, выяснение и уточнение значений конкретных величин, установление конкретных законов. Наука становится более точной, накапливается новая подробная информация, и только выдающийся ученый может распознать какие-то аномалии. Кун и назвал смену парадигм научной революцией.

Пример — переход от представлений мира по Аристотелю к представлениям Галилея — Ньютона. Этот скачкообразный переход непредсказуем и неуправляем, рациональная логика не может определить, по какому пути будет далее развиваться наука и когда свершится переход в новое мировоззрение. В книге «Структура научных революций» Т. Кун

34

пишет: «Приходится часто слышать, что сменяющие друг друга теории все более приближаются к истине, все лучше ее аппроксимируют... У меня нет сомнений в том, что ньютоновская механика усовершенствовала аристотелеву, а эйнштейновская — ньютонову как средство решения конкретных задач. Однако я не могу усмотреть в их чередовании никакого последовательного направления в развитии учения о бытии. Наоборот, в некоторых, хотя, конечно, не во всех, отношениях общая теория относительности Эйнштейна ближе к теории Аристотеля, чем любая из них к теории Ньютона».

Третья модель развития науки была предложена британским философом и историком науки И.Лакатосом. Научные программы (НП) имеют некоторую структуру. Неопровержимые положения — «ядро» НП; оно окружено «защитным поясом» из гипотез и допущений, которые позволяют при некотором несоответствии опытных данных теориям из «ядра» сделать ряд предположений, объясняющих это несоответствие, а не подвергать сомнению основные теории. Это «негативная эвристика». Есть и «позитивная эвристика»: набор правил и предположений, которые могут изменять и развивать «опроверженные варианты» программы. Так происходит некоторая модернизация теории, сохраняющая исходные принципы и не меняющая результатов экспериментов, а выбирающая путь изменения или корректировки математического аппарата теории, т. е. сохраняющая устойчивое развитие науки. Но когда эти защитные функции ослабеют и исчерпают себя, данная научная программа должна будет уступить место другой научной программе, обладающей своей позитивной эвристикой. Произойдет НР. Итак, развитие науки происходит в результате конкуренции НП.

Понятие «научная революция» (НР) содержит обе концепции развития науки. В приложении к развитию науки оно означает изменение всех ее составляющих — фактов, законов, методов, научной картины мира. Поскольку факты не могут быть изменяемы, то речь идет об изменении их объяснения.

Так, наблюдаемое движение Солнца и планет может быть объяснено и в схеме мира Птолемея, и в схеме Коперника. Объяснение фактов встроено в какую-то систему взглядов, теорий. Множество теорий, описывающих окружающий мир, могут быть собраны в целостную систему представлений об общих принципах и законах устройства мира или в единую научную картину мира. О природе научных революций, меняющих всю научную картину мира, было много дискуссий.

Концепцию перманентной революции выдвинул К. Поппер. В соответствии с его принципом фальсифицируемости только та теория может считаться научной, если ее можно опровергнуть. Фактически это происходит с каждой теорией, но в результате крушения теории возникают новые проблемы, поэтому прогресс науки и составляет движение от одной проблемы к другой. Цело-

35

стную систему принципов и методов невозможно изменить даже крупным открытием, поэтому за одним таким открытием должна последовать серия других открытий, должны радикально измениться методы получения нового знания и критерии его истинности. Это значит, что в науке важен сам процесс духовного

роста, и он важнее его результата (что важно для приложений). Поэтому проверочные эксперименты ставятся так, чтобы они могли опровергнуть ту или иную гипотезу. Как выразился А. Пуанкаре, «если установлено какое-нибудь правило, то прежде всего мы должны исследовать те случаи, в которых это правило имеет больше всего шансов оказаться неверным».

Решающим называют эксперимент, направленный на опровержение гипотезы, поскольку только он может признать эту гипотезу ложной. Может быть, в этом основное отличие закона природы от закона общества. Нормативный закон может быть улучшен по решению людей, и если он не может быть нарушен, то он бессмыслен. Законы природы описывают неизменные регулярности, они, по выражению А. Пуанкаре, есть наилучшее выражение гармонии мира.

Итак, основные черты научной революции таковы: необходимость теоретического синтеза нового экспериментального материала; коренная ломка существующих представлений о природе в целом; возникновение кризисных ситуаций в объяснении фактов. По своим масштабам научная революция может быть *частной*, затрагивающей одну область знания; *комплексной* — затрагивающей несколько областей знаний; *глобальной* — радикально меняющей все области знания. Глобальных научных революций в развитии науки считают три. Если связывать их с именами ученых, труды которых существенны в данных революциях, то это — аристотелевская, ньютоновская и эйнштейновская.

Ряд ученых, считающих началом научного познания мира XVII в., выделяют две революции: научную, связанную с трудами Н. Коперника, Р. Декарта, И. Кеплера, Г. Галилея, И. Ньютона, и научно-техническую XX в., связанную с работами А. Эйнштейна, М. Планка, Н. Бора, Э. Резерфорда, Н. Винера, появлением атомной энергии, генетики, кибернетики и космонавтики.

В современном мире прикладная функция науки стала сравнима с познавательной. Практические приложения знаний человек использовал всегда, но они долгое время развивались независимо от науки. Сама наука, даже и возникнув, не была ориентирована на сознательное применение знаний в технической сфере. С Нового времени в западной культуре стали развиваться (и все более интенсивно) практические приложения науки. Постепенно естествознание стало сближаться, а затем и преобразовываться в технику, причем начал развиваться систематический подход к объектам с такими же, как и в науке, подходами — математикой и экспериментом. В течение нескольких столетий возникала потребность в

36

специальном осмыслении роли техники в связи с ростом ее значения в культурном прогрессе человечества в XIX—XX вв. Уже около века существует как самостоятельное научное направление «философия техники». Но не только человек создавал технику, но и техника меняла своего творца.

1.7. Оценки научных успехов и достижений

Ученых в служении миру и прогрессу объединяют общие принципы познания законов природы и общества, хотя наука XX в. сильно дифференцирована. Крупнейшие достижения человеческого разума обусловлены обменом научной информацией, переносом результатов теоретических и экспериментальных исследований из одной области в другую. От сотрудничества ученых разных стран зависит прогресс не только науки и техники, но и человеческой культуры и цивилизации в целом. Феномен XX в. в том, что число ученых за всю предшествующую историю человечества составляет лишь 0,1 от работающих в науке сейчас, т. е. 90 % ученых — наши современники. И как оценить их достижения? Различные научные центры, общества и академии, многочисленные научные комитеты разных стран и различные международные организации отмечают заслуги ученых, оценивая их личный вклад в развитие науки и значение их научных достижений или открытий. Существует множество критериев для оценки важности научных работ. Конкретные работы оценивают по количеству ссылок на них в работах других авторов или по числу переводов на другие языки мира. При таком методе, который имеет много недостатков, существенную помощь оказывает компьютерная программа по «индексам цитируемости». Но этот или аналогичные методы не позволяют увидеть «леса за отдельными деревьями». Существует система наград — медалей, премий, почетных званий в каждой стране и в мире.

Среди самых престижных научных наград — премия, учрежденная 29 июня 1900 г. Альфредом Нобелем. По условиям его завещания премии должны присуждаться 1 раз в 5 лет лицам, которые сделали в предшествующем году открытия, внесшие принципиальный вклад в прогресс человечества. Но награждать стали и за работы или открытия последних лет, важность которых была оценена недавно. Первая премия в области физики была присуждена В. Рентгену в 1901 г. за открытие, сделанное 5 лет назад. Первым лауреатом Нобелевской премии за исследования в области химической кинетики стал Я. Вант-Гофф, а в области физиологии и медицины — Э. Беринг, ставший известным как создатель противодифтерийной антитоксичной сыворотки.

Многие отечественные ученые также были удостоены этой престижной премии. В 1904 г. лауреатом Нобелевской премии по фи-

37

зиологии и медицине стал И. П. Павлов, а в 1908 г. — И. И. Мечников. Среди отечественных Нобелевских

лауреатов — академик Н.Н.Семенов (совместно с английским ученым С.Хиншельвудом) за исследования механизма цепных химических реакций (1956); физики И.Е.Тамм, И.М.Франк и П.А.Черенков — за открытие и исследование эффекта сверхсветового электрона (1958). За работы по теории конденсированных сред и жидкого гелия Нобелевская премия по физике была присуждена в 1962 г. академику Л.Д.Ландау. В 1964 г. лауреатами этой премии стали академики Н.Г.Басов и А.М.Прохоров (совместно с американцем Ч.Таунсом) за создание новой области науки — квантовой электроники. В 1978 г. Нобелевским лауреатом стал и академик П. Л. Капица за открытия и основополагающие изобретения в области низких температур. В 2000 г., как бы завершая век присуждения Нобелевских премий, академик Ж.И.Алферов (из Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия) и Г.Кремер (из Калифорнийского университета, США) стали Нобелевскими лауреатами за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотной электронике и оптоэлектронике.

Присуждение Нобелевской премии осуществляет Нобелевский комитет Шведской академии наук. В 60-е годы деятельность этого комитета была подвергнута критике, поскольку многие ученые, достигшие не менее ценных результатов, но работающие в составе больших коллективов или опубликовавшие в «непривычном» для членов комитета издании, не стали лауреатами Нобелевской премии. Например, в 1928 г. индийские ученые В.Раман и К. Кришнан исследовали спектральный состав света при прохождении его через различные жидкости и наблюдали новые линии спектра, смещенные в красную и синюю стороны. Несколько раньше и независимо от них аналогичное явление в кристаллах наблюдали советские физики Л.И.Мандельштам и Г.С.Ландсберг, опубликовав свои исследования в печати. Но В.Раман послал короткое сообщение в известный английский журнал, что обеспечило ему известность и Нобелевскую премию в 1930 г. за открытие комбинационного рассеяния света. В течение века исследования становились все более крупными и по количеству участников, поэтому присуждать индивидуальные премии, как это предусматривалось в завещании Нобеля, стало труднее. Кроме того, возникли и развились области знаний, не предусмотренные Нобелем.

Организовались и новые международные премии. Так, в 1951 г. была учреждена Международная премия А. Галабера, присуждаемая за научные достижения в освоении космоса. Ее лауреатами стали многие советские ученые и космонавты. Среди них — главный теоретик космонавтики академик М. В. Келдыш и первый космонавт Земли Ю.А.Гагарин. Международная академия астронавтики учредила свою премию; ею отмечены работы М.В.Келдыша, О. Г. Газенко, Л. И. Седова, космонавтов А. Г. Николаева и

38

В.И.Севастьянова. В 1969 г., например, Шведский банк учредил Нобелевскую премию по экономическим наукам (в 1975 г. ее получил советский математик Л.В.Канторович). Международный математический конгресс стал присуждать молодым ученым (до 40 лет) премию имени Дж. Филдса за достижения в области математики. Этой престижной премии, присуждаемой раз в 4 года, были удостоены молодые советские ученые С. П. Новиков (1970) и Г.А. Маргулис (1978). Многие премии, присуждаемые различными комитетами, приобрели в конце века статус международных. Например, медалью У. Г. Волластона, присуждаемой Лондонским геологическим обществом с 1831 г., были оценены заслуги наших геологов А. П. Карпинского и А. Е. Ферсмана. Кстати, в 1977 г. фонд г. Гамбурга учредил премию А. П. Карпинского, русского и советского геолога, президента Академии наук СССР с 1917 по 1936 г. Эта премия присуждается ежегодно нашим соотечественникам за выдающиеся достижения в области естественных и общественных наук. Лауреатами премии стали выдающиеся ученые Ю. А. Овчинников, Б.Б.Пиотровский и В.И.Гольдманский.

В нашей стране самой высокой формой поощрения и признания научных заслуг являлась Ленинская премия, учрежденная в 1957 г. До нее была премия им. Ленина, просуществовавшая с 1925 по 1935 г. Лауреатами премии им. Ленина стали А. Н. Бах, Л. А. Чугаев, Н.И.Вавилов, Н.С.Курнаков, А.Е.Ферсман, А.Е.Чичибабин, В. Н. Ипатьев и др. Ленинской премии были удостоены многие выдающиеся ученые: А.Н.Несмеянов, Н.М.Эмануэль, А. И. Опарин, Г. И. Будкер, Р. В. Хохлов, В.П.Чеботаев, В.С.Летохов, А.П.Александров, Ю.А.Овчинников и др. Государственные премии СССР присуждались за исследования, вносящие крупный вклад в развитие науки, и за работы по созданию и внедрению в народное хозяйство наиболее прогрессивных и высокотехнологичных процессов и механизмов. Сейчас в России существуют соответствующие премии Президента и правительства Российской Федерации.

1.8. Современная научно-техническая революция: достижения и проблемы

Современную эпоху называют эпохой *научно-технической революции* (НТР). Это значит, что наука превратилась в ведущий фактор развития общественного производства и всей жизни общества, стала непосредственной производительной силой. Если обратиться к началу XX в., когда были сделаны крупные открытия в науке и технике, то можно проследить процесс подготовки НТР. За четверть века в физике был открыт электрон, раскрыта сложная структура атома, установлен корпускулярно-волновой

39

дуализм света и вещества, открыты явления естественной и искусственной радиоактивности, созданы квантовая механика, теория относительности. В жизни стали широко использовать электричество,

механизацию и автоматизацию производства; развились средства связи, появились радио и телевизор, автомобиль, самолет, электропоезд; развивались новые источники энергии. Успехи в химии и биологии привели к разработке технологий органических веществ и методов управления химическими процессами, в частности синтеза многих лекарств, взрывчатых веществ, красителей, продуктов питания, а также к получению новых веществ с заданными свойствами. Появились науки — генетика, молекулярная биология, кибернетика.

В середине XX в. научно-технический прогресс стал оказывать решающее влияние на мировую политическую жизнь. Создание атомной бомбы показало, что овладение достижениями науки и передовыми технологиями определяет судьбы стран и человечества. Следующая вежа НТР — овладение космосом: создание спутников, полет Ю.А.Гагарина, исследование космическими аппаратами других планет, выход человека в открытый космос и на Луну. Человечество осознало свое единство. Как выразился известный физик В.Гейзенберг, «...интересовались не природой как она есть, а, прежде всего, задавались вопросом, что с ней можно сделать. Естествознание поэтому превратилось в технику. Точнее, оно соединилось с техникой в единое целое». Эта связь с техникой и выражается в самом термине НТР. Появление и массовое распространение ЭВМ, которым человек может передать свои логические функции и постепенно ряд функций по автоматизации производства, контролю и управлению, привели к впечатляющему рывку вперед во многих областях жизни — в сферах производства, образования, бизнеса, науки и социальной жизни. Произошло резкое изменение всего строя жизни одного поколения человечества: открываются и используются новые виды энергии, электронное приборостроение, биотехнологии; перестраивается весь технологический базис производства и управления, меняется отношение человека к ним, создается и укрепляется единая система взаимодействия человека и природы — наука, техника, производство.

В конце XX в. **продукция высоких технологий** занимает все большее место в валовом продукте развитых стран, обеспечивая его прирост; их развитость определяет положение государства в современном мире. Поэтому большинство стран мира прилагают максимум усилий к укреплению научно-технического потенциала, расширению инвестиций в наукоемкие технологии, участию в международном технологическом обмене, ускорению темпов научно-технического развития. Экономический рост отождествляется с научно-техническим прогрессом и интеллектуализацией

40

основных факторов производства. Новые производства требуют высочайшей точности, надежности и стабильности. Малое нарушение или оплошность могут стать причиной срыва всего производства или катастрофы, потому так высоки требования к квалификации и надежности персонала. Высокотехнологичные направления объединяют микроэлектронику, информационные и биотехнологии. Распространение высоких технологий и выросшая доля стоимости научных исследований в цене продукта (наукоемкость) повысили требования к уровню подготовленности участников производства.

Кроме того, резко сократилось время между проведением научного исследования и его внедрением; при этом часто используются объекты, изученные не досконально, которые трудно представить на основе предыдущего опыта. Отсюда — совершенно иное отношение к науке. Несмотря на большую долю риска, высока возможная прибыль. И правительства многих развитых стран, и крупные фирмы вкладывают деньги в научные исследования; создаются венчурные (от франц. *aventure* — риск, авантюра) фирмы, привлекающие мелких вкладчиков. Это оказывает пользу развитию науки, так как ей требуются дорогостоящее оборудование, развитая инфраструктура, высокая степень информатизации, высококвалифицированный персонал и пр. Но сращивание науки с бизнесом имеет и негативные последствия — служение Истине отступает на второй план, меняется научная этика. Изменилось и мировоззрение людей.

Информация к началу XXI в. стала стратегическим ресурсом общества (как продукты питания, промышленные или энергоресурсы). Произошла смена доминирующего вида деятельности в сфере общественного производства (сначала от аграрной к индустриальной, а затем — к информационной). Роль науки в обществе сильно возросла, оказывая огромное влияние на мировоззрение. Но и мировоззрение все более влияет на экономику, политику, социальную жизнь. В условиях исчерпания возможностей экстенсивного развития человечество снова осознало свое единство. Но нарастают и глобальные проблемы, которые могут быть решены только общими усилиями (ядерное разоружение, экология, безопасность, строительство и поддержание глобальной информационной и коммутационной инфраструктуры). Высокий профессионализм неотделим от нравственности, гуманизма, цельного видения единства и взаимосвязи природы и общества, Человека и Космоса.

Меняются отношения человека с природой и людей друг с другом. Жизнь стала продолжительней и комфортней. Бытовая техника оснащается микропроцессорами, по Интернету можно общаться, учиться, покупать товары и др. За счет автоматизации и роботизации деятельности человек вытесняется из производства, растет доля творческого труда, общество должно непрерывно обу-

41

чаться новому, стать «обучающимся обществом». Человек стал более свободным, но **он еще не** готов с пользой для себя и общества использовать тот материальный достаток и досуг, который дала ему НТР. Удобства жизни отделяют людей друг от друга; разработка новых достижений НТР происходит за счет

развития узкой специализации; усиливается давление на окружающую среду. Быстрый темп развития и высокая сложность этих отраслей привели к необходимости компьютеризации и автоматизации самих технологических процессов, их проектирования, хранения и транспортировки сырья и продукции, непрерывного изучения рынка сбыта и т. п.

Увеличение численности высококвалифицированных специалистов становится главной формой накопления в современной экономике, а люди, их разум — самым ценным стратегическим ресурсом, за которые идет конкурентная борьба, не уступающая по накалу борьбе за сырьевые ресурсы. И если страна не способна финансировать научные исследования, разработку и развитие наукоемких технологий, она рискует «отстать навсегда». Представление о науке как о непосредственной производительной силе — это дань возрастающей роли научного труда в совокупном общественном продукте. Сейчас на долю новых знаний, воплощаемых в технологиях, оборудовании и организации производства, в развитых странах приходится от 70 до 85 % прироста ВВП, а на долю семи высокоразвитых стран — 80—90 % наукоемкой продукции и весь ее экспорт. Правительства не могут принимать важных решений без консультаций со специалистами и, прежде всего, с учеными-естественниками.

Наука может дать человеку знания, как осуществить контроль за состоянием окружающей природы, как лучше организовать производство, как обеспечить себя энерго- и ресурсосберегающими технологиями, как обеспечить безопасность народов, но не может ограничить рост потребления одного за счет другого.

Простейший пример — автомобильный транспорт. Автомобильные выхлопы — один из главных источников кислотных дождей. Но переход на иное топливо или даже ограничение скорости движения автомобилисты не поддерживают, и правительства не принимают соответствующие жесткие законы. Также ни один предприниматель не уменьшит свою прибыль от производства, потратив средства на очистительные сооружения, если власть не примет соответствующие законы.

Поэтому первостепенное значение приобретают подготовка общественного сознания к правильному восприятию достижений НТР, разработка грамотных законов, разумно ограничивающих потребление, повышение уровня компетентности управляющих и правящих. Фундаментальная наука относится к высшим духовным ценностям человечества и несет в себе объединительное начало. В заключение приведем слова Нобелевского лауреата

42

И.П.Павлова, сказанные еще в начале XX в.: «Что нам, русским, нужно сейчас в особенности — это пропаганда научных стремлений, обилие научных средств и страстная научная работа. Очевидно, наука становится главнейшим рычагом жизни народов, без нее нельзя удержать ни самостоятельности, ни тем более достойного положения в мире».

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Как формировалось представление о критерии истинности знания?
2. Каковы отличия научного познания от вненаучного? Чем отличаются естественно-научная и гуманитарная культуры? Чем отличается естественно-научный подход от философского?
3. Какие общенаучные методы используются в естествознании? Дайте определение понятиям «мысленный эксперимент» и «модельный эксперимент» и приведите примеры.
4. Какова последовательность этапов развития научного знания? Чем отличается дисциплинарный подход от междисциплинарного?
5. Назовите этапы развития естествознания.
6. Дайте определение понятию «научная революция» и приведите примеры.
7. Дайте определение понятию «научная картина мира» и приведите пример смены картин мира.
8. Охарактеризуйте свойства систем и системный подход.
9. Дайте определение понятию НТР и сформулируйте ее проблемы.
10. Дайте определение понятию «научная программа» и покажите, как менялись в истории естествознания стратегии познания.

Глава 2. ПОНЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА, ВРЕМЕНИ И МАТЕРИИ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

2.1. Понятие «пространство»

В обыденном восприятии под *пространством* понимают некую протяженную пустоту, в которой могут (но не обязательно) находиться какие-либо предметы. Однако между небесными телами (звездами, планетами, кометами) всегда имеется некоторое количество вещества, да и физический вакуум содержит виртуальные частицы. В науке пространство рассматривается не какместилище материи, а как физическая сущность, обладающая конкретными свойствами и структурой.

Основные свойства пространства формировались по мере освоения человеком территорий и развития одной из древнейших наук — геометрии (от греч. *geometria* — землемерие). Сложившиеся к III в. до н. э. знания систематизировал древнегреческий математик Евклид, один из наиболее известных и влиятельных математиков всех времен, работавший в Александрийском Музее. В своем знаменитом произведении «Начала», состоящем из 15 книг, ставшем основой геометрии (школьная геометрия заимствована из первых 6 книг «Начал»), он организовал научное мышление на основе логики. В первой книге Евклид определил идеальные объекты геометрии: *точка, прямая линия, плоскость, поверхность*.

Эти объекты рассматривались через некоторые характеристики реального окружающего мира или каких-либо предметов, часто для этого использовались представления о луче света или натянутой струне. Например, образ прямой линии связан с лучом света. Но было известно, что в неоднородных средах световой луч преломляется; и сам же Евклид получил закон равенства углов отражения и падения, а Аристотель рассуждал о кажущемся преломлении палки, погруженной частично в воду. Исходя из наиболее простых свойств линий и углов Евклид путем строгих логических доказательств пришел в планиметрии к равенству треугольников, равенству площадей, теореме Пифагора, к золотому сечению, кругу и правильным многоугольникам. В книгах V—VI и X он излагает теорию несоизмеримых Евдокса и правила подобия, VII—IX — теорию чисел, а в последних трех — геометрию в пространстве. От телесных углов, объемов параллелепипедов, призм, пирамид и шара Евклид переходит к исследованию пяти правильных («Платоновых») тел и доказательству, что их существует только пять.

44

Изложение Евклида построено в виде строго логических выводов теорем из системы аксиом и постулатов (кроме системы определений). Согласно им и определены основные представления о пространстве, которые использованы И. Ньютоном в его «Математических началах натуральной философии» (1687):

однородность — нет выделенных точек пространства, параллельный перенос и поворот не изменяют вид законов природы;

изотропность — в пространстве нет выделенных направлений, и поворот на любой угол сохраняет неизменными законы природы;

непрерывность — между двумя различными точками в пространстве, как близко бы они не находились, всегда есть третья;

трехмерность — каждая точка пространства однозначно определяется набором трех действительных чисел — координат;

«евклидовость» — описывается геометрией Евклида, в которой, согласно пятому постулату, параллельные прямые не пересекаются и сумма внутренних углов треугольника равна 180° .

Последний постулат привлекал к себе особое внимание, и некие его эквиваленты привели в XIX в. к возможности иных геометрий, в которых сумма углов треугольника больше (геометрия Римана — геометрия на сфере) или меньше 180° (геометрии Лобачевского и Больяйи).

Положение тел в окружающем пространстве определяется тремя координатами (долгота, широта, высота), т.е. наглядным представлениям соответствует трехмерность пространства. Евклид построил свою геометрию, известную как евклидова геометрия. Птолемей в своем труде «Альмагест» утверждал, что в природе не может быть более трех пространственных измерений. Для определения положения в пространстве Р.Декарт ввел прямоугольную систему координат («декартовы координаты») — *x, y, z*. Эти координаты не всегда являются самыми удобными. Для описания орбит планет при их движении вокруг Солнца удобнее сферическая система координат, выделяющая положение Солнца и учитывающая, что гравитационное поле убывает одинаково по всем направлениям. Поэтому выбирают сферические координаты — расстояние до центра и два угла, определяющие направление, в котором нужно двигаться от центра, чтобы достичь нужной точки. Выбор системы координат — это просто выбор способа описания, и он не может влиять на свойства континуума, который нужно описать. Пространства и континуумы независимо от способа описания обладают своими

внутренними геометрическими свойствами (например, кривизной). Пространство называют искривленным, если в него невозможно ввести координатную систему, которая может считаться прямолинейной. Иначе — оно плоское.

Физический мир Декарта состоит из двух сущностей: материи (простой «протяженности, наделенной формой») и движения. Поскольку

45

«природа не терпит пустоты» (Аристотель), протяженность заполнена «тонкой материей», которую Бог наделил непрерывным движением. Декарт описал все процессы своими механическими законами движения и построил «космологический роман» (трактаты «Мир» и «Начала философии»). Декартово представление о флюидах, заполняющих пространство, господствовало в науке XIX и частично XX вв., оказав существенное влияние на развитие оптики и электричества. Вес, как и любая сила, у Декарта — свойство движения тонкой материи, отождествляемой с пространством. Поэтому механицизм Декарта сводит силы к свойствам пространства.

Живя на поверхности почти сферической, мы пользуемся геометрией на плоскости, хотя правильнее говорить, что большие круги (параллели и меридианы) — кратчайшие расстояния (что учитывается при прокладке курса самолетов, например). На геометрии Евклида построена механика Галилея — Ньютона, где тела движутся криволинейно только под действием сил. **Пространство Ньютона** — это модель независимо существующей субстанции, где могут перемещаться материальные тела и частицы света. Каждый объект обладает в пространстве определенным положением и ориентацией, а расстояние между двумя событиями точно определено, даже если они произошли в разные моменты времени.

Положение R тела в пространстве определяется только относительно системы каких-то объектов. Так как ощущается лишь неравномерное движение (а не движение с постоянной скоростью), имеет смысл говорить об изменении скорости $\mathbf{v} = d\mathbf{R}/dt$ тела в пространстве, и движения определяются только ускорением $\mathbf{W} = d\mathbf{v}/dt$. Ньютон перевел эти, сугубо обыденные, ощущения на математический язык, у него все равномерные движения относительны, а ускоренные — абсолютны. Причины, вызывающие ускоренные движения, он назвал *силами*. Силы \mathbf{F} пропорциональны ускорению тел с коэффициентом M , называемым *инертной массой*: $\mathbf{F} = M\mathbf{W}$. Если этот закон Ньютона прочесть справа налево, видно, что части системы при равномерном движении не испытывают силового воздействия. Значит, механическими средствами равномерное движение нельзя отличить от другого такого же и пространство само по себе не оказывает силового воздействия на движущиеся тела.

Механика Ньютона позволяет наблюдать только ускоренные движения, а ускорение ведет к возникновению в системе отсчета движущегося тела *сил инерции*. Таковы, например, давление ног человека, направленное вниз при кратковременной остановке лифта, движущегося в направлении вверх, или центробежная сила на вращающейся карусели. Приписывая появление сил инерции пространству, в котором происходит ускорение, Ньютон доказывал реальность его существования. Оно — *субстанция, способная динамически действовать на материальные тела*.

46

Создание теории электромагнитного поля дало возможность использовать оптические явления для измерения скорости движения в пространстве: свет должен распространяться в эфире (некоей жидкости, заполняющей пространство) с постоянной скоростью, зависящей от «упругости» эфира, а скорость света, измеренная наблюдателем, должна зависеть от направления распространения света. Но проведенный А. Майкельсоном и Э. Морли опыт показал, что никакого эффекта, связанного с эфиром, нет (1887). Пришлось отказаться от эфира и наглядных представлений Ньютона о пространстве и времени, и А.Эйнштейн предложил (1905) свою **специальную теорию относительности (СТО)**.

В основе СТО лежат два постулата: скорость света в вакууме постоянна и не зависит от движения наблюдателя или источника света; все физические явления (механические и электродинамические) происходят одинаково во всех телах, движущихся относительно друг друга прямолинейно и равномерно. Это означало сокращение длин и замедление течения времени в соответствии с преобразованиями Лоренца для тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. «Отныне пространство и время, взятые по отдельности, обречены влачить призрачное существование, и только единство их обоих сохранит реальность и самостоятельность» (Г. Минковский). Изменения длин и времен ощутимы лишь при скоростях, близких к скорости света; при меньших скоростях движение происходит по законам классической механики. В таком пространстве-времени уже удобнее криволинейные координаты. В разных системах координат по-разному будут выглядеть математические записи законов физических явлений. Итак, в *СТО время и пространство объединяются в четырехмерное пространство-время*.

В конце XIX в. появились **неевклидовы теории** пространства — различные варианты геометрии Н. И. Лобачевского, Я.Болъяйи и Г.Ф.Б. Римана. Они отвергали один из постулатов Евклида — в них через точку можно провести несколько прямых, параллельных заданной. Проверкой новой геометрии было бы измерение суммы внутренних углов треугольника, но измерения Гаусса и Лобачевского не обнаружили отклонений физического пространства от евклидова. Пространство Римана, в котором сумма углов меньше 180° , соответствует геометрии на сфере и легло в основу общей теории относительности (ОТО) — обобщенной

теории тяготения, разработанной Эйнштейном (1916). При наличии в пространстве тяготеющих масс (т.е. и поля тяготения) пространство искривляется, становится неевклидовым. Движения тел в нем происходят по кратчайшему пути — по геодезическим линиям. *Свойства пространства-времени определяются распределением и движением материи в пространстве.*

47

Хотя в ОТО соотношение между количеством материи и степенью кривизны простое, но сложны расчеты — для описания кривизны в каждой точке нужно знать значения 20 функций пространственно-временных координат. Десять функций соответствуют части кривизны, которая распространяется в виде гравитационных волн, т.е. в виде «ряби» кривизны; остальные десять определяются распределением масс, энергии, импульса, углового момента, внутренних напряжений в веществе и значениями универсальной гравитационной постоянной G . Из-за малости величины G нужно много масс, чтобы существенно «изогнуть» пространство-время. Величину $1/G$ подчас считают мерой жесткости пространства-времени (и наше пространство-время очень жесткое). Вся масса Земли создает кривизну, составляющую порядка 10^{-9} кривизны своей поверхности. Чтобы представить кривизну пространства-времени вблизи Земли, подбросим мяч в воздух. Если он будет находиться в полете 2 с и опишет дугу в 5 м, то свет за эти 2 с пройдет расстояние 600 000 км. Если представить дугу высотой 5 м, вытянутую по горизонтали до 600 000 км, то ее кривизна и будет соответствовать кривизне пространства-времени. В отличие от теории гравитации Ньютона теория Эйнштейна претендует на теорию пространства-времени, т.е. на теорию Вселенной в целом.

Большинство экспериментальных данных о гравитации хорошо описывается в пространстве Евклида или динамике Ньютона, но есть немногочисленные явления (отклонение света в поле тяготения или смещение перигелия Меркурия), которые противоречат теории Ньютона и хорошо объясняются в ОТО.

Характер физических законов существенно зависит от масштаба исследуемых явлений, и принято говорить о микро-, макро- и мегамире. Объектами *микромра* являются атомные ядра и молекулы, атомы и элементарные частицы. К объектам *макромра* относят живую клетку, человека и соизмеримые с ним предметы. *Мегамир* — это планеты, Солнце, звезды, галактики и вся Вселенная в целом. В мегамире существенную роль играют эффекты СТО и ОТО, преобладающим взаимодействием является гравитационное. В макромире законы движения тел определяются классической механикой, а в микромире — квантовой физикой.

2.2. Масштабы расстояний во Вселенной. Методы оценок размеров и расстояний

Бесконечность и огромность Вселенной вызывают чувство восхищения и трепета.

Так, немецкий физик, изобретатель воздушного насоса, показавший существование давления воздуха (опыт с «магдебургскими полушариями») и изучивший многие его свойства, О. фон Герике ставил опыты, чтобы доказать, что Вселенная пуста, вездесуща и бесконечна. Это противоречило науке начала XVII в. Он писал, что его в стремлении узнать строение мира прежде всего потрясла невообразимая протяженность

48

Вселенной. Она-то и возбудила в нем не дающее покоя стремление увериться, чем является то, что распространяется между небесными телами: «Чем же, в сущности, оно является? А ведь оно содержит все и дает место для бытия и существования. Может быть, это какая-то огненная небесная материя, твердая (как утверждали аристотелики), жидкая (как думают Коперник и Тихо Браге) или какая-нибудь прозрачная пятая эссенция? Или же пространство свободно от всякой материи, т.е. есть постоянно отрицаемая пустота».

Расстояния в мире звезд измеряют в световых годах (1 св. год $\approx 9,5$ трлн км), а расстояние от Земли до Солнца в 1 а. е. (астрономическая единица) ≈ 150 млн км свет преодолевает за 8,5 мин. Луна находится на расстоянии около 1 св. с, или 384 тыс. км, или 60 радиусов Земли. Поперечник Солнечной системы — несколько световых часов, а ближайшая звезда (Проксима созвездия Центавра) находится на расстоянии около 4 св. лет.

В древности у разных народов были и различные представления о Земле и ее форме. Так, индусы представляли себе Землю в виде плоскости, лежащей на спинах слонов; жители Вавилона — в виде горы, на западном склоне которой находится Вавилония; евреи — в виде равнины и т.д. Но в любом случае считалось, что в некоем месте небесный купол соединяется с земной твердью. Своему появлению и развитию наука о Земле — география, или землеописание, во многом обязана древним грекам, представлявшим мир в виде круглой лепешки с Грецией в центре. Гекатей Милетский даже вычислил ее диаметр — 8000 км. Для наших далеких предков ориентация в пространстве имела огромное значение. Порядок обеспечивал безопасность.

В Месопотамии и Египте наблюдения за небом составляли прерогативу жрецов и связывались с **астрологией**. Люди заметили, что планеты перемещаются на фоне звезд (от греч. *planetes* — блуждающий). Чтобы представить, как эти перемещения происходят, они стали делать модели окружающего человека мирового пространства, модели Мира. В центр Мира ставился человек и, следовательно, наша Земля. Такое выделенное положение человека соответствовало представлениям наблюдателя. Аристотель дал натурфилософское обоснование такой системы: он представлял космос как большое число связанных друг с другом материальных сфер, каждая из которых подчиняется своим законам. Видимое движение небесных тел

с востока на запад он не мог объяснить и ограничился высказыванием: «Природа всегда осуществляет лучшую из возможностей». Другой ученик Платона Эвдокс попытался найти кинематику планет исходя из гипотезы движения по идеальной кривой — окружности. Для этого ему пришлось подбирать скорости и направления движений трех (а потом — семи) сфер для описания видимого движения Солнца и Луны и 26 сфер — для планет. Аристотель использовал уже 56 сфер, а математик Аполлоний предложил теорию эпициклов: планета движется по круговой орбите, центр которой описывает круг вокруг Земли. Эту систему развил знаменитый астроном Гиппарх, составивший первый каталог из 850 звезд, выделивший созвездия и открывший прецессию земной оси. Его считают одним из основателей астрономии.

49

У Аристотеля все небесные движения происходили по идеальным траекториям, тогда как на Земле законы движения иные. Представления Аристотеля были канонизированы церковью и сохранялись почти 20 веков.

Геоцентрическая система Мира (Солнечной системы)

Геоцентрическая система Мира (Солнечной системы) связана с александрийским астрономом Птолемеем, который обобщил существовавшие до него представления. Согласно модели Птолемея, изложенной в его сочинении «Альмагест» («Великое построение»), вокруг шарообразной и неподвижной Земли движутся Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн и небо неподвижных звезд. Сфера неподвижных звезд окружена жилищем блаженных, где помещен «перводвигатель». Центры подвижных светил движутся по кругам, эксцентричным по отношению к Земле. Для планет пришлось вводить систему окружностей — эпициклов. Система была громоздкой, по мере накопления материала еще более усложнялась, но помогла в первом приближении разобраться в астрономических явлениях. В течение многих столетий геоцентрическая система считалась единственно верной — она согласовывалась с библейским описанием сотворения мира. И только в период Возрождения началось иное развитие мысли.

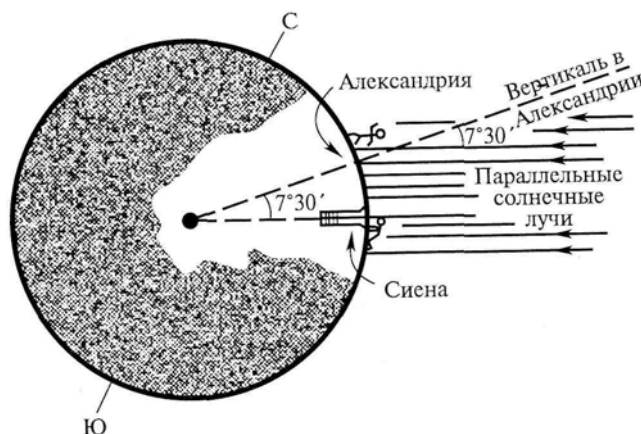
Гелиоцентрическая система (от греч. *helios* — солнце)

Гелиоцентрическая система (от греч. *helios* — солнце) связана с именем польского ученого Н. Коперника. Он возродил гипотезу пифагорейца Аристарха Самосского о строении Мира: Земля уступила место центра Солнцу и оказалась третьей по счету среди вращающихся по круговым орбитам планет. Коперник путем сложных математических расчетов объяснил странные видимые передвижения, разные для внешних (Марс, Юпитер, Сатурн) и внутренних (Меркурий, Венера) планет, их движениями вокруг Солнца. В своей книге «Об обращениях небесных сфер» (1543) он утверждал, что планеты — спутники Солнца. Когда Земля, двигаясь вокруг Солнца, обгоняет другую планету или отстает от нее, нам кажется, что планеты движутся то назад, то вперед. Учение Коперника нанесло удар по сложившимся представлениям об устройстве Мира и имело революционное значение для последующего развития науки в целом. Оно разрушило разницу в законах движения на небе и на Земле и установило идею единства мира. Как выразился А. Эйнштейн, Коперник «призвал человека к скромности». Через 73 года после смерти Коперника и выхода книги церковь запретила ее, и лишь в 1828 г. этот запрет сняли. Но Коперник все же предполагал наличие центра Вселенной, в который поместил Солнце, и этот недостаток теории исправили уже другие. Так, одним из первых в защиту учения Коперника (центральное место — Солнца, а не Земли) высказался Дж. Бруно, который считал Вселенную бесконечной с множеством солнц и планет.

Вращение Земли вокруг Солнца доказывается по наличию годичного параллакса звезд, а вращение ее вокруг своей оси — с помощью сохранения направления колебаний маятника Фуко.

50

Рис. 2.1. Определение размеров Земли по Эратосфену



Размеры планет определяют тщательным наблюдением за их движениями. Так, Меркурий — ближайшая к Солнцу планета — всегда находится близко к нему, при наблюдении с Земли его отклонение (наибольшая элонгация) может быть до 23° , тогда как для Венеры (второй от Солнца планеты) — 43° — 48° . Радиус орбиты Меркурия порядка $0,38a$ радиуса земной орбиты, где $a = 1$ а. е., а Венеры — $0,7a$.

Размеры Земли оценил удивительно точно Эратосфен еще во II в. до н. э., измерив угловое отклонение Солнца от зенита в Александрии в $7^{\circ}30'$ тогда как в Сиене (современный Асуан) оно было в зените. При этом $7^{\circ}30'$ составили такую долю от 360° , какую составляет расстояние 800 км между городами от полной длины окружности Земли. Так он получил эту длину — 40 000 км, сейчас 40 075,696 км (рис. 2.1). Поскольку она равна **2380683517997**

R, определил радиус Земли в 6400 км (в геодезии этот метод называется методом периангуляции).

Имея пропорции, можно построить и примерную схему Солнечной системы. Для получения абсолютных значений расстояний в ней нужно знать радиус орбиты хотя бы одной планеты. Его можно определить с помощью радара. Сейчас все расстояния определены достаточно точно и разными методами. При **радиолокационном методе** на исследуемый объект посылают мощный кратковременный электромагнитный импульс, а затем принимают отраженный сигнал. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с. Если точно измерить время, которое потребовалось сигналу, чтобы дойти до объекта и обратно, то легко вычислить искомое расстояние. Радиолокационные наблюдения позволяют с большой точностью определить расстояния до небесных тел Солнечной сис-

51
темы. Этим методом уточнены расстояния до Луны, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера.

Параллакс — угловое смещение предмета, которым можно характеризовать расстояние до него.

Параллакс — угловое смещение предмета, которым можно характеризовать расстояние до него. Из практического опыта известно, что скорость изменения направления на предмет при движении наблюдателя тем меньше, чем дальше объект находится от наблюдателя. Метод геометрического параллакса (триангуляции) позволяет измерять расстояние в макром мире, используя теоремы евклидовой геометрии (рис. 2.2, *а*). Явление геометрического параллакса — основа стереоскопического зрения человека и животных. Методом параллакса определяют расстояние до ближайших планет (рис. 2.2, *б*). Можно обнаружить смещение и при перемещении наблюдателя из-за суточного движения Земли, будто он переместился из центра Земли в точку экватора, из которой планета кажется находящейся на горизонте. Угол, под которым со светила виден экваториальный радиус Земли, перпендикулярный лучу зрения, называют *суточным параллаксом*. Средний суточный параллакс Солнца равен $8,794''$, Луны — $57,04'$.

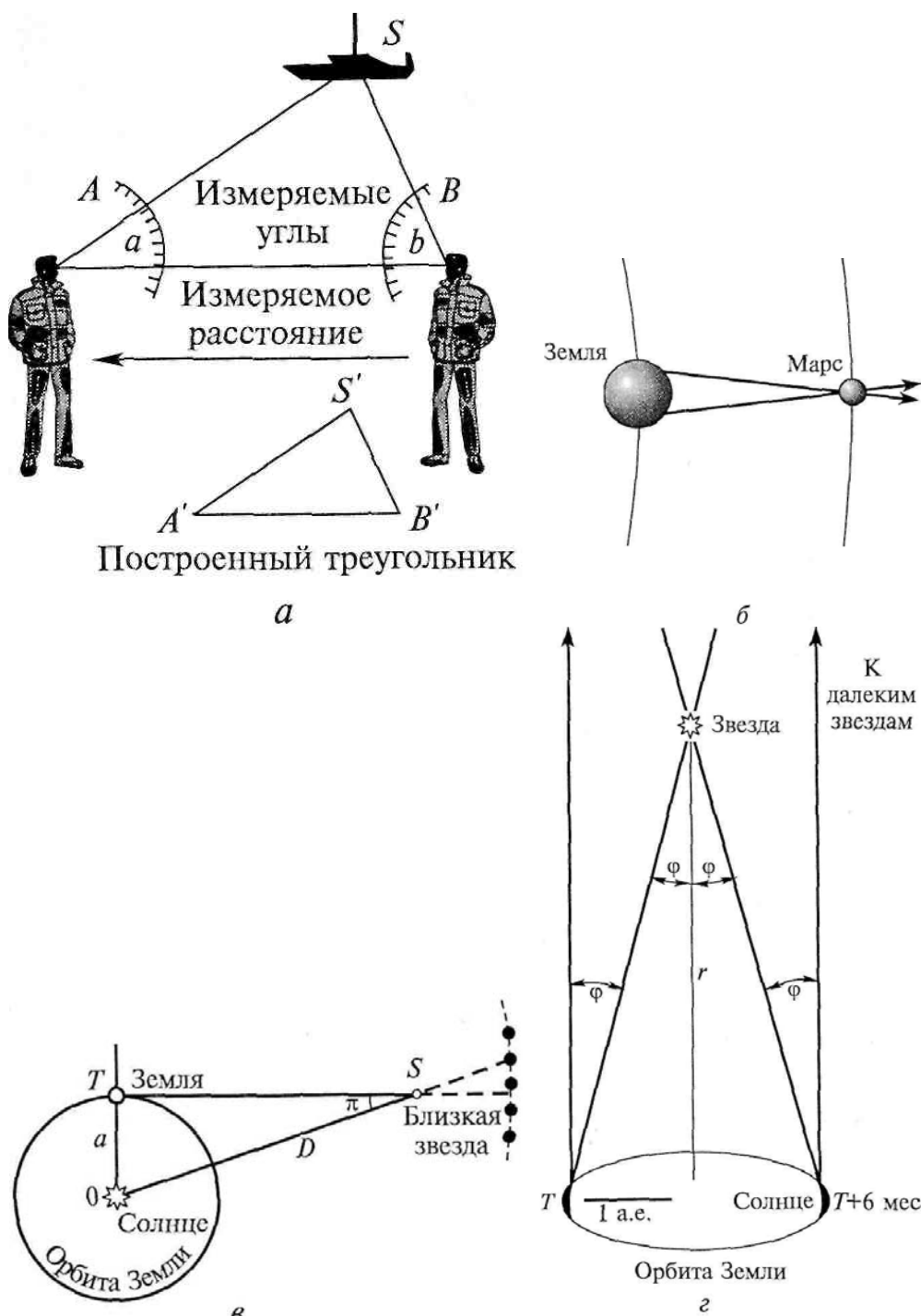
Метод геометрического параллакса также пригоден для определения расстояний до ближайших звезд, если в качестве базиса использовать не радиус Земли, а диаметр земной орбиты. Он позволяет оценить расстояние до 100 св. лет (рис. 2.2, *в*). *Годичный параллакс* звезды — это угол (π), на который изменится направление на звезду, если наблюдатель переместится из центра Солнечной системы на земную орбиту в направлении, перпендикулярном направлению на звезду. Иначе говоря, это угол, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты, расположенная перпендикулярно лучу зрения (рис. 2.2, *г*). С годичным параллаксом связана и основная единица измерения расстояний между звездами — *парсек* (от параллакс и секунда): $1\text{ пк} = 206\,265\text{ а. е.} = 3,263\text{ св. года} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ м}$. Так, ближайшая к нам звезда Проксима Центавра при $\pi = 0,762''$ находится на расстоянии 1,31 пк, Альфа того же созвездия Центавра при $\pi = 0,751''$ — на расстоянии 1,33 пк, а известная звезда Сириус (Альфа Большого Пса) — $0,375''$ и 2,66 пк, соответственно.

Хотя диаметр земной орбиты и равен $3 \cdot 10^{11}$ м, из-за огромного расстояния до звезд измерять углы достаточно сложно. Небо фотографируют одним телескопом через полгода. При наложении фотографий изображения большинства звезд совпадут друг с другом, но для ближайших звезд окажутся смещенными. Отношение этого малого смещения к фокусному расстоянию телескопа даст тот же угол, что и отношение базиса к расстоянию до звезды. Смещение изображения для ближайшей звезды равно примерно $1''$ для фокусного расстояния 10 м и составит на фотопластинке $50 \cdot 10^{-6}$ м, или 50 мкм, что можно измерить только под микроскопом. Ближайшая к Солнцу звезда в созвездии Центавра находится на расстоянии 4,3 св. года, в 272 000 раз дальше, чем Земля от Солнца.

52

Рис. 2.2. Метод триангуляции:

a — определение расстояний до корабля (по предложению Фалеса); b — определение расстояния до Марса (в единицах радиуса Земли); v — определение расстояний до близких звезд (годовой параллакс); z — определение расстояний до далеких звезд (годовой параллакс)



Когда не было приборов для точного определения углов, использовали такой метод. Если из двух одинаково ярких тел одно находится на расстоянии в n раз большем, чем другое, то близкое тело кажется в n^2 раз ярче. Например, Солнце в 10^6 раз в квадрате ярче Сириуса, следовательно, Сириус в миллион раз дальше от Земли, чем Солнце. Яркость других звезд можно сравнить по тому же правилу с яркостью Сириуса и т.д. Сириус отстоит от нас на расстоянии примерно 10 св. лет.

53

Из распределения звезд по небу следует, что они образуют круговой диск в 10^5 св. лет, так как яркость самых слабых звезд примерно в 10^8 раз меньше яркости Сириуса. Толщина этого диска около 10^4 св. лет. Среднее расстояние между звездами в Галактике примерно 10 св. лет, отсюда среднее число звезд — 50 млрд. Когда мы смотрим в направлении центра Галактики, видим огромное скопление звезд — Млечный Путь. Солнце находится на расстоянии примерно в $2/3$ от центра до края Галактики в одном из ее рукавов. От слабых звезд Млечного Пути свет идет до Земли десятки тысяч лет — так далеки они от нас. Большинство звезд Млечного Пути не видно невооруженным глазом, хотя многие из них являются белыми и голубовато-белыми гигантскими звездами, излучающими энергии в десятки тысяч раз больше, чем Солнце — типичный

желтый карлик с температурой поверхности 6000 К. Для земного наблюдателя спиральные ветви экваториального пояса Галактики проецируются в виде светлой полосы Млечного Пути, составляющего основу Галактики (от греч. *galaktikos* — млечный, молочный).

Другие галактики видны в телескопы как небольшие туманные пятна, их и называли туманностями. Как определить расстояния до них? Полная яркость туманности Андромеды примерно такая же, как и у звезды, расположенной на расстоянии 10 св. лет. С помощью мощных телескопов выяснено, что в других галактиках приблизительно столько же звезд, сколько в Млечном Пути. Значит, эта туманность в $50 \cdot 10^9$ раз ярче отдельной звезды Галактики, и расстояние до нее должно быть в $\sqrt{50 \cdot 10^9}$ раз больше, чем до отдельных звезд, т.е. произведения этого числа на 10 св. лет, или около 2 млн св. лет. Эта грубая оценка примерно соответствует тому, что дают другие методы. Расстояние от Галактики до туманности Андромеды в 20 раз больше диаметра Галактики, т.е. свет, идущий от нее и который мы видим сейчас, покинул эту Галактику, когда на Земле еще не было людей, но жизнь уже зародилась.

Расстояния до ближайших галактик определяют методом измерения сравнительной яркости исходя из закона убывания интенсивности точечного источника пропорционально квадрату расстояния. Для больших расстояний подходящего базиса уже не найти, и потому используют свойства света и зависимость частоты света от скорости излучающего объекта (эффект Доплера). Эти далекие галактики представляют собой островные вселенные, каждая из которых содержит миллиарды звезд.

Так как подавляющее большинство известных нам звезд слишком далеки, чтобы методом параллакса можно было вычислить расстояние до них, пришлось придумать иные методы. Один из них основан на изучении *цефеид*, распространенного и очень важного типа физически переменных звезд. Цефеиды — это нестационарные пульсирующие звезды, которые периодически раздуваются и сжимаются, меняя свой блеск. Между периодом пульсаций цефеид и их светимостью существует зависимость, получившая название «период-светимость». По ней можно

54

определить светимость и вычислить расстояние до цефеиды, если из наблюдения известны видимый блеск и период изменения блеска цефеиды. Цефеиды видны с больших расстояний, и, обнаруживая их в далеких звездных системах, можно определять расстояние до этих систем.

Около века длился спор о том, являются ли галактиками туманности, описанные французским астрономом Ш.Мессье, автором первого каталога туманностей и звездных скоплений (1781), и английским астрономом У. Гертелем, основоположником звездной астрономии. В 20-е гг. XX в. американский астроном Э.Хаббл по фотографиям туманности Андромеды, полученным на крупнейшем телескопе того времени, измерил характеристики отдельных звезд и дал несколько независимых оценок расстояния до нее. Так он доказал, что туманность Андромеды находится вне Млечного Пути. Затем Хаббл исследовал Вселенную до огромного расстояния — 500 млн св. лет. Хотя не все открытые туманности оказались галактиками, ученый выявил в этой области до 100 млн других галактик. В настоящее время во Вселенной обнаружены галактики разных типов, и их число примерно около 10 млрд.

В науке производятся количественные сравнения, и потому важны измерения. *Измерение* — это определение неизвестной величины известной установленной единицей меры. Однородность и изотропность пространства определяют возможность измерять расстояния с помощью единого эталона длины. *Расстоянием* между двумя точками принято называть длину отрезка, соединяющего эти точки. Измерения с помощью эталона требуют непосредственного контакта с точками, между которыми измеряется расстояние. За исключением простейших случаев измерений (с помощью линейки или рулетки) такой способ основан на кинематике — разделе механики, дающем математическое описание всевозможных видов механического движения безотносительно к тем причинам, которые обеспечивают осуществление каждого конкретного вида движения.

Для измерений длины в физике пользуются метрической системой, которая сложилась исторически и связана с периодом Великой французской революции. Первоначально *метр* был определен как одна десятиллионная доля расстояния от экватора до Северного полюса вдоль меридиана, проходящего через Париж. В 1889 г. метр официально был определен как расстояние между двумя параллельными метками, нанесенными на платиноиридиевом брус. Он хранится в строго определенных условиях в Международном бюро мер и весов в Севре, пригороде Парижа. Сравнить длину тела с эталонным метром с погрешностью до $2 \cdot 10^{-7}$ можно с помощью прецизионного микроскопа. Эта точность определяется толщиной меток. В 1961 г. в качестве эталона длины была принята длина волны в вакууме оранжевого света, испускаемого изотопом Kr-86. В точности 1 м составляет 1 650 763,73 длины волны Kr-86. В 1983 г. на XVII Генуэзской конференции по мерам и весам было принято новое определение метра: «Метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды».

55

В микромире расстояния измеряют при помощи **явлений дифракции** пучков фотонов или других элементарных частиц на кристаллических решетках. В качестве эталона в этом случае выступает длина волны, которая в соответствии с положениями корпускулярно-волнового дуализма описывает поведение частиц в пучке.

2.3. Понятие «время» в своем развитии

Время, как и пространство, имеет объективный характер. Они неотделимы от материи, связаны с ее движением и друг с другом. По выражению И.Пригожина, «для большинства основателей классической науки (и даже А. Эйнштейна) наука была попыткой выйти за рамки мира наблюдаемого, достичь вневременного мира высшей рациональности — мира Спинозы». Фактически все картины мира, рожденные точной наукой, освобождены от развития, «отрицают время».

Понимание времени, увлекающего мир в непрерывное движение, наиболее ярко выразил Гераклит (ок. 530 — 470 до н.э.): «В одну реку нельзя войти дважды», «Все течет, все изменяется», «Мир является совокупностью событий, а не вещей». Законы природы неизменны, они сохраняются в любом месте и в любое время. У Прокла (ок. 412 — 485) для большей строгости к понятию времени применены геометрические рассуждения: «Время не подобно прямой линии, безгранично продолжающейся в обоих направлениях. Оно ограничено и описывает окружность. Движение времени соединяет конец с началом, и это происходит бесчисленное число раз. Благодаря этому время бесконечно». Платон (ок. 428 — 347 до н.э.) писал: «Поскольку день и ночь, круговороты месяцев и лет, равноденствия и солнцестояния зримы, глаза открыли нам число, дали понятие о времени и побудили исследовать природу Вселенной». Архимед в трактате «О спирали» показывал, что спираль соединяет цикличность с поступательным движением. Может быть, спираль подойдет для наглядного образа времени, соединив поток и окружность?! Узор из спирали с солнцами был найден на остатках кувшинов неолита и на древнем календаре — жезле из бивня мамонта, обнаруженном недавно в Восточной Сибири. Археологи истолковывают эти узоры как отображение идеи Времени.

Первую физическую теорию времени дал Ньютон: «Абсолютное, истинное математическое время, само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». Ньютон ставил время первым среди основных понятий — пространства, массы и движения. Абсолютное время — идеальная мера длительности всех механических процессов. Как не наблюдаемо истинно равномерное движение, так и измерить время можно, только приближаясь к истинному, математическому, вхо-

56

дящему в уравнения. Абсолютное время однородно, это означает симметрию относительно сдвигов. Значит, и точка отсчета времени не имеет значения, она не меняет длительность. То же можно сказать и о пространственных симметриях классической механики. В пространстве нет выделенных ни точек, ни направлений, т. е. оно однородно и изотропно. Ньютон не только исключил время из своей картины Вселенной, но и утвердил его в сознании как внешний параметр. Стало возможным рассматривать непрерывные периодические процессы равной длительности для построения модели, легко вводить метрику времени. Это позволило построить всю систему мира, подтвердить впечатляющие предсказания теории Ньютона для Вселенной.

Непрерывность времени означает, что между двумя моментами времени, как близко бы они не располагались, всегда можно выделить третий. (Сегодня у науки нет достаточных оснований, чтобы говорить о дискретности времени.) Особым свойством времени является его однонаправленность или необратимость. Это свойство времени рассматривают как следствие второго Начала термодинамики, или Закона возрастания энтропии. В классической физике существует абсолютное, «вселенское время». Г.Лейбниц считал время относительным, «порядком последовательностей». Но в современной физике не существует единого «всемирного» хода времени. В биологии и геологии время рассматривали иначе. Так, основоположник геологии датчанин Н.Стенсен строил пространственные отношения не на основе движения или перемещения тел в нем, а с точки зрения временной последовательности «раньше — позже». Этот подход естествен для геолога, рассматривающего историю планеты через наслоения в камне.

Пространственно-временной континуум

Пространственно-временной континуум — новое средство характеристики физических явлений, используя которое для описания событий в природе нужно применять не два, а четыре числа, дала СТО: С точки зрения Эйнштейна, физическое пространство, постигаемое через объекты и их движения, имеет три измерения и положение объектов характеризуется тремя числами. Момент события — четвертое число. Потому мир событий есть четырехмерный континуум. У Эйнштейна не имеет смысла деление этого мира на время и пространство, поскольку описание мира событий «посредством статической картины на фоне четырехмерного пространственно-временного континуума» более удобно и объективно. Измеренное значение времени оказалось зависимым от движения наблюдателей.

Время для движущегося наблюдателя течет медленнее, чем для неподвижного: $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$. Этот эффект замедления может

быть замечен лишь для скоростей, сравнимых со скоростью света в вакууме c . По выражению Вернадского, СТО «отрицала только

57

независимое от пространства, абсолютное время, но не придавала ему никаких новых свойств — принимала его тем же изотропным, аморфным временем, каким понимал его Ньютон». Таким образом,

традиция классической физики сохранена.

Обсудим явление, известное как «парадокс близнецов». Пусть, например, А. и В. — близнецы. В. улетает с большой скоростью в далекое космическое путешествие, А. остается на Земле. Через какое-то время В. возвращается и оказывается моложе А. Если v — скорость, с которой путешествовал В., а τ_0 — время, которое прошло на Земле за время его путешествия, то время, которое прошло на борту его корабля $\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. И чем больше скорость v , тем значительнее будет разница. Причем тот, кто почувствовал ускорение, тот и окажется моложе. Например, собственное время жизни π^+ -мезона составляет $2,5 \cdot 10^{-8}$ с. Если бы не было релятивистского замедления времени, то до распада такая частица проходила бы в среднем расстояние $(2,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) \approx 7 \text{ м}$. Но, как показывает опыт, проведенный на ускорителях, эти частицы способны проходить значительно большие расстояния, если их скорость сравнима со скоростью света. Поэтому всегда необходимо уточнять, относительно какого тела и связанной с ним системы координат оно рассматривается.

Задержка времени, предсказанная СТО, подтверждается μ -мезонами, распадающимися во время полета к Земле от места возникновения в верхних слоях атмосферы. Это показывают детекторы, установленные на воздушных шарах, на поверхности Земли и в шахтах (рис. 2.3, а). Согласно СТО, с увеличением относительной скорости, кроме замедления времени, уменьшаются линейные размеры тел вдоль направления движения и увеличивается масса (L_0 и M_0 — линейные размеры и масса тела в состоянии покоя):

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}; M = M_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

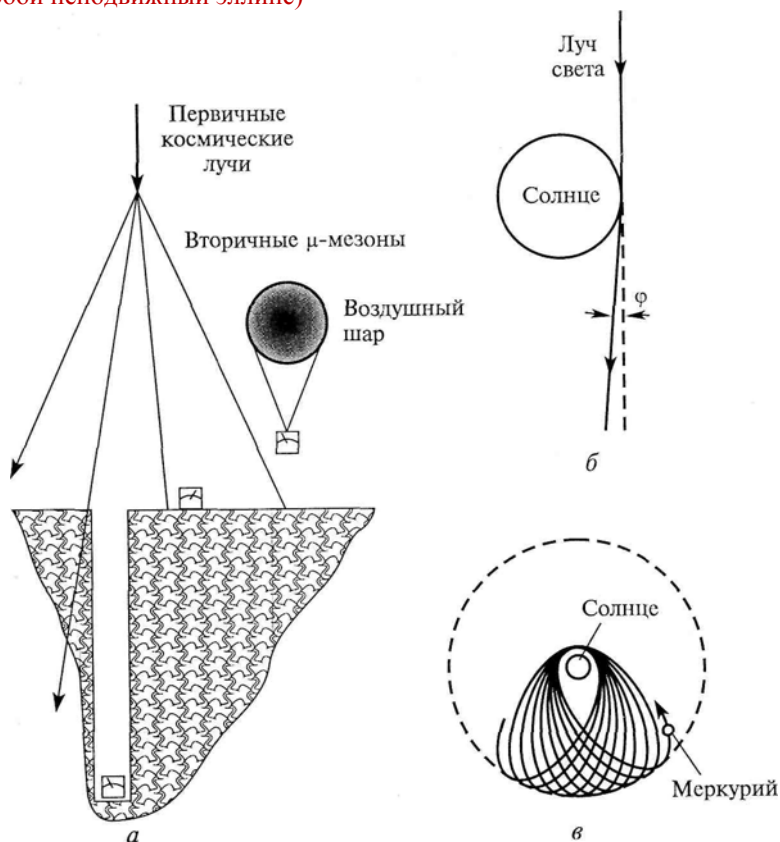
Свойства пространства-времени в ОТО

Свойства пространства-времени в ОТО зависят от распределения тяготеющих масс, и движение тел определяется *кривизной* пространства-времени (рис. 2.3, б, в). Но влияние масс сказывается только на метрических свойствах часов, так как меняется лишь частота при переходе между точками с разными гравитационными потенциалами. Иллюстрацией *относительного хода* времени, по мнению Эйнштейна, могло бы стать обнаружение процессов вблизи предсказанных им черных дыр.

А. Эйнштейн в фундаментальных законах физики не допускал необратимости, его беспокоила направленность времени, связанная со вторым началом термодинамики. Хотя решение, соответствующее нестационарной Вселенной, полученное А.А.Фридманом из его космологических уравнений, позднее было подтверждено наличием красного смещения в спектрах далеких галактик, установленного Э.Хабблом, Эйнштейн считал гипотезу взрывающейся Вселенной временной и относился к ней с недоверием. В 60 — 80-е гг. XX в. отношение к эволюционным процессам

Рис. 2.3. Экспериментальные подтверждения теории относительности, приведшие к изменению свойств времени и пространства:

а — схема установки для доказательства задержки времени у движущихся мезонов, предсказанная СТО, в гравитационном поле Земли; *б* — искривление линии распространения света вблизи Солнца, предсказанное ОТО и подтвержденное наблюдениями ($\varphi = 1,75$ угл. с); *в* — схема прецессии орбиты Меркурия, объясняемая ОТО (иначе орбита представляла бы собой неподвижный эллипс)



стало меняться, мир предстал существенно нелинейным с необратимыми процессами в своей основе. Поэтому и времени в новой эволюционной картине мира уготована иная роль.

Для определения момента произошедшего события обычно достаточно одного измерения, указания только одного числа. Такое восприятие времени настолько привычно, что большее число измерений для времени трудно вообразить. Но наблюдаемые события происходят от прошлого к будущему. И это качественно отличает временное измерение от пространственного, причем для любого наблюдателя в данной точке пространства последователь-

59

ность событий сохраняется. Можно сказать, что понятия «прошлое» и «будущее» в данной точке пространства есть понятия абсолютные. Для пространственных осей нет такого выделения направлений, и поворот на 180° вокруг оси, перпендикулярной линии, которая соединяет два одновременных события, переводит происходящее слева от наблюдателя событие в правое. То есть понятия «правое» и «левое» относительно для одновременных событий. Направленность времени тесно связана с пониманием причинности: причина должна предшествовать следствию. Это свойство времени относится к классу нерешенных проблем в физике и во всем естествознании, в дальнейшем мы убедимся, что по этой причине в науке существует ряд парадоксальных ситуаций.

2.4. Временные масштабы во Вселенной. Методы измерения времени

История человечества — от появления первобытного человека до наших дней — кажется (весьма и весьма условно) точкой на фоне мировой эволюции. Очевидно, что вопрос «когда?» связан с вопросом «где?». По Платону, мир совершенен и потому должен быть неизменным. Тогда бы вопрос о времени не имел смысла, так как не было бы начала отсчета. На современном уровне развития науки представляется, что счет времени Вселенной начат с события, произошедшего почти 15 млрд лет назад, после которого Вселенная расширяется. Время измеряют путем наблюдения за периодически повторяющимися процессами.

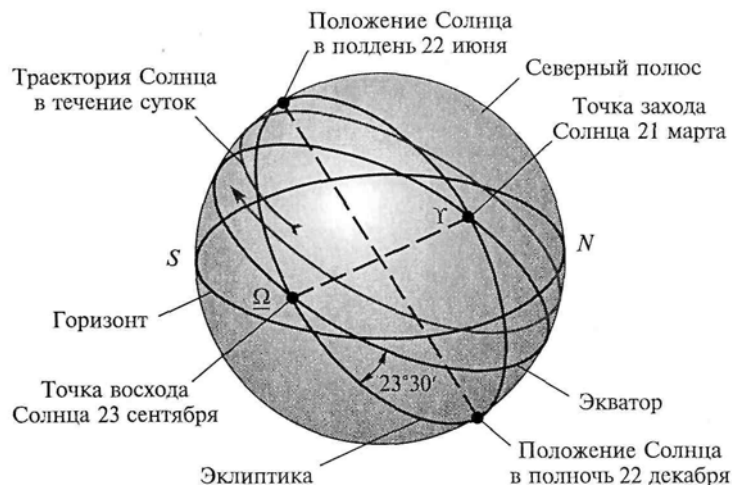
Сутки

Сутки были первой естественной единицей меры времени, регулировавшей труд и отдых. Сначала сутки делили на ночь и день и только много позже — на 24 часа. Сейчас понятно, что периодическая смена дня и ночи происходит из-за вращения Земли вокруг своей оси. Есть два вида солнечного времени — истинное и

среднее солнечное. Промежуток времени между двумя последовательными кульминациями центра Солнца на одном и том же меридиане, равный периоду вращения Земли, называют *истинными солнечными сутками*. Но измерять ими время тоже неудобно, они летом короче на 51 с, чем зимой. Дело в том, что Земля движется по орбите вокруг Солнца неравномерно: вблизи перигелия (в январе) ее скорость наибольшая, а вблизи афелия (летом) — наименьшая (второй закон Кеплера). Потому и истинные солнечные сутки непостоянны (рис. 2.4), и вместо них используют сутки, равные средней длине истинных солнечных суток за год. Кроме того, из-за движения Солнца по эклиптике происходит видимое годовое движение Солнца с запада на восток, т.е. в направлении против вращения. Ввели понятие среднего Солнца, звездных суток и звездного времени.

60

Рис. 2.4. Схема суточного и годового движения Солнца (плоскость горизонта проведена для наблюдателя средних широт Северного полушария)



Звездные сутки определяются периодом вращения Земли вокруг своей оси относительно любой звезды. Но звезды тоже имеют собственные движения. Условились определять длительность звездных суток как промежуток времени между двумя последовательными кульминациями точки весеннего равноденствия, находящейся на одном и том же меридиане. Оказалось, что из-за прецессии средние звездные сутки уменьшаются на 0,0084 с, и они на 3 мин 56 с короче средних солнечных. Звездное время очень важно в астрономии, оно определяет положение светил, а в обыденной жизни используется солнечное время. И за среднюю единицу солнечных суток приняли 24 ч 3 мин 56,5554 с звездного времени. Измерение солнечного времени основано на видимом суточном движении Солнца.

Истинный полдень наступает на разных меридианах Земли в разное время, и для удобства принято соглашение (по идее канадского ученого С. Флешинга) о делении земного шара на *часовые пояса*, которые проходят через 15 градусов по долготе, начиная с меридиана Гринвича. Это — Лондонский меридиан нулевой долготы, и пояс назван нулевым (западноевропейским), время 1-го часового пояса (Рим, Берлин, Осло) — средневропейским, а 2-го — восточноевропейским. Всего часовых поясов — 24, внутри каждого пояса время принимается одинаковым — *среднепоясным*. Но территориальное деление не совпадает с делением на часовые пояса, и часто их проводят приблизительно по рекам или административным границам. Примерно на 180-градусном меридиане происходит по договору линия перемены дат, т.е. день начинается в Японии и на Камчатке, потом в Сибири, Китае и Австралии, затем в Европе и Африке, потом — в Америке и заканчивается на Аляске. При пересечении линии изменения дат на самолете в восточном направлении одно и то же число приписывается двум дням, а в западном — один день теряется. Кроме того, в ряде стран указами вводят часовой сдвиг — переход

61

на зимнее или летнее время. Согласованное решение о введении поясного времени приняли на Международной конференции в 1883 г. В нашей стране, простирающейся на 11 часовых поясов, поясное время ввели в 1919 г., взяв за основу международную систему часовых поясов и существовавшие тогда административные границы. Затем были некоторые изменения.

Секунда

Секунда — общепринятая единица времени, примерно с периодом 1 с бьется пульс человека. Исторически эта единица связана с делением суток на 24 ч, 1 ч — на 60 мин, 1 мин — на 60 с. До 1964 г. международная единица времени была основана на суточном вращении Земли. Но продолжительность суток оказалась подверженной разным вариациям и зависящей от положения Земли на орбите при ее движении вокруг Солнца. Изменения скорости вращения на протяжении года составляют около 10^{-8} с. Поэтому за стандарт были выбраны средние солнечные сутки 1900 г. Но солнечные сутки примерно на 4 мин длиннее звездных, т.е. времени поворота на 360° . К 1971 г. в результате накопления отклонений разница достигла полминуты, поэтому в единицу измерения времени должны быть внесены соответствующие поправки.

Потребность в часах с более высокой точностью хода была вызвана развитием экспериментального естествознания. В XVII в. астрономы продолжали пользоваться водяными и песочными часами: Ньютон занимался усовершенствованием водяных часов; Тихо Браге пользовался песочными или ртутными часами, поскольку механические часы не давали нужной точности; Галилей проводил свои опыты с падением тел при помощи водяных часов. Галилей и Гюйгенс считаются изобретателями маятниковых часов. Это изобретение не только открыло новую эпоху в хронометрии, но и имело далеко идущие последствия для развития науки. Галилей обнаружил изохронность колебаний маятника, и поиск колебательных динамических систем привел к более точным стандартам в измерении времени. В честь изобретения маятниковых часов XVIII в. часто называют «веком часов».

Если маятниковые часы могли обеспечить точность хода 0,1 с, то к началу XX в. применение свободного анкерного хода повысило точность маятниковых часов на порядок. Использование средств электротехники и двух маятников позволило повысить точность астрономических часов в 1921 г. до 0,001 с. Применение особо прочных сплавов для изготовления пружин позволило повысить точность и бытовых часов. Наибольший прогресс в повышении точности хода (на 2 — 3 порядка) был достигнут при использовании электронной схемы в сочетании с новыми осцилляторами — кварц, камертон, атом, молекула. Изобретение и усовершенствование кварцевых часов в 20 — 30-е гг. связано с развитием пьезотехники, что позволило довести точность измерения секунды до $(3 — 4) \cdot 10^{-11}$ и дало возможность уловить малые колебания вращения Земли вокруг оси.

Но есть и другие устойчивые источники колебаний, способные длительное время поддерживать определенную частоту колебаний. Развитие радиочастотной спектроскопии и электроники дало

62

возможность создать атомные часы и перейти к измерению с помощью атомных стандартов, основанных на колебаниях определенного типа в атоме цезия, что позволило замечать отклонение от равномерности хода с погрешностью до 10^{-10} . *Атомная секунда* — интервал времени, в течение которого совершается почти 10 млрд колебаний атома Cs. Это число согласуется с наилучшими астрономическими определениями секунды. В 1967 г. в качестве эталона был выбран изотоп ^{133}Cs . В настоящее время эталоном времени является водородный мазер, изготовленный в Швейцарии, с шириной спектра 1 Гц, стабильность которого доведена до 10^{-12} . С 1 января 1971 г. все страны мира перешли на отсчет микровремени с помощью атомных часов. Существуют уже и более стабильные стандарты времени (и частоты) — система «оптические часы», созданная из цепочки сверхстабильных лазеров в Новосибирске, обеспечивает стабильность на два порядка лучшую. Это даст погрешность хода 1 с в 1 млн лет! Развитие полупроводниковых радиоэлектронных приборов открыло перспективы в создании электронных и электронно-механических наручных часов с высокой точностью хода.

Календарем

Календарем называют систему отсчета длительных промежутков времени, в которой установлен определенный порядок счета дней в году и указано начало отсчета. Основной предпосылкой появления календаря в древности было развитие связи трудовых процессов с ритмикой природы — сменой дня и ночи, фаз Луны, времен года и т.п., отсюда и необходимости измерять время. Еще древние заметили неукоснительную периодичность передвижения по небосводу Солнца, Луны и звезд. И эти первые наблюдения предшествовали зарождению одной из самых древних наук — астрономии. Астрономия и положила в основу измерения времени три фактора, характеризующих движения небесных тел: вращение Земли вокруг своей оси, обращение Луны вокруг Земли и движение Земли вокруг Солнца. Трудности календаря связаны с тем, что не удастся найти простое соотношение между временем оборота Земли вокруг оси и вокруг Солнца. То же относится и к счету дней в лунном месяце. В западных странах наибольшее распространение получили *солнечные* и *лунные* календари. В восточных странах в календарные циклы включены астрономические явления, связанные с движением Юпитера и Сатурна. Поэтому при составлении календарей в странах Восточной Азии выделен период в 12 лет — период обращения Юпитера вокруг Солнца, при этом год в таких календарях может содержать разное число суток — 353, 354, 355, 383, 385. Выделен также 19-летний лунно-солнечный и 30-летний сатурновый циклы, входящие в 60-летний циклический календарь. Существуют календари, построенные и на движении других планет. С календарем — системой упорядоченного счета времени — связана история человеческой культуры.

63

Известно много календарных сооружений и устройств, оставшихся от древних цивилизаций. Среди них Перуанский календарь, открытый в 1939 г. с борта самолета, — огромные четкие рисунки протяженностью в десятки километров. Радиоуглеродный анализ определил возраст находки — 525 лет. Древнейший каменный календарь — английский Стоунхендж — относится к началу бронзового периода (III — II тыс. лет до н. э.). Это огромные каменные монолиты высотой более 5 м, стоящие в строгом порядке, причем центральный камень ориентирован точно на положение восхода Солнца в день летнего солнцестояния, а четыре опорных камня — на точки равноденствий. Интересны передвижные календари: персидский, вавилонский, греческий.

Внешняя проблема календаря связана с необходимостью согласования *длины года с длиной суток*. Были разработаны разные варианты поправок, но существенную реформу календаря провел Юлий Цезарь, изучивший во время пребывания

в Египте солнечный календарь. Годовой путь Солнца в Древнем Вавилоне делили на 12 частей по 30° с созвездиями (пояс Зодиака). В этом делении — влияние вавилонской системы счисления, от которой осталось деление окружности на 360°, градуса — на 60 мин, минуты — на 60 с. Во II в. до н. э. александрийский астроном Гиппарх ввел понятие о начале весны, лета, осени и зимы как о моментах вступления Солнца в соответствующий знак Зодиака Овна, Рака, Весов и Козерога. Но из-за прецессии (медленной — по 50 угловых секунд в год) точка весеннего равноденствия вскоре перешла в созвездие Рыб, а в течение ближайших 150 лет переместится в зону следующего созвездия — Водолея. Кроме того, сейчас годовой путь Солнца по эклиптике проходит уже через 13 созвездий, но для сохранения традиции деления на 12 равных зон часто созвездие Змееносца объединяют с созвездием Скорпиона.

В Италии 3000 лет назад был распространен сельскохозяйственный календарь, в котором год длился 295 суток (период активной жизнедеятельности растительного мира на широтах Италии 300 дней) и начинался с весеннего месяца, в котором день становился равным ночи (сейчас это 21 марта). Год делили на 10 лунных месяцев, отличающихся по номерам. Несовершенство этого солнечно-лунного календаря накапливало ошибки, и в начале VII в. до н. э. была проведена реформа — добавили еще 2 месяца, т.е. продолжительность года стала не 295, а 354 суток. Кроме того, были введены названия некоторых месяцев. Так, первый месяц называли мартом в честь Марса — бога войны, культ которого также был связан с земледелием, второй — апрелисом, что в переводе означает «согретый солнцем» и «раскрывать», «расцветать» (время раскрытия почек и цветения первых цветов). В календарях и традициях многих народов отражены особенности римского календаря, связанные с месяцами и толкованием их названий. В апреле в Японии красочно отмечают день цветения сакуры, древнерусское название этого месяца — цветень. Месяц майнус (май) был назван в честь богини гор и плодородия Майи, в Древней Руси он — травень. Четвертый месяц — юниус (июнь) — получил свое название в честь древне-

64

римской богини плодородия Юноны, жены Юпитера. Как и в римском календаре, он связан с богом света — Юпитером, в древнерусском календаре — это светозар, т.е. озаренный светом. Многие названия месяцев древнеримского календаря (сентябрь — декабрь) вошли в европейские календари. Существует во всех странах деление года не только на месяцы и сутки, но и на недели.

Внутренняя структура календаря связана с соотношением месяцев и дней недели с числами месяцев. *Семидневная неделя* — период, примерно соответствующий $\frac{1}{4}$ лунного месяца, или длительности между четырьмя фазами Луны. Лунный месяц (синодический) в среднем равен 29,53 средних суток. Древним людям были известны 7 планет, к которым относили Солнце, Луну, Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер, Сатурн, и каждой из них посвящали один день недели. Это связано с традициями шумерской астрологии и отражено в культе числа «семь». Поэтому система условных астрономических знаков, изображающих небесные светила и дни недели, одинакова. Недельный подсчет времени зародился в странах Восточной Азии — Китае, Японии, Вьетнаме. В этих странах после дней Солнца и Луны (воскресенья и понедельника) в соответствии с древнекитайской натурфилософией, по которой все сущее связывалось с пятью стихиями или элементами природы (огнем, водой, деревом, металлом, землей), следуют дни этих стихий. Известны также недели, состоящие из 5 (пятидневки) и 10 (декады) суток.

Относительно совершенная система счета времени уже была в Египте 5 тысяч лет назад: год имел 12 месяцев по 30 дней каждый и дополнительных 5 дней, т.е. 365 дней. Такой счет времени как-то устранял недостатки солнечно-лунного римского календаря. Но продолжительность года — промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия — равна 365 сут 5 ч 46 с, и начало года смещалось ко все более ранней дате. Юлий Цезарь пригласил в Рим александрийского астронома и математика Созигена, и с его помощью ввел *правило високосов*, добавляющее 1 сутки за 4 года. Введенный Цезарем в 46 г. до н. э. *юлианский календарь* (старый стиль) получил распространение в странах Европы. В нем начало года было определено с 1 января, а год насчитывал 365,25 суток, что несколько превысило их продолжительность. В результате разница (11 мин 23,9 с) накапливалась и составляла ошибку в 1 сутки за 128 лет. Никейский церковный собор 325 г. принял юлианский календарь и установил единые для всей империи христианские праздничные дни. Задача реформы календаря состояла в исправлении накопившейся ошибки в равноденствиях, но менять правила Никейского собора долго не решались. В 1514 г. календарная коллегия запрашивала мнение польского астронома Н.Коперника, но он ответил, что пока длина года известна недоста-

65

точно точно. Но в 1581 г. ватиканский астроном Игнатий Данти убедил Римского папу Григория XIII воспользоваться проектом итальянского врача, астронома и математика Алоизия Лилио. Так был введен *григорианский календарь* (новый стиль) с 15 октября 1582 г., т.е. после 4 октября наступило 15-е, а не 5-е. Уточнение юлианского календаря касалось только улучшения его внешней структуры — приближения к значению 365,2422 сут — вводилось 97 високосных лет в каждые 400 лет, т.е. число високосов было уменьшено на 3. Годы столетий, число сотен которых не делится на 4, считаются простыми (1700, 1800, 1900), а годы, у которых число сотен делится на 4, — високосными (1600, 2000 и т.д.). Ошибка в 1 сут в этом календаре накапливается лишь за 3323 года. Подобную систему счета времен (с правилом високосов) предлагал еще в XI в. иранский ученый и поэт Омар Хайям. Григорианский календарь в течение XVI в. постепенно принимался сначала в странах католических, в XVIII в. — в странах протестантских; в 1873 г. — в Японии, в 1911 — в Китае, в 1918 — в Советской России, в 1924 — в Греции и Югославии, в 1925 — в Иране, в 1926 — в Турции, в 1928 — в Египте. В зависимости от времени введения приходилось добавлять к дате 10, 11, 12 или 13 суток.

Но проблема улучшения календаря все-таки остается. Она связана с несоизмеримостью трех основных промежутков времени, заимствованных у природы: средних солнечных суток, лунного месяца и солнечного (тропического) года. Недостатки современного григорианского календаря заключаются именно в

несовершенстве его внутренней структуры: дни недели не согласованы с числами месяцев в разных годах и даже в одном; полугодия, кварталы и месяцы содержат разное число суток, и начала разных месяцев приходится на разные дни недели. Отсюда неудобства планирования и учета.

Эрой (от лат. *aera* — исходное число) называется начальная дата системы летосчисления и последующая система. У многих народов эры связывали с временем царствования какой-либо династии: династии фараонов (3100 — 3066 гг. до н.э. в Египте), династии императоров (в Китае или Японии). Эра греческих олимпиад была рассчитана с 1 января 776 г. до н.э., причем было принято два цикла: по 235 (19 лет) и по 940 (около 76 лет) лунных месяцев. В Италии эра основания города Рима начинается с 22.04.753 г. до н. э. Народы Востока, исповедующие ислам, начинают отсчет от хиджры (в пер. — переселение), момента переселения мифического Мухаммеда (Магомета) из Мекки в Медину, которое произошло 16 июня 622 г. н.э., в пятницу, если считать по первому вечернему восходу серпа молодой Луны после новолуния. Современное летосчисление в Европе и Америке ведется от мифической даты «рождения Христова», которое произошло в 753 г. после основания Рима (как считал христианский монах Ексигуус в 525 г.).

66

В большинстве стран она известна под названием А. Д. (Anno Domini), что значит «год господина». В допетровской России годы считались от сотворения мира (как в Византии — с началом 01.09.5508 г. до н. э.), а в 1700 г. перешли на начало года с 1 января и на счет от рождения Христова (Р.Х., или новая эра). Проблема реформы календаря обсуждается уже столетие, предлагаются разные варианты, но сделать выбор весьма сложно, так как необходимо согласие народов разных культур.

Так, 2000 г. — это 2754 г. от основания Рима, мусульманский 1378 г. хиджры, иудейский — 5760 г., буддистский — 2544 г., китайский — 4697 г. Новый год во многих календарях приходится на разные даты. В лунно-солнечно-юпитерном календаре Вьетнама, Китая и Японии он наступает от 13 января до 24 февраля, в Израиле — между 6 сентября и 5 октября, в Иране — в день весеннего равноденствия (20 — 22 марта). В лунных календарях мусульманских стран новогодняя дата может приходиться на любой день года. К примеру, в Афганистане и Иране 21.03.1980 отмечалось наступление 1359 г. В Японии фиксация дат такова: порядковый номер дня и номер лунного месяца, затем порядковый номер эры (года правления императора) и порядковый номер года девиза. Есть правила и таблицы перевода дат на григорианский календарь, уже принятый во многих странах.

Возраст Вселенной всего лишь в 2,5 раза превышает возраст Солнца.

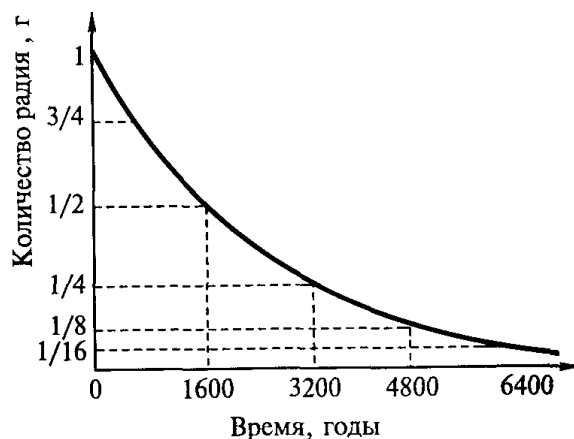
Возраст Вселенной всего лишь в 2,5 раза превышает возраст Солнца. Как можно измерить такие огромные времена, не сопоставимые с жизнью не только человечества, но и всего живого на Земле?

Метод радиоактивного распада — важнейший метод определения больших временных диапазонов в последние полвека. Известно, что все живое получает двуокись углерода из воздуха. Некоторая часть углерода радиоактивна, и любой образец вещества, изготовленный из живого, содержит эту же долю радиоактивного углерода. Измеряя скорость отсчетов для какого-то образца, можно вычислить, сколько лет прошло с того времени, когда данный кусок доски был живым деревом. В детекторе «свежее» вещество даст 16 отсч./мин на каждый грамм углерода, а за 5600 лет оно даст только 8 отсч./мин на 1 г и т.д. Многие археологические находки «датированы» определенным количеством оставшегося в их веществе радиоактивного углерода. По его количеству можно определить возраст до 25 000 лет.

По периоду полураспада элементов можно заглянуть в прошлое: за это время половина вещества превращается в другой элемент, за следующий период полураспада — еще половина и т.д. (рис. 2.5). Так как нет радиоактивных элементов с периодом полураспада в 10^6 — 10^8 лет, то возраст Солнечной системы — около 10^8 лет. Из соотношения других изотопов ^{235}U и ^{238}U возраст Солнечной системы был уточнен и составил $5 \cdot 10^9$ лет. Оценка возраста Вселенной, связанная с моделями эволюции, позволяет заключить, что

67

Рис. 2.5. Закон радиационного распада, используемый как метод для определения больших значений времени



Солнечная система была образована в результате взрыва звезды, по меньшей мере, второго поколения.

Пыль после взрыва скупивалась в вихри, группировалась под действием гравитации. Нашему Солнцу подобный взрыв уже не грозит — согласно моделям развития звезд такого типа примерно через 5 млрд лет оно расширится, потом сожмется и превратится в остывающего карлика. Существующая ныне Вселенная образовалась примерно 15 млрд лет назад и с тех пор расширяется.

Приведем следующие временные интервалы: сутки — $8,64 \cdot 10^4$ с; год — $3 \cdot 10^7$ с; средняя продолжительность жизни человека — $2 \cdot 10^9$ с; средний возраст египетских пирамид — $1 \cdot 10^{12}$ с; существование жизни на Земле — $7,5 \cdot 10^{16}$ с; время появления: первобытного человека — $5 \cdot 10^{13}$ с; млекопитающих — $5 \cdot 10^5$ с; земноводных — $7,5 \cdot 10^{15}$ с; время существования человечества — $1 \cdot 10^{14}$ с; возраст Земли — $1,5 \cdot 10^{17}$ с; возраст Вселенной — $5 \cdot 10^{17}$ с.

Обратимся к временным интервалам, меньшим 1 с. Период колебаний звуковой волны достигает 0,001 с, радиоволны — 10^{-6} с. Меньшие промежутки времени связаны с расстояниями в микромире, и их можно измерять через скорость света. За 10^{-9} с свет проходит расстояние 30 см, соответственно, можно рассчитать, что расстояние, равное размеру атома, свет проходит за 10^{-18} с, атомного ядра — за 10^{-24} с. Колебания молекул совершаются за период в 10^{-12} с, атома — 10^{-15} с, ядра — 10^{-21} с.

2.5. Структурные уровни организации материи

Современное научное знание основано на структурности материи и системном подходе. *Система* — это определенная целостность, проявляющая себя как нечто единое по отношению к другим объектам или условиям. В понятие системы входит совокупность элементов и связей между ними. Под *элементом системы* понимается компонент системы, который далее, внутри данной

68

системы, рассматривается как неделимый, под структурной организацией материи — ее *иерархическое строение* — любой объект от микрочастиц до организмов, планет и галактик является частью более сложного образования и сам может считаться таковым, т.е. состоящим из неких составных частей. Доступная для наблюдения часть мира простирается в пространстве от 10^{-17} до 10^{26} м, а во времени — до $2 \cdot 10^{10}$ лет.

Молекула

Молекула — наименьшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства. Молекулы состоят из атомов, соединенных химическими связями. Молекула инертных газов — это просто атомы, а у других газов она состоит из двух или более атомов. Молекулы, состоящие из многих повторяющихся групп атомов, называют *макромолекулами*. Но свойства веществ определяются не только составом молекул, но и их структурой. В молекуле выделили структурные блоки, каждый из которых обладает своей уникальной реакционной способностью. Теория химического строения молекул была создана А.М.Бутлеровым, а позже подтверждена квантово-механическими расчетами. Под *молекулярной структурой* понимается сочетание атомов, которые имеют закономерное расположение в пространстве и связаны между собой химической связью с помощью валентных электронов.

Атом

Атом — составная часть молекулы. Существование структуры атома было доказано открытием в 1897 г. Дж.Дж.Томсоном электрона, называемого атомом электричества. Заряд электрона Томсон определил уже в 1898 г., а через 5 лет предложил модель строения атома. В 1903 г. Э. Резерфорд нашел посредством опытов с отклонением α -лучей, что отношение заряда к массе по знаку и величине соответствует дважды ионизированным атомам гелия. Опыты показали, что в атомах существуют положительно заряженные частицы — ядра, в которых сосредоточена почти вся масса атома и которые имеют размеры 10^{-14} м, тогда как размеры самого атома порядка 10^{-10} м. Была предложена «планетарная» модель атома. Исследования многих ученых позволили сделать вывод, что место элемента в Периодической системе, его атомный номер определяются числом элементарных зарядов ядра атома. Периодичность же свойств элементов объяснила только квантовая механика.

Вслед за электроном были открыты *элементарные частицы*: протон, нейтрон и другие (сейчас их известно более трехсот) и соответствующие им античастицы. Для упорядочения их группируют по времени жизни, участию в разных типах фундаментальных взаимодействий и другим признакам.

Кварковая модель строения элементарных частиц существует с 1964 г. (Г.Цвейг, М.Гелл-Ман). Сначала *кварки* рассматривались как гипотетические структурные элементы с дробным электрическим зарядом, но они заняли в квантовой хромодинамике роль

69

основных частиц. Открытие возможности превращений одних элементарных частиц в другие показывает, что они тоже имеют сложную внутреннюю структуру. Ее описывают с помощью так называемых «виртуальных» частиц, так как эту внутреннюю структуру невозможно описать через другие частицы.

Микромир — мир очень малых микрообъектов, размеры которых от 10^{-10} до 10^{-18} м, а время жизни может быть до 10^{-24} с.

Микромир — мир очень малых микрообъектов, размеры которых от 10^{-10} до 10^{-18} м, а время жизни может быть до 10^{-24} с. Испускание и поглощение света происходит порциями, квантами, получившими название

фотонов. Это мир — от атомов до элементарных частиц. При этом для микромира свойственен корпускулярно-волновой дуализм, т.е. любой микрообъект обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Описание микромира опирается на принцип дополнительности Н. Бора и соотношения неопределенности Гейзенберга. Мир элементарных частиц, которые долго считали элементарными «кирпичиками», подчиняется законам квантовой механики, квантовой электродинамики, квантовой хромодинамики. Квантовое поле носит дискретный характер.

Макромир — это мир объектов, соизмеримых с человеческим опытом. Размеры макрообъектов измеряются от долей миллиметра до сотен километров — от секунд до лет.

Макромир — это мир объектов, соизмеримых с человеческим опытом. Размеры макрообъектов измеряются от долей миллиметра до сотен километров, а времена — от секунд до лет. Поведение же макроскопических тел, состоящих из микрочастиц, описывается классической механикой и электродинамикой. Материя может пребывать как в виде вещества, так и в виде поля, причем вещество дискретно, а поле — непрерывно. Скорости распространения поля равны скорости света, максимальной из возможных скоростей, а скорости движения частиц вещества всегда меньше скорости света. **Мегамир** — мир объектов космического масштаба: планеты, звезды, галактики, Метагалактика. Кроме них во Вселенной присутствуют материя в виде излучения и диффузная материя. Последняя может занимать огромные пространства в виде гигантских облаков газа и пыли — газо-пылевых туманностей. В звездах сосредоточено 97 % вещества нашей Галактики — Млечный Путь. В других галактиках распределение материи примерно такое же. В Галактике почти все звезды являются двойными, а всего их более 120 млрд. Диаметр Галактики порядка 100 тыс. св. лет; наше Солнце — рядовая звезда типа «желтый карлик», находится на краю утолщенного диска, в 5 пк от края. Но имеются звездные системы, состоящие из 3 — 5 звезд, часто окруженные диффузной материей. Звездные скопления могут состоять из нескольких сотен отдельных звезд, а шаровые скопления — из сотен тысяч. Галактики (их до 10 млрд), наблюдаемые с Земли как туманные пятнышки, имеют разную форму: спиральную, неправильную, эллиптическую. Они образуют скопления из нескольких тысяч отдельных систем. Систему галактик называют Метагалактикой. Мегамир описывается законами классической механики с поправками, которые были внесены теорией относительности.

70

2.6. Понятие «поле». Уравнения Максвелла. Свет — электромагнитная волна

Понятие «поле» отражает тот факт, что электрические и магнитные силы действуют с конечной скоростью на расстоянии, взаимно и непрерывно порождая друг друга. Фарадей использовал (1840) идею всеобщего сохранения и превращения энергии, хотя сам закон еще не был открыт.

В лекциях (1845) Фарадей говорил не только об эквивалентных превращениях энергии из одной формы в другую, но и о том, что он давно пытался «открыть прямую связь между светом и электричеством» и что «удалось намагнитить и наэлектризовать луч света и осветить магнитную силовую линию». Ему принадлежит методика изучения пространства вокруг заряженного тела с помощью пробных тел, введение для изображения поля **силовых линий**. Он описал свои опыты по вращению плоскости поляризации света магнитным полем. Изучение взаимосвязи электрических и магнитных свойств веществ привело Фарадея не только к открытию пара- и диамагнетизма, но и к установлению фундаментальной идеи — идеи поля. Он писал (1852): «Среда или пространство, его окружающие, играют столь же существенную роль, как и сам магнит, будучи частью настоящей и полной магнитной системы».

Поле

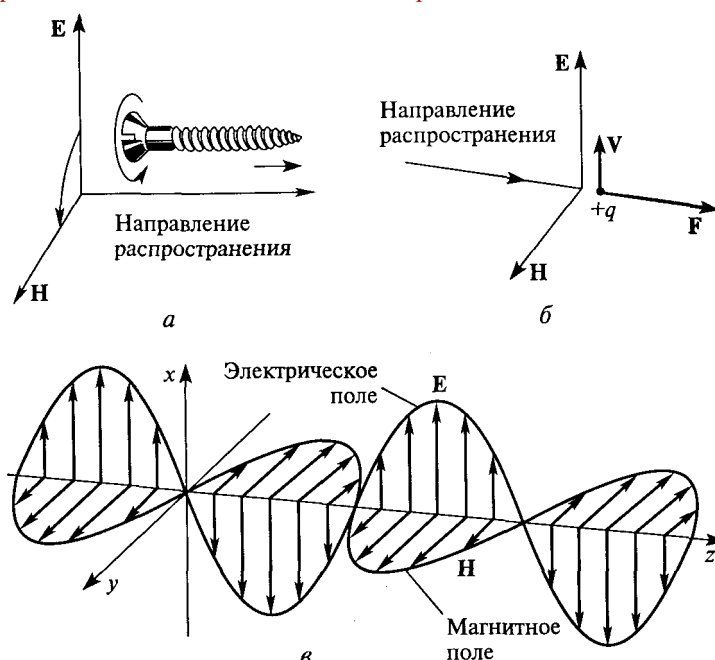
Поле — это то, что излучается, распространяется с конечной скоростью в пространстве, взаимодействует с веществом. Фарадей сформулировал идеи поля как новой формы материи, а записи вложил в запечатанный конверт, завещав вскрыть его после своей смерти (этот конверт был обнаружен только в 1938 г.). Фарадей показал, что электродвижущая сила индукции E возникает при изменении магнитного потока Φ (размыкании, замыкании, изменении тока в проводниках, приближении или удалении магнита и пр.). Максвелл выразил этот факт равенством: $\mathbf{E} = -\partial\Phi/\partial t$. По Фарадею, способность индуцировать токи проявляется по окружности вокруг магнитной равнодействующей. Максвелл записывает это в векторной форме (рис. 2.6, а): $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$, т. е. переменное магнитное поле окружено вихревым электрическим полем, а знак минус связан с правилом Ленца: возникает индукционный ток такого направления, чтобы препятствовать изменению, порождающему его. Обозначение rot — от англ. *rotor* — вихрь. В 1846 г. Ф. Нейман нашел, что на создание индукционного тока надо затратить определенное количество энергии.

Максвелл математически обработал идеи Фарадея, связав в своих уравнениях все экспериментальные законы, полученные в области электрических и магнитных явлений. Закон Ампера имеет дело с магнитным полем вдоль замкнутого контура с током (рис. 2.6, б). Аналог закона Кулона в электростатике — закон Био—Савара выглядел в векторной форме так: $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$. Суммируя токи

71

Рис. 2.6. Электромагнитное поле:

а — к пояснению правила правого буравчика; *б* — схема действия поля на заряженную частицу; *в* — направления линий напряженностей электрического и магнитного полей электромагнитных волн



и поля для показа того, что магнитное поле создается не только током проводимости \mathbf{j} , но и током смещения, Максвелл вводит дополнительный член $\partial \mathbf{D} / \partial t$, где \mathbf{D} — вектор электрической ин-

дукции. Так, по аналогии с фарадеевой поляризацией диэлектрика он ввел в свои уравнения *поляризацию пространства*, или вакуума. Введение поляризации вакуума вызвало неоднозначную реакцию со стороны ученых, до сих пор обсуждение этого вопроса не сходит со страниц научных журналов, вызывая дискуссии. Но Максвелла это не очень волновало, так как он представлял вакуум диэлектрической средой, а не сплошной пустотой.

Он писал: «Мы не в состоянии понимать распространение во времени иначе, как только двумя способами — или как полет материальной субстанции через пространство, или как распространение состояния движения или напряжения в среде, уже существующей в пространстве... Все теории приводят к концепции среды, в которой имеет место распространение. И если мы примем эту среду в качестве гипотезы, то я считаю, что она должна занимать выдающееся место в наших исследованиях и что нам следует попытаться сконструировать рациональное представление о всех деталях ее действия». В конце жизни Максвелл написал для

72

Британской энциклопедии статью «Эфир», где были такие строки: «Несомненно, что межпланетное и межзвездное пространства не суть пространства пустые, но заняты материальной субстанцией или телом, самым обширным и, надо думать, самым однородным, какое только нам известно» (1879).

Кроме уже сформулированных двух уравнений, отражающих закон индукции и закон Био — Савара, Максвелл записал в векторной форме законы о замкнутости магнитных силовых линий $\text{div } \mathbf{B} = 0$ и о структуре электрического поля $\text{div } \mathbf{D} = \rho$ (ρ — плотность электрического заряда), а также группу уравнений для векторов электромагнитного поля, связанных с характеристиками среды: $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, и тока проводимости $\mathbf{j} = \lambda(\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{стор}})$, где $\mathbf{E}_{\text{стор}}$ — сторонняя электродвижущая сила; ϵ , μ — электрическая и магнитная проницаемости среды.

В целом система уравнений, записанная Максвеллом в векторной форме, имеет компактный вид:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D} / \partial t); \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t); \quad (2)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}; \text{ div } \mathbf{B} = 0; \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (4)$$

Входящие в эти уравнения векторы электрической и магнитной индукции (\mathbf{D} и \mathbf{B}) и векторы напряженности электрического и магнитного полей (\mathbf{E} и \mathbf{H}) связаны указанными простыми соотношениями с диэлектрической постоянной ϵ и магнитной проницаемостью среды μ . Использование этой операции означает, что вектор напряженности магнитного поля вращается вокруг вектора тока плотности \mathbf{j} .

Согласно уравнению (1), любой ток вызывает возникновение магнитного поля в окружающем пространстве, постоянный ток — постоянное магнитное поле. Такое поле не может вызвать в «следующих» областях электрическое поле, так как, по уравнению (2), только изменяющееся магнитное поле порождает ток. Вокруг переменного тока создается и переменное магнитное поле, способное создать в «следующем» элементе пространства электрическое поле волны, волны незатухающей, — энергия магнитного поля в

пустоте полностью переходит в энергию электрического, и наоборот. Поскольку свет распространяется в виде поперечных волн, можно сделать два вывода: свет — электромагнитное возмущение; электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде поперечных волн со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, зависящей от свойств среды, и поэтому невозможно «мгновенное дальное действие». Это предчувствовал Ломоносов, доказали Фарадей и Максвелл. Итак, в световых волнах колебания совершают напряженности электри-

73

ческого и магнитного полей, а носителем волны служит само пространство, которое находится в состоянии напряжения. А оно за счет тока смещения создаст новое магнитное поле и так до бесконечности (рис. 2.6, в).

Смысл уравнений (3) и (4) понятен — (3) описывает электростатическую теорему Гаусса и обобщает закон Кулона, (4) отражает факт отсутствия магнитных зарядов. Дивергенция (от лат. *divergere* — обнаруживать расхождение) есть мера источника. Если в стекле, например, не рождаются световые лучи, а только проходят сквозь него, $\text{div} \mathbf{D} = 0$. Солнце как источник света и теплоты обладает положительной дивергенцией, а темнота — отрицательной. Поэтому силовые линии электрического поля кончаются на зарядах, плотность которых ρ , а магнитного — замкнуты сами на себя и нигде не кончаются.

Система взглядов, которая легла в основу уравнений Максвелла, получила название *максвелловской теории электромагнитного поля*. Хотя эти уравнения имеют простой вид, но чем больше Максвелл и его последователи работали над ними, тем более глубокий смысл открывался им. Г. Герц, опыты которого явились первым прямым доказательством верности теории электромагнитного поля Фарадея—Максвелла, писал о неисчерпаемости уравнений Максвелла: «Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом — кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них заложено».

Процесс распространения поля будет продолжаться до бесконечности в виде незатухающей волны — энергия магнитного поля в пустоте полностью переходит в энергию электрического, и наоборот. Среди постоянных, входящих в уравнения, была константа c ; Максвелл нашел, что ее значение равнялось точно значению скорости света. На это совпадение нельзя было не обратить внимания. Итак, в световых волнах колебания совершают напряженности электрического и магнитного полей, а носителем волны служит само пространство, которое находится в состоянии напряжения.

Световая волна — это волна электромагнитная,

Световая волна — это волна электромагнитная, «бегущая в пространстве и отделенная от испустивших ее зарядов», как выразился Вайскопф. Открытие Максвелла он сравнил по важности с открытием закона тяготения Ньютона. Ньютон связал движение планет с тяготением на Земле и открыл фундаментальные законы, управляющие механическим движением масс под действием сил. Максвелл связал оптику с электричеством и вывел фундаментальные законы (уравнения Максвелла), управляющие поведением электрических и магнитных полей и их взаимодействием с зарядами и магнитами. Труды Ньютона привели к введению

74

понятия всеобщего закона тяготения, труды Максвелла — понятия электромагнитного поля и к установлению законов его распространения.

Если электромагнитное поле может существовать независимо от материального носителя, то дальное действие должно уступить место близкоедействию, полям, распространяющимся в пространстве с конечной скоростью. Идеи тока смещения (1861), электромагнитных волн и электромагнитной природы света (1865) были настолько смелыми и необычными, что даже следующее поколение физиков не сразу приняло теорию Максвелла. В 1888 г. Г. Герц открыл *электромагнитные волны*, но такого активного противника теории Максвелла, как У.Томсон (Кельвин), смогли убедить лишь эксперименты П.Н.Лебедева, открывшего в 1889 г. существование *светового давления*.

Плотность потока энергии в волне,

Плотность потока энергии в волне, распределенной в некоторой области пространства и колеблющейся во времени, — это количество электромагнитной энергии, проходящей через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения, в единицу времени. Плотность потока энергии обозначают буквой *П*. Для плоской волны с $E = B$ энергия делится поровну между электрической и магнитной компонентами, поэтому удобно записать: $P = E^2 = B^2$.

Электромагнитное излучение Солнца переносит на Землю его энергию, снабжая нас теплотой и светом. Учение о движении энергии было разработано русским физиком Н.А.Умовым. Он показал, что изменение энергии внутри объема определяется ее потоком, проходящим через поверхность. Через 11 лет после публикации Умова английский физик лорд Дж. Рэлей представил Королевскому обществу сообщение Дж. Пойтинга «О переносе энергии в электромагнитном поле», где содержались независимо полученные аналогичные результаты. Поэтому в настоящее время вектор $\mathbf{P} = [\mathbf{E}\mathbf{H}]$ называют вектором Умова—Пойтинга.

Импульс электромагнитной волны

Импульс электромагнитной волны можно записать аналогично: из формулы $E = mc^2$ следует получить значение эквивалентной массы и, зная скорость распространения волны c , посчитать импульс, т. е. $P = mc = E/c$. Так как скорость света огромна, мы не замечаем давления света, обусловленного наличием импульса ни от световой волны, ни от светящейся лампочки, ни от Солнца. В теории Максвелла энергия распределена в пространстве с объемной плотностью, записанной выше, и электромагнитная волна несет энергию. Ученый утверждал, что, падая на поглощающую поверхность, волна должна производить давление, равное объемной плотности энергии.

В середине XIX в. Максвелл объединил электричество и магнетизм в единой теории поля. Электрический заряд связан с элементарными частицами, из которых самые известные — электрон

75

и протон — имеют одинаковый по величине заряд e , это универсальная постоянная природы. В СИ $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Хотя магнитных зарядов пока не обнаружено, в теории они уже возникают. По мнению физика Дирака, величина магнитных зарядов должна быть кратной заряду электрона \bar{e} .

Дальнейшие исследования в области электромагнитного поля привели к противоречиям с представлениями классической механики, которые пытался устранить путем математического согласования теорий голландский физик Х.А.Лоренц. Он ввел преобразования координат инерциальных систем, которые в отличие от классических преобразований Галилея содержали константу — скорость света, которая и осуществляла связь с теорией поля. Изменились масштабы времени и длин при скоростях, близких к скорости света. Физический смысл этих преобразований Лоренца был объяснен только А.Эйнштейном в 1905 г. в его работе «К электродинамике движущихся тел», составившей основу специальной теории относительности (СТО), или релятивистской механики.

2.7. Типы фундаментальных взаимодействий в физике

Естествознание не только выделяет типы материальных объектов во Вселенной, но и раскрывает связи между ними. Связь между объектами в целостной системе более упорядочена, более устойчива, чем связь каждого из элементов с элементами из внешней среды. Чтобы разрушить систему, выделить из системы тот или иной элемент, нужно приложить к ней определенную энергию. Эта энергия имеет разную величину и зависит от типа взаимодействия между элементами системы. В мегамире эти взаимодействия обеспечиваются гравитацией, в макромире к гравитации добавляется электромагнитное взаимодействие, и оно становится основным, как более сильное. В микромире на размерах атома проявляется еще более сильное ядерное взаимодействие, обеспечивающее целостность атомных ядер. При переходе к элементарным частицам энергия внутренних связей становится сравнимой с собственной энергией частиц — слабое ядерное взаимодействие обеспечивает их целостность. Так что чем меньше размеры материальных систем, тем более прочно связаны между собой элементы.

История науки знает множество попыток представить сложные процессы во Вселенной в виде определенных схем. Успешное познание окружающего мира и приведение наблюдаемых явлений к простейшим понятиям возможны лишь в том случае, если бы мы сумели описать мир в терминах ограниченного числа фундаментальных частиц и нескольких типов фундаментальных взаимодействий, в которые они могут вступать. Сейчас мы знаем, что природные вещества — это химические соединения элементов, построенных из атомов и собранных в Периодическую

76

таблицу. Некоторое время считали, что атомы и есть элементарные кирпичики мироздания, но потом установили, что атом представляет собой «целую Вселенную» и состоит из взаимодействующих друг с другом еще более фундаментальных частиц: протонов, электронов, нейтронов, мезонов и т.д. Число частиц, претендующих на элементарность, увеличивается, но так ли уж они элементарны?

Механика Ньютона была признана, но происхождение сил, которые вызывают ускорения, в ней не обсуждались. Силы гравитации действуют через пустоту, они дальнodelствующие, тогда как силы электромагнитные — через среду. В настоящее время все взаимодействия в природе сводят к четырем типам: гравитационные, электромагнитные, сильные ядерные и слабые ядерные.

Гравитация (от лат. *gravitas* — тяжесть) — исторически первое исследованное взаимодействие.

Гравитация (от лат. *gravitas* — тяжесть) — исторически первое исследованное взаимодействие. Вслед за Аристотелем считали, что все тела стремятся в «своему месту» (тяжелые — вниз, к Земле, легкие — вверх). Физике XVII—XVIII вв. были известны только гравитационные взаимодействия. По Ньютону, две точечные массы притягивают друг друга с силой, направленной вдоль соединяющей их прямой: $F_{\text{гп}} = -Gm_1m_2/r^2$. Знак минус указывает на то, что мы имеем дело с притяжением, r — расстояние между телами (считается, что размер тел намного меньше r), m_1 и m_2 — массы тел. Величина G — универсальная постоянная, определяющая значение гравитационных сил. Если тела массой по 1 кг находятся на расстоянии 1 м друг от друга, то сила притяжения между ними равна $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н. Гравитация универсальна, все тела подвержены ей и даже сама частица — источник гравитации. Если бы величина G была больше, то увеличилась бы и сила, но G очень мала, и гравитационное взаимодействие в мире субатомных частиц несущественно, а между макроскопическими телами еле заметно. Кэвендиш сумел измерить величину G , пользуясь крутильными весами. Универсальность постоянной G означает, что в любом месте Вселенной и в любой момент времени сила притяжения между телами массой по 1 кг, разделенными расстоянием 1 м, будет иметь то же значение. Поэтому можно говорить, что величина G определяет структуру гравитирующих систем. Гравитация, или тяготение, не очень существенна при взаимодействии между малыми частицами, но она удерживает планеты, всю Солнечную систему и галактики. Мы постоянно ощущаем гравитацию в нашей жизни. Закон утвердил дальнедействующую природу силы тяготения и основное свойство гравитационного взаимодействия — его универсальность.

Теория тяготения Эйнштейна (ОТО) дает отличающиеся результаты от закона Ньютона в сильных гравитационных полях, в слабых — обе теории совпадают. Согласно ОТО, *гравитация — это проявление искривления пространства-времени*. Тела движутся по искривленным траекториям не потому, что на них действует

77

гравитация, а потому, что они движутся в искривленном пространстве-времени. Движутся «кратчайшим путем, и тяготение — это геометрия». Влияние искривления пространства-времени можно обнаружить не только вблизи коллапсирующих объектов типа нейтронных звезд или черных дыр. Таковы, например, прецессия орбиты Меркурия или замедление времени на поверхности Земли (см. рис. 2.3, в). Эйнштейн показал, что гравитацию можно описывать как эквивалент ускоренного движения.

Чтобы избежать сжатия Вселенной под влиянием самогравитации и обеспечить ее стационарность, он ввел возможный источник гравитации с необычными свойствами, ведущий к «расталкиванию» материи, а не к концентрации ее, а сила отталкивания $F_{\text{косм}}$ возрастает с увеличением расстояния. Но эти свойства могут проявляться только в очень больших масштабах Вселенной. Сила отталкивания неимоверно мала и не зависит от отталкивающей массы; ее представляют в виде $F_{\text{косм}} = Lrmc^2$, где m — масса отталкиваемого объекта; r — его расстояние от отталкивающего тела; L — константа. В настоящее время устанавливают верхний предел для $L = 10^{-53} \text{ м}^{-2}$, т.е. для двух тел массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м, сила притяжения превышает космическое отталкивание, по крайней мере в 10^{25} раз. Если две галактики с массами 10^{41} кг находятся на расстоянии 10 млн св. лет (около 10^{22} м), то для них силы притяжения примерно уравнивались бы силами отталкивания, если величина L действительно близка к указанному верхнему пределу. Поэтому эта величина не измерена до сих пор, хотя и важна для крупномасштабной структуры Вселенной как фундаментальная.

Электromагнитное взаимодействие,

Электromагнитное взаимодействие, обусловленное электрическими и магнитными зарядами, переносится фотонами. Силы взаимодействия между зарядами сложным образом зависят от положения и движения зарядов. Если два заряда q_1 и q_2 неподвижны и сосредоточены в точках на расстоянии r , то взаимодействие между ними электрическое и определяется законом Кулона: $F_{\text{эл}} = q_1q_2/(4\pi\epsilon_0r^2)$. В зависимости от знаков зарядов q_1 и q_2 сила электрического взаимодействия, направленная вдоль прямой, соединяющей заряды, будет силой притяжения или отталкивания. Здесь через ϵ_0 обозначена постоянная, определяющая интенсивность электростатического взаимодействия, ее значение равно $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Так, два заряда по 1 Кл, разнесенные на 1 м, будут испытывать силу $8,99 \cdot 10^9$ Н. Электрический заряд всегда связан с элементарными частицами. Численная величина заряда наиболее известных среди них — протона и электрона — одинакова: это универсальная постоянная $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд протона считается положительным, электрона — отрицательным.

Магнитные силы порождаются электрическими токами — движением электрических зарядов. Существуют попытки объединить

78

теории с учетом симметрий, в которых предсказывается существование магнитных зарядов (магнитных монополей), но они пока не обнаружены. Поэтому величина e определяет и интенсивность магнитного взаимодействия. Если электрические заряды движутся с ускорением, то они излучают — отдают энергию в виде света, радиоволн или рентгеновских лучей в зависимости от диапазона частот. Почти все носители информации, воспринимаемые нашими органами чувств, имеют электромагнитную природу, хотя и

проявляются подчас в сложных формах. Электромагнитные взаимодействия определяют структуру и поведение атомов, удерживают атомы от распада, отвечают за связи между молекулами, т. е. за химические и биологические явления.

Гравитация и электромагнетизм — дальнедействующие силы, распространяющиеся на всю Вселенную.

Сильные и слабые ядерные взаимодействия

Сильные и слабые ядерные взаимодействия — короткодействующие и проявляются только в пределах размеров атомного ядра, т. е. в областях порядка 10^{-14} м.

Слабое ядерное взаимодействие ответственно за многие процессы, обуславливающие некоторые виды ядерных распадов элементарных частиц (например, β -распад — превращение нейтронов в протоны) с радиусом действия почти точечным: около 10^{-18} м. Оно сильнее сказывается на превращениях частиц, чем на их движении, поэтому его эффективность определяют постоянной, связанной со скоростью распада, — универсальной постоянной связи $g(W)$, определяющей скорость протекания процессов типа распада нейтрона. Слабое ядерное взаимодействие осуществляют так называемые слабые бозоны, и одни субатомные частицы могут превращаться в другие. Открытие нестабильных субъядерных частиц обнаружило, что слабое взаимодействие вызывает множество превращений. Сверхновые звезды — один из немногих случаев наблюдаемого слабого взаимодействия.

Сильное ядерное взаимодействие препятствует распаду атомных ядер, и не будь его, ядра распались бы из-за сил электрического отталкивания протонов. В ряде случаев для его характеристики вводят величину $g(S)$, аналогичную электрическому заряду, но намного большую. Сильное взаимодействие, осуществляемое глюонами, резко падает до нуля за пределами области радиусом около 10^{-15} м. Оно связывает между собой кварки, входящие в состав протонов, нейтронов и других подобных частиц, именуемых адронами. Говорят, что взаимодействие протонов и нейтронов есть отражение их внутренних взаимодействий, но пока картина этих глубинных явлений скрыта от нас. С ним связаны энергия, выделяемая Солнцем и звездами, превращения в ядерных реакторах и освобождение энергии.

Перечисленные типы взаимодействий имеют, видимо, разную природу. К настоящему времени не ясно, исчерпываются ли ими

79

все взаимодействия в природе. Самое сильное — короткодействующее сильное взаимодействие, электромагнитное слабее его на 2 порядка, слабое — на 14 порядков, а гравитационное меньше сильного на 39 порядков. В соответствии с величиной сил взаимодействия они происходят за разное время. Сильные ядерные взаимодействия возникают при столкновении частиц с околосветовыми скоростями, и время реакций, определяемое делением радиуса действия сил на скорость света, дает величину порядка 10^{-23} с. Процессы слабого взаимодействия происходят за 10^{-9} с, а гравитационные — порядка 10^{16} с, или 300 млн лет.

«Закон обратных квадратов», по которому действуют друг на друга точечные гравитационные массы или электрические заряды, следует из трехмерности пространства, как показал П.Эренфест (1917). В пространстве n измерений точечные частицы взаимодействовали бы по закону обратной степени $(n - 1)$. Для $n = 3$ справедлив закон обратных квадратов, так как $3 - 1 = 2$. А при $n = 4$, что соответствует закону обратных кубов, планеты двигались бы по спиралям и быстро упали на Солнце. В атомах при числе измерений больше трех также не существовало бы устойчивых орбит, т. е. не было бы химических процессов и жизни. На связь трехмерности пространства с законом тяготения указывал еще и Кант.

Кроме того, можно показать, что распространение волн в чистом виде невозможно в пространстве с четным числом измерений — появляются искажения, нарушающие переносимую волной структуру (информацию). Пример тому — распространение волны по резиновому покрытию (по поверхности размерности $n = 2$). В 1955 г. математик Г. Дж. Уитроу заключил, что поскольку живым организмам необходимы передача и обработка информации, то высшие формы жизни не могут существовать в пространствах четной размерности. Этот вывод относится к известным нам формам жизни и законам природы и не исключает существования иных миров, иной природы.

2.8. Попытки построения Теории Всего Сущего

От Ньютона и П.Лапласа сохранилось рассмотрение механики как универсальной физической теории. В XIX в. это место заняла **механистическая картина мира**, включающая механику, термодинамику и кинетическую теорию материи, упругую теорию света и электромагнетизм. Открытие электрона стимулировало создание новой теории. В конце века Х.Лоренц построил свою электронную теорию для охвата всех явлений природы, но этого не достиг. Проблемы, связанные с дискретностью заряда и непрерывностью поля, и проблемы в теории излучения («ультрафиолетовая катастрофа») привели к созданию **квантово-полевой картины мира** и квантовой механики. После создания СТО ожидалось, что всеобщий охват мира природы способна дать **электромаг-**

80

нитная картина мира, соединявшая теорию относительности, теорию Максвелла и механику, но и эта иллюзия вскоре была развеяна.

Многие теоретики пытались едиными уравнениями охватить гравитацию и электромагнетизм. Под влиянием обаяния Эйнштейна, который ввел четырехмерное пространство-время, строились многомерные теории поля в попытках свести явления к геометрическим свойствам пространства.

Объединение осуществилось на основе установленной независимости скорости света для разных наблюдателей, движущихся в пустом пространстве при отсутствии внешних сил. Эйнштейн изобразил *мировую линию* объекта на плоскости, где пространственная ось направлена горизонтально, а временная — вертикально. Тогда вертикальная прямая — это мировая линия объекта, который покоится в данной системе отсчета, а наклонная — объекта, движущегося с постоянной скоростью. Кривая мировая линия соответствует движению объекта с ускорением. Любая точка на этой плоскости отвечает положению в данном месте в данное время и называется *событием*. Гравитация при этом уже не сила, действующая на пассивном фоне пространства и времени, а представляет собой искажение самого пространства-времени. Ведь гравитационное поле — это «кривизна» пространства-времени.

Для установления связи между системами отсчета, движущимися относительно друг друга, нужно измерять пространственные интервалы в тех же единицах, что и временные. Множителем для такого пересчета может служить *скорость света*, связывающая расстояние с временем, за которое свет может это расстояние преодолеть. В такой системе 1 м равен 3,33 нс ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$). Тогда мировая линия фотона пройдет под углом 45° , а любого материального объекта — под меньшим углом (так как скорость у него всегда меньше скорости света). Поскольку пространственная ось на плоскости соответствует трем пространственным осям, то мировые линии материальных тел будут находиться внутри конуса, описываемого мировой линией фотона. Результаты наблюдений солнечного затмения 1919 г. принесли всемирную славу Эйнштейну. Смещения звезд, которые можно увидеть в окрестности Солнца только во время затмения, совпали с предсказаниями теории тяготения Эйнштейна. Так что его геометрический подход к построению теории тяготения был подтвержден впечатляющими экспериментами.

В том же 1919 г., когда появилась ОТО, приват-доцент Кенигсбергского университета Т. Калуца отправил Эйнштейну свою работу, где предлагал *пятое измерение*. Пытаясь найти первооснову всех взаимодействий (тогда было известно два — тяготение и электромагнетизм), Калуца показал, что они могут быть выведены единообразно в пятимерной ОТО. Для успеха объединения не имели значения размеры пятого измерения и, может быть, они столь малы, что их не удастся обнаружить. Только после двухго-

81

дичной переписки с Эйнштейном статью опубликовали. Шведский физик О.Клейн предложил модификацию основного уравнения квантовой механики с пятью переменными вместо четырех (1926). Неощущаемые нами измерения пространства он «свернул» до очень малых размеров (приведя пример небрежно брошенного поливального шланга, который издали кажется извилистой линией, а вблизи каждая его точка оказывается окружностью). Размеры этих своеобразных петелек 10^{20} раз меньше размера атомного ядра. Поэтому пятое измерение и не наблюдается, но возможно.

В развитие пятимерной теории внесли свой вклад советские ученые Г.А. Мандель и В.А. Фок. Они показали, что траектория заряженной частицы в пятимерном пространстве может быть строго описана как геодезическая линия (от греч. *geodaisia* — землеразделение), или кратчайший путь между двумя точками на поверхности, т. е. пятое измерение может быть физически реальным. Оно не обнаружено из-за соотношения неопределенности Гейзенберга, которое каждую частицу представляет в виде волнового пакета, занимающего в пространстве область, размер которой зависит от энергии частицы (чем больше энергия, тем меньше объем области). Если пятое измерение свернуто в малую окружность, то, чтобы ее обнаружить, освещающие ее частицы должны обладать большой энергией. Ускорители дают пучки частиц, обеспечивающие разрешающую способность 10^{-18} м. Поэтому, если окружность в пятом измерении имеет меньшие размеры, ее пока нельзя обнаружить.

Как представить себе *пятимерное* пространство? Вообразим линию бесконечной длины, с каждой точкой которой связана окружность, нечто вроде бесконечного цилиндра. Одномерная линия и одномерная окружность порождают двухмерный цилиндр. Четырехмерную конструкцию можно представить из двумерной плоскости и двумерной сферы. Далее, пятимерное пространство порождено окружностью и обычным четырехмерным пространством, т.е. объединением сферы и пространства-времени. Длина окружности в пятом измерении, приводящая к образованию частиц в теории Калуцы, очень мала: около 10^{-32} м! Но работы по многомерным теориям продолжались. Так, советский профессор Ю.Б.Румер (свою научную деятельность он начал еще у М.Борна во время создания квантовой механики, общался со всеми великими физиками XX в., в том числе с Эйнштейном, последние 30 лет работал в Новосибирске) в своей пятимерной теории показал, что пятому измерению можно придать смысл *действия*. Тут же появились попытки представить наглядно это пятимерное пространство, как ранее четырехмерное пространство-время, введенное Эйнштейном. Одна из таких попыток — гипотеза о существовании «параллельных» миров. Четырехмерное изображение мяча представить было несложно: это совокупность его изображений в каждой временной точке — «труба» из мячей, которая тянется из прошлого в будущее. А пятимерный мяч — это уже поле, плоскость из абсолютно одинаковых миров. Во всех ми-

82

рах, имеющих от трех до пяти измерений, даже одна причина, хотя бы случайная, может породить несколько следствий.

Шестимерная Вселенная, построенная выдающимся советским авиаконструктором Л. Р. Бартини, включает три пространственных измерения и три временных. У Бартини длина времени — длительность, ширина — количество вариантов, высота — скорость времени в каждом из возможных миров.

Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику.

Теория квантовой гравитации должна была соединить ОТО и квантовую механику. Эйнштейн предполагал, что «процесс углубления теории не имеет границ», но большинство его современников считали этот поиск единой теории результатом его квазирелигиозных склонностей. Во Вселенной, подчиненной законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и его структура должны флуктуировать, квантовый мир никогда не находится в покое. И понятия прошлого и будущего, последовательность событий в таком мире тоже должны быть иными. Возможно, эти изменения существуют, но пока не обнаружены, так как квантовые эффекты проявляются в исключительно малых масштабах. В 50-е гг. XX в. Р. Фейнман, Ю. Швингер и С. Томогава независимо друг от друга создали квантовую электродинамику, связав квантовую механику с релятивистскими представлениями и объяснив многие эффекты, полученные при исследовании атомов и их излучений. Затем была разработана теория слабых взаимодействий, и показано, что электромагнетизм можно объединить математически только со слабым взаимодействием. Пакистанский физик-теоретик А.Салам, один из авторов теории слабого взаимодействия, писал: «Секрет достижения Эйнштейна состоит в том, что он осознал фундаментальное значение заряда в гравитационном взаимодействии. И пока мы не поймем природу зарядов в электромагнитных, слабых и сильных взаимодействиях так же глубоко, как это сделал Эйнштейн для тяготения, надежды на успех в окончательной унификации мало... Мы хотели бы не только продолжить попытки Эйнштейна, в которых ему не удалось преуспеть, но и включить в эту программу остальные заряды». Возродился интерес к многомерным теориям, и вновь стали обращаться к работам Эйнштейна, Бергмана, Калуцы, Румера, Йордана. В работах советских физиков (Л.Д.Ландау, И.Я.Померанчук, Е.С.Фрадкин) показано, что при расстояниях 10^{-33} см в квантовой электродинамике появляются неустранимые противоречия (расходимости, аномалии, все заряды обращаются в нуль). Многие ученые работали над идеями создания единой теории, среди них выделяются С.Вайнберг, А.Салам и Ш.Глэшоу. Они показали, что электромагнетизм и слабое ядерное взаимодействие можно считать проявлением некоей «электрослабой» силы и что истинные носители сильного взаимодействия — кварки. Созданная теория — *квантовая хромодинамика* — построила протоны и ней-

83

троны из кварков и сформировала стандартную модель элементарных частиц.

Еще Планк отметил фундаментальную роль величин, составленных из трех констант, определяющих основные теории, — СТО (скорости света c), квантовую механику (постоянной Планка \hbar) и теорию тяготения Ньютона (гравитационной постоянной G). Из их комбинации можно получить три величины *{планковские}* с размерностями массы, времени и длины. Планковская длина приблизительно равна 10^{-33} см, т.е. совпадает с критическим расстоянием, на котором теряет смысл квантовая электродинамика. Сейчас определена геометрия лишь на расстояниях более 10^{-16} см, которые больше планковских на 17 порядков величины! Объединение взаимодействий нужно для устранения в теории расходимостей и аномалий — проблему составляло определение частиц как точек и искажение ими пространства-времени. И его стали искать с помощью идей более высоких симметрий. Эти идеи получили «второе дыхание» в 80-е гг. XX в. в **теориях великого объединения ТВО и супергравитации**. ТВО — это теория, позволяющая объединить все взаимодействия, кроме гравитационного. Если удастся объединить с ней и гравитационное взаимодействие, то получится **Теория Всего Сущего (ТВС)**. Тогда мир будет описываться единообразно. Поиск такой «суперсилы» продолжается.

Теории супергравитации

Теории супергравитации используют многомерные построения, свойственные геометрическому подходу при построении ОТО. Можно построить мир из разного числа измерений (используют 11- и 26-мерные модели), но 11-мерные наиболее интересны и красивы с математической точки зрения: 7 — минимальное число скрытых измерений пространства-времени, которые допускают включение в теорию трех негравитационных сил, а 4 — обычные измерения пространства-времени. Четыре известных взаимодействия рассматривают как геометрические конструкции, имеющие более пяти измерений.

Теория суперструн

Теория суперструн разрабатывается с середины 80-х гг. XX в. наряду с супергравитацией. Эту теорию начали развивать английский ученый М. Грин и американский ученый Дж. Шварц. Они сопоставили частицам вместо точки одномерную струну, помещенную в многомерное пространство. Эта теория, заменив точечные частицы крошечными энергетическими петлями, устранила абсурдности, возникающие при расчетах. *Космические струны* — это экзотические невидимые образования, порожденные теорией элементарных частиц. В этой теории отражена иерархичность понимания мира — возможность того, что не существует окончательного основания для физической реальности, а есть только последовательность все меньших и

меньших частиц. Существуют и очень массивные частицы, и около тысячи частиц без массы. У каждой струны, имеющей планковский размер (10^{-33} см),

84

при этом может быть бесконечно много типов (или мод) колебаний. Как вибрация струн скрипки порождает различные звуки, так и вибрация этих струн может генерировать все силы и частицы. *Суперструны* позволяют понять киральность (от греч. *cheir* — рука), тогда как супергравитация не может объяснить разницы между левым и правым — в ней поровну частиц каждой направленности. Теория суперструн, как и супергравитации, связана не с опытом, а с более характерным для математики устранением аномалий и расходимостей.

Американский физик Э.Виттен заключил, что теория суперструн — основная надежда на будущее физики, она не только учитывает возможность силы тяжести, но и утверждает ее существование, и тяжесть — есть следствие теории суперструн. Его технология, заимствованная из топологии и теории квантового поля, позволяет открывать глубокие симметрии между запутанными узлами высокой мерности. Была зафиксирована размерность, соответствующая относительно непротиворечивой теории, она равна 506. (За 1981 — 1990 гг. Виттен опубликовал 96 статей по теории суперструн, и они цитировались 12 105 раз другими физиками — пока недостижимый рекорд цитируемости.)

С помощью теории суперструн можно объяснить «клочковатость» распределения вещества во Вселенной. Суперструны — это нити, оставшиеся от вещества только что родившейся Вселенной. Они невероятно подвижны и плотны, искривляют пространство вокруг себя, образуют клубки и петли, причем массивные петли могли бы создавать гравитационное притяжение, достаточно сильное, чтобы зарождались элементарные частицы, галактики и скопления галактик. К 1986 г. опубликовано много работ по космическим струнам, хотя сами они до сих пор не обнаружены. Найти суперструны считают возможным по искривлению пространства, которое они вызывают, действуя как гравитационная линза, или по испускаемым ими гравитационным волнам. Эволюцию суперструн разыгрывают на компьютерах, и на экране дисплея возникают картины, соответствующие наблюдаемому в космосе, — там тоже образуются волокна, слои и гигантские пустоты, в которых практически нет галактик.

Это необычайное сближение космологии и физики элементарных частиц в последние 30 лет дало возможность разобраться в сути процессов рождения пространства-времени и вещества в коротком интервале от 10^{-43} до 10^{-35} с после первичной сингулярности, называемой *Большим Взрывом*. Число размерностей 10 (супергравитация) или 506 (теория суперструн) — не окончательно, могут появиться и более сложные геометрические образы, но непосредственному обнаружению множество дополнительных размерностей не доступно. Истинная геометрия Вселенной, вероятно, не имеет трех пространственных измерений, что характерно лишь для нашей Метагалактики — наблюдаемой части Вселенной.

85

И все они, кроме трех, в момент Большого Взрыва (10—15 млрд лет назад) свернулись до планковских размеров. На больших расстояниях (до размеров Метагалактики 10^{28} см) геометрия евклидова и трехмерна, а на планковских — неевклидова и многомерна. Считают, что разрабатываемые сейчас Теории Всего Сущего (ТВС) должны объединить описания всех фундаментальных взаимодействий между частицами.

Совпадение предмета исследований изменило сложившуюся методологию наук. Астрономия считалась наблюдательной наукой, а ускорители — инструментом в физике элементарных частиц. Теперь стали строить предположения о свойствах частиц и их взаимодействиях в космологии, и проверить их стало возможным уже для нынешнего поколения ученых. Так, из космологии следует, что число фундаментальных частиц должно быть невелико. Это предсказание относилось к анализу процессов первичного синтеза нуклонов, когда возраст Вселенной составлял около 1 с, и сделано оно было в то время, когда казалось, что достижение больших мощностей на ускорителях приведет к увеличению числа элементарных частиц. Если бы частиц было много, Вселенная была бы сейчас иной.

Проверить теорию элементарных частиц должен был сверхпроводимый суперколлайдер диаметром 75 км. Его хотели построить в США (было потрачено 2 млрд долл. и прорыт в Техасе тоннель длиной 22 км), но Конгресс США отменил эти работы. Струны столь же малы по сравнению с протоном, как и протон по сравнению с размерами Солнечной системы. Для проверки теории суперструн нужна пространственная база размерами порядка 1000 св. лет, поэтому дальнейшее продвижение в проверке ТВС заморожено. Уязвимость теории суперструн в том, что пока она опирается лишь на умозрительные суждения. Да и вряд ли эта теория будет иметь практическую ценность; она устранил парадоксы квантовой механики, но физики не смогут доказать, что эта теория является окончательной, как доказывают теоремы математики; для них достаточно, что она работает и дает результаты, подтверждающиеся экспериментом.

Знакомясь с явлениями в простых системах и сопровождающими их взаимодействиями, будем искать и выделять общие правила, которым они подчиняются, выяснять область их приложения и пытаться применять их к более сложным системам. И огромная и сложная Вселенная предстанет в виде совокупности небольшого числа элементарных частиц, которые могут взаимодействовать только четырьмя способами и подчиняться небольшому числу фундаментальных законов. Однако при движении по пути познания мира все больше возникает вопросов и все труднее на них отвечать. Так, в неживой природе постоянно открывают все новые и

новые субатомные частицы, и многие детали их поведения пока остаются неясными. Даже у кварков появляются неизвестные до сих пор качества. Где предел дробления материи и существует ли он? Что представляет из себя физический вакуум? Что есть частица и каково соотно-

86

шение между реальными и виртуальными состояниями, когда частица начинает проявлять свойства волны, и можно ли уловить этот момент современными приборами? В физике оказалось много удивительных совпадений, которые не могут быть поняты как чистые случайности или чистые закономерности. Можно проследить взаимные превращения порядка в хаос, рождение законов и упорядоченность хаоса, но возможно ли управление этими процессами?

Мы плохо представляем себе даже состав и строение внутренних областей Земли, хотя получены разнообразные сведения о составе, строении, движениях и жизненных циклах звезд и других небесных объектов. Человечество вышло за пределы атмосферы, на разных планетах побывали космические станции и лаборатории, на Землю доставлены обильная информация и образцы грунта других планет. Но мы не можем уверенно определить наличие жизни вне Земли, ничего не знаем о происхождении и границах Вселенной. Почему мир именно таков и каково будущее нашей планеты и нашей солнечной системы? В живой природе как в целом, так и в отдельных организмах крут неясного еще более широк. Нам известно многое об общих функциях различных органов и тканей, об их взаимодействии, но попытки описать функции этих органов через процессы в клетках далеки от желаемого завершения и понимания. Огромное внимание привлечено к проблеме изучения деятельности отдельной живой клетки и функций, выполняемых колоссальным количеством входящих в клетку химических соединений, которые состоят из более чем 10^{14} атомов. При целостном объяснении многих закономерностей в разных областях знания на первый план выходят проблемы симметрии неживой природы и асимметрии живой.

Возможно, при огромных значениях энергии все взаимодействия удастся соединить и получится Теория Всего Сущего (ТВС). Тогда мир будет описываться единообразно. Но что такое красивое и элегантное описание скажет об явлениях, придающих смысл нашей жизни? И может ли когда-нибудь такая теория быть подтверждена экспериментами, которые становятся невообразимо дорогими?!

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Как определяют возраст археологической находки, нашей планеты? Каков диапазон временных интервалов во Вселенной?
 2. Как измеряют расстояния в микромире? Дайте понятие о метрической системе. Где на Земле можно наиболее приблизиться к ее центру?
 3. Как измеряют время на интервалах, меньших 1 с? Какими приборами? Охарактеризуйте свойства времени в различных уровнях познания.
 4. Как измерили размеры Земли, Луны, Солнца? Каков диапазон расстояний во Вселенной? Как оценили размер Галактики, Вселенной?
 5. Какие движения Земли легли в основу календаря, какие календари используют сейчас; с чем связаны их несовершенства?
- 87
6. Как определяют расстояния до звезд? Что такое «параллакс» и «звездная величина»?
 7. Поясните, как изменились представления о пространстве и времени Ньютона в связи с созданием теории относительности. Что такое размерность пространства?
 8. Охарактеризуйте концепции близко- и дальнедействия. Поясните понятие «поле». Кто и как создавал теорию электромагнитного поля?
 9. Какие фундаментальные взаимодействия выделены в физике и почему они так названы?
 10. В чем суть концепции атомизма? Как развивалась концепция атомизма и как она связана с современными проблемами построения единой физической теории?

Глава 3. МИРОЗДАНИЕ В СВЕТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМЫ

3.1. Модель материальной точки и законы классической механики

Движением называется любое изменение материи; движение — это основное, неотъемлемое и всеобщее свойство материи; оно так же многообразно, как и явления природы. Существуют различные виды движения материи — механическое, тепловое, химическое и т.д. По выражению Галилея, кто не знаком с законами движения, тот не может понять природы. Под механическим движением понимают изменение положения тел относительно друг друга за время наблюдения. Характер движения зависит от того, относительно какого тела оно рассматривается. Движущееся тело имеет некоторые размеры в пространстве, но и пространство, в котором происходит движение, обладает протяженностью. Процесс абстрагирования позволяет отвлечься от несущественных для данного движения свойств тел — изменения строения, внутреннего состояния и др.

Модели, используемые в науке, должны соответствовать реальным явлениям или объектам. Они должны описываться математически, что позволяет осуществлять количественную проверку характерных особенностей исследуемых природных явлений. Модель материальной точки используют, если размеры тела много меньше размеров области пространства, в котором происходит движение. Другая абстрактная модель — **система материальных точек** — соответствует протяженным телам. Если важна жесткая связь точек между собой, используют **модель абсолютно твердого тела**; если же точки слегка подвижны в этой системе, удобнее модель упругого т е л а. При описании повторяющихся явлений удобны модели **осциллятора**: гармонического, ангармонического или системы связанных осцилляторов. Эти модели широко используют не только в механике, но и в естественных, и в общественных науках.

Механика изучает перемещение материальных точек или тел, т.е. изменение их положения с течением времени. Но движение происходит в микро-, макро- и мегамире по различным законам, изучаемым квантовой, классической и релятивистской механикой соответственно. Механика макроскопических тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света, называется *классической*; она состоит из кинематики и кинетики.

89

Основу кинематики составляют геометрия (координаты) и время; вводятся понятия траектории, скорости, ускорения, системы отсчета, угловой скорости и углового ускорения. Она возникла из практики пользования простыми механизмами (рычагом, наклонной плоскостью и пр.). При этом законы равновесия изучались путем рассмотрения того, что приводит к нарушению равновесия. Система Коперника (1543) — чисто кинематическая. В кинематике игнорируют причины движения.

Траектория — это совокупность последовательных положений, занимаемых телом в процессе движения. Вектор, проведенный из начальной точки в конечную, называется *вектором перемещения*. *Путь* — это скалярная величина, равная расстоянию, пройденному точкой вдоль траектории движения. *Скорость* — это векторная величина, характеризующая быстроту и направление движения в данный момент времени. Численное значение скорости материальной точки равно первой производной от пути по времени. *Система отсчета* — это система координат, жестко связанная с абсолютно твердым телом, относительно которого определяют положение других тел, и выбранный способ измерения времени. Понятия *мгновенной скорости* и *ускорения* появились в Европе в XV в. в связи с исследованием неравномерного движения.

Кинетика — это статика и динамика.

Статика развивалась в связи с расчетом равновесия архитектурных конструкций: балок, плит и т.п., которые подпирались в нескольких точках или подвешивались. Основные понятия статики сложились еще в древности из наблюдений, практического опыта и геометрических методов: сила, пара сил, центр тяжести, момент силы, условие равновесия.

Сила — это векторная величина, являющаяся мерой механического взаимодействия тел, которое может происходить и путем прямого контакта, и через пространство. Статика в античности подвергалась наибольшей математизации. Архимед — создатель статики и гидростатики — построил их по образцу геометрии Евклида. И задачи механики сводились к схеме неподвижного и уравновешенного рычагов. Леонардо да Винчи, опираясь на свои опыты с полиспастами и другими сочетаниями подвижных и неподвижных блоков, пытался сформулировать правила соотношения сил и скоростей перемещения грузов и

точки приложения силы тяги, т.е. некий вариант «золотого правила механики». В XVI в. эти исследования продолжили Тарталья, Бенедетта и Кардано. В статику вошел принцип *моментов сил*. Стевин, изучая равновесие на наклонной плоскости, разлагал силы на *составляющие* (закон параллелограмма сил). Он же дал доказательство закона Архимеда о плавании тел. Галилей обосновал закон рычага, опираясь на принцип *возможных перемещений*.

Динамика, используя понятия кинематики и статики, вводит понятия массы, момента инерции, количества движения или импульса, работы силы, кинетической энергии, момента коли-

90

чества движения или момента импульса. Основные представления динамики сложились и развиваются на базе многовекового опыта человечества, производственной практики и наблюдений за движением тел, а также в процессе специально поставленных экспериментов.

Проблема поиска причин движения возникла в Европе в XV в. Буридан ввел понятие «импетуса» — постоянного качества движущегося тела. Появились попытки приблизиться к понятию *инерционного движения*. Чтобы понять, как будет двигаться тело под действием приложенных сил, нужно найти *закон движения*. Принцип сохранения движения — основа механики Декарта. Галилей в начале XVII в. математически сформулировал законы *падения тел* и *качания маятника*, прямо ссылаясь на эмпирическую основу механики. Фактически он обосновал динамику и новый метод познания в своей книге «Беседы...» (1638).

И. Ньютон придал динамике законченную форму. Его «Начала...» появились в 1687 г. и содержали *закон всемирного тяготения* и *три закона движения*. Первая книга начинается с определений исходных понятий, в первую очередь — массы: «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее». Это определение критиковалось как бессодержательное, т.к. плотность стала понятием производным. Но тогда ее понимали как «заполненность» тела частицами некоей «первичной материи», которая при умножении на объем тела дает «общее количество первичной материи». Потому и масса — это «количество материи» в теле. Далее Ньютон дал определение количества движения *mv*, приложенной и центростремительной силы, абсолютного и относительного времени и пространства, места тела, абсолютного и относительного движений. Затем следуют три закона движения: закон инерции; закон динамики; закон равенства действия и противодействия. Ньютон показал, используя мысленный эксперимент и ссылаясь на реальный опыт, что третий закон годится не только для столкновения тел, но и для притяжения.

В основе динамики — причинные законы, в макромире это — законы Ньютона. Ньютон определил ускорение как изменение скорости в единицу времени, как вторую производную от радиус-вектора, проведенного к материальной точке. **Основной закон динамики** — это дифференциальное уравнение второго порядка для координат точки как функции времени; интегрирование этого уравнения дает и скорость, и пройденный путь. В отсутствие сил имеет место закон инерции, ускорение равно нулю. Первый закон динамики утверждает, что в отсутствие сил тела не меняют своего движения. Это — закон *инерции*. Смысл закона в том, что при отсутствии действующих на тело сил существует система отсчета, где это тело покоится. Если оно покоится в одной системе отсчета, то имеется множество систем отсчета, где это тело движется с постоянной скоростью. Такие системы и называются *инерциальными*, в них выполняется первый закон Ньютона и для них справедлив принцип относительности, согласно

91

которому во **всех инерциальных системах** законы физики одинаковы.

Закон инерции был сформулирован и Декартом, и Галилеем (1636). Существует как частный случай *принцип относительности Галилея*, утверждающий, что никакими механическими опытами в такой системе нельзя определить, движется ли система равномерно и прямолинейно или покоится. Инерциальные системы отсчета — это абстрактные системы. Так, Земля движется по эллипсу вокруг Солнца, да и само Солнце движется по криволинейной траектории вокруг центра Галактики и т.д. Было установлено, что система отсчета, центр которой находится в центре Солнца, а оси координат направлены на выделенные звезды, является инерциальной. Любая система отсчета, которая движется прямолинейно и равномерно относительно гелиоцентрической системы, будет инерциальной.

Динамическое свойство тел, описываемое первым законом, называется *инертностью*. Физическая величина, характеризующая инертность тела, — его масса. По Ньютону, *масса* — это количество вещества в теле. Определяют массу тела сравнением с массой, принятой за эталон. При этом следует отвлекаться от всех внешних воздействий, т.е. считать тело как систему изолированную. Для системы материальных точек вводят понятие *центра масс* системы. Центр масс движется как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и на которую действует результирующая всех внешних сил, приложенных к системе.

Второй закон динамики утверждает, что произведение массы тела на ускорение равно действующей силе. Так как сила и ускорение — векторы, то они одинаково направлены. Динамическое воздействие на тело приводит к изменению его скорости, т.е. к ускорению. Статическое воздействие силы вызывает деформацию твердых тел, сжатие газов и т.п. Второй закон Ньютона выражает *принцип причинности* в классической механике: по начальному состоянию (положение и скорость тела) и действующей силе можно определить состояние тела в любой последующий момент времени.

Для решения задач механики важны меры движения (импульс, момент импульса и кинетическая энергия) и меры действия силы (импульс силы и работа). Соотношения между этими мерами составляют общие теоремы механики. Из них и вытекают фундаментальные законы сохранения.

В динамике Ньютона масса не меняется с изменением скорости. При движении со скоростями, много меньшими, чем скорость света, это выполняется. Так как произведение массы на скорость есть импульс P , второй закон может быть переформулирован (и этим пользовался сам Ньютон) — сила равна изменению импульса в единицу времени; в изолированной системе импульс не меняется (сохраняется).

92

Третий закон связывает равенством действие и противодействие. Он утверждает, что силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению. Это означает, что силы возникают попарно, и на каждое действие возникает противодействие. Характер взаимодействия не оговаривается, силы могут действовать на расстоянии между телами — быть гравитационными, электромагнитными или контактными.

Примером контактных сил, т. е. действующих при соприкосновении тел, являются силы реакции. Эти силы действуют перпендикулярно к поверхности контакта между телами. Примером контактных сил, направленных по поверхности соприкосновения, служат *силы трения*.

Понятиями момент силы и момент импульса пользуются при изучении вращений тел. Они определены через операцию, называемую векторным произведением*.

Момент силы есть векторное произведение: $\mathbf{M} = [\mathbf{r}\mathbf{F}]$. Момент импульса тела определяется выражением: $\mathbf{L} = [\mathbf{r}, m\mathbf{v}]$. При отсутствии действия внешних сил (система изолирована) действует закон сохранения импульса для поступательного движения и момента импульса — для вращательного. Момент силы и момент импульса связаны по второму закону Ньютона: $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$.

Так как в природе строгий порядок, мир не мог возникнуть из хаоса, он создан «по замыслу разумного существа». «Будучи раз созданным, мир может существовать по этим законам многие века».

Труд Ньютона — начало развития механики на подлинно математической основе. Движение оказалось в центре внимания не только механиков, но и математиков. И математический анализ, завершённый трудами Ньютона и Лейбница, стал совершенно необходим. В течение века возматерила мощь логического и математического исследования как и эмпирических истоков механики. Развивающаяся техника нуждалась в решении инженерных задач. Использование законов Ньютона для этого было весьма громоздко, и динамика интенсивно разрабатывалась и совершенствовалась. Основными вехами на этом пути были труды Л.Эйлера (1736) и «Аналитическая механика» Ж.Л.Лагранжа (1788).

* В отличие от скалярного произведения двух векторов, величина которого $(\mathbf{AB}) = AB \cos \alpha$, векторное произведение учитывает и направление, определяемое по правилу правой руки (см. рис. 2.6, а), когда пальцы согнуты в направлении от первого вектора A ко второму B . Тогда большой палец укажет направление самого произведения, величина которого $[\mathbf{AB}] = AB \sin \varphi$, здесь φ — угол между векторами. Обычно для обозначения скалярного произведения векторов используют либо круглые скобки, либо точку между векторами, а для векторного — квадратные скобки или крестик.

93

3.2. Масса инертная и гравитационная. Принцип эквивалентности

Галилей в опытах с использованием наклонной плоскости открыл явление падения всех тел на Земле с одинаковым ускорением. Масса m связана с весом тела, но вес зависит от массы того тела, к которому притягивается масса m . Вес не может служить коэффициентом пропорциональности между силой и ускорением, поэтому ввели понятие инертной массы M , характеризующей «нежелание» тела сдвинуться с места. Масса не зависит от направления движения (это многократно проверялось экспериментально) и с погрешностью до 10^{-9} является скалярной величиной. (В отличие от векторной, каждое значение скалярной величины можно выразить одним, действительным, числом, а совокупность значений изобразить на линейной шкале — таковы длина, площадь, время и т.д.)

Ньютон связал понятия массы и веса тела. Он предположил, что Луна падает на Землю так же, как камень или яблоко, но с ускорением во столько раз меньшим, во сколько квадрат земного радиуса меньше квадрата расстояния между центрами Земли и Луны. Гипотеза зависимости притяжения между точечными массами от квадрата расстояний возникла из геометрической аналогии. Поскольку Луна находится на расстоянии r от Земли в 60 земных радиусов R , а период ее обращения $T = 27,3$ сут $= 2,36 \cdot 10^6$ с, Ньютон оценил отношение ускорений Луны W_c и камня g как $1/3600$. Так как $g = 9,8$ м/с², центростремительное ускорение Луны

$$W_c = \frac{(2\pi r/T)^2}{r} = \frac{(2\pi \cdot 60R/2,36 \cdot 10^6)^2}{60R} = \frac{1,02^2}{60} = 0,0027 \text{ м/с}^2,$$

т. е. g примерно в 60^2 раз больше ускорения Луны. Итак, сила тяготения, действующая со стороны Земли на яблоко или камень, находящийся на орбите Луны, уменьшится в 3600 раз, что и соответствует отношению квадратов расстояний. Значит, сила тяготения между двумя телами должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. В расчетах принято, что небесные тела взаимодействуют так, как будто вся их масса сосредоточена в центре. Доказать это строго Ньютон сумел лишь через 20 лет с помощью созданного

им интегрального исчисления.

Ньютон записал уравнение движения под действием силы тяжести и проверил решение в виде эллиптических траекторий для большого класса начальных условий и не очень больших скоростей. Так он подтвердил предложенную Р. Гуком гипотезу обратной пропорциональной зависимости силы тяготения от квадрата расстояний. На камень внутри Земли внешние слои не действуют или поле внутри однородной сферы равно нулю, поэтому однородный шар (или шаровой слой) притягивает точки внешней области так же, как если бы вся его масса была сосредоточена

94

в центре. Если же интересоваться силой, которая действует внутри Земли или другого тела с распределенной массой, то зависимость от расстояния будет иной.

Ньютон провел серию опытов с маятниками разной массы для повторения опытов Х. Рена и Э. Мариотта по удару и убедился, что свинцовый и деревянный шары падают с одинаковыми ускорениями. Земля одинаково действует на оба шара. Но если действие измерять не ускорением, а силой, удерживающей шары в равновесии на весах, то ее влияние на свинцовый шар будет больше, чем на деревянный. Такое влияние Земли на каждое тело можно выражать тяжестью, измеренной на весах, путем сравнения с тяжестью тела, принятой за единицу. И он ввел понятие силы $F = MW$ как меры действия одного тела на другое, отождествляя вес с силой действия, оказываемого на него Землей. Далее Ньютон указал, что, если бы вокруг Земли вращалось несколько лун, то все они двигались бы под действием аналогичной силы и их движение определялось бы законами Кеплера. Затем Ньютон перешел к изучению других планет и планетных систем (это определение он ввел после открытия спутников у Юпитера и Сатурна), считая, что силы тяготения должны иметь одну природу и у поверхности Земли, и в космосе. Признание материального единства мира — результат коперниканской революции. Если нет различия между земным и небесным и законы едины для всей Вселенной, то их можно изучать и на Земле. Квадрат расстояния в знаменателе отражает евклидову метрику пространства. То есть в трехмерном пространстве поверхность сферы пропорциональна квадрату радиуса.

По Копернику, пространство однородно и изотропно, в нем нет выделенных направлений и точек. В пространстве — евклидова геометрия, и физическим действием обладают только те точки, в которых сосредоточена материя. Поэтому на Земле тела падают в направлении не геометрического центра мира (у него — это центр Солнца), а материального центра Земли. Это утверждение справедливо и для других небесных тел — в этом коперниканский принцип универсальной гравитации как функции массы тел.

Инертная масса определена динамически: прикладывается известная сила, измеряется ускорение и из формулы $F = MW$ выводится масса M . В законе тяготения гравитационную массу определяют статически: измеряют силу взаимодействия между двумя телами, расположенными на определенном расстоянии. У Ньютона масса — единственная причина гравитационного взаимодействия. Галилей пришел к выводу о пропорциональности гравитационной m и инертной M масс, будто бы сбрасывая тела с высоты.

Ньютон не объяснил причину этой пропорциональности; она следует из опытов Галилея: все тела на Земле падают с одинаковым ускорением. Тот факт, что никогда не было обнаружено раз-

95

личия инертной и гравитационной масс, наводит на мысль, что тяготение может быть эквивалентно ускорению. Эйнштейн истолковал этот эффект как истинную природу тяготения и положил его в основу ОТО, возведя равенство масс в принцип эквивалентности. В соответствии с ним, для наблюдателя в свободно падающем лифте законы физики такие же, как и в инерциальных системах отсчета СТО — действия ускоренного движения и силы тяжести полностью взаимно уничтожаются. «Невесомость» человека в спутнике — проявление принципа эквивалентности. А поиски следствий из этого принципа приводят к ОТО. Если тело выделяет энергию E в форме излучения, то его масса уменьшается на E/c^2 . Масса отражает то, что сохраняется при превращении тел из одного агрегатного состояния в другое. В современной физике это уточнено и показано, что масса эквивалентна энергии, и соответствующий закон сохранения относится к массе-энергии.

3.3. Движения планет и законы Кеплера

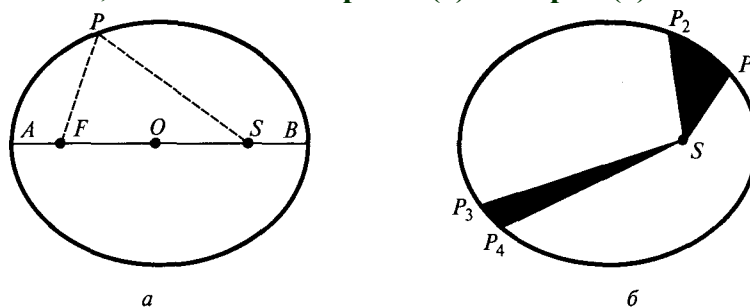
Вокруг Солнца вращаются девять крупных планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Последние три планеты не видны невооруженным глазом, и они были открыты недавно — в 1783, 1846 и 1930 гг. соответственно. Недавно было сообщение об открытии десятой планеты, еще не получившей имени, которая находится между Нептуном и Плутоном. Все планеты шарообразны, светят отраженным светом Солнца. Земля расположена от Солнца на расстоянии 149,6 млн км, принимаемом за 1 а. е., а самая далекая из этих планет, Плутон, — на расстоянии 39,5 а. е. Таковы размеры солнечной системы. Солнце — одна из звезд, которые украшают небосвод. Свет от Солнца доходит до нас за 8,3 с. И. Кеплер, великий немецкий астроном и математик, открыл три закона движения планет. Первые два были получены на основе исследования движения Марса по наблюдениям Тихо Браге и опубликованы в 1609 г.

Кеплер установил, что орбита Марса не окружность, а эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Такая же закономерность оказалась и для движения других планет, только вытянутость эллипса

отличалась. Это и есть **первый закон** Кеплера (рис. 3.1, *а*). Большая полуось AB эллипса равна сумме $(PF + PS)$ расстояний от любой точки эллипса до его фокусов F и S . Эксцентриситет эллипса равен отношению OS/OB . Наиболее вытянутые орбиты у комет. Эллиптичность наиболее заметна у Меркурия (его эксцентриситет $e = 0,21$) и Плутона ($e = 0,25$). Для Земли $e = 0,017$, т.е. орбита Земли почти окружность (149,6 млн км): в январе она на 2,5 млн км ближе к Солнцу, а в июле на то же расстояние дальше.

96

Рис. 3.1. Схемы, поясняющие первый (*а*) и второй (*б*) законы Кеплера



Второй закон Кеплера: каждая планета движется по своей орбите так, что ее радиус-вектор SP описывает за равные промежутки времени равные площади (рис. 3.1, *б*). Пары точек P_1, P_2 и P_3, P_4 выбраны так, что отрезки дуг $\cup P_1P_2$ и $\cup P_3P_4$ планета проходит за одинаковое время.

Это значит, что чем ближе планета к Солнцу, тем больше скорость движения по орбите. Так, Марс вблизи перигелия движется со скоростью 26,5 км/с, а вблизи афелия — 22 км/с. Скорости комет меняются от 500 до 1 км/с. Земля движется со скоростью 29 км/с, причем в январе несколько быстрее.

Третий закон движения планет Кеплера (1618) гласит: отношение кубов больших полуосей орбит двух планет Солнечной системы равно отношению квадратов периодов их обращения вокруг Солнца. Большая полуось — это половина максимального расстояния между двумя точками эллипса. Этот закон позволил оценить размеры Солнечной системы. Для круговых орбит это означало, что

$$\frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}.$$

Ньютон при формулировке закона всемирного тяготения использовал эти законы. Он сумел показать, что они выполняются только в случае, если силы, действующие между тяготеющими телами, пропорциональны закону обратных квадратов, а массы сосредоточены в центре масс.

Третий закон Кеплера соответствовал его представлениям о гармонии и физической причинности, выражая связь между мгновенными значениями меняющихся величин. Так в XVII в. фактически был сделан первый шаг к математическому анализу. Кеплер понимал, что открытые им численные закономерности могут стать основой новой небесной механики, но не знал причины именно такого движения планет. Он считал очевидным, что сила, действующая на планеты, должна меняться по

97

закону обратных квадратов, и исходил из внешней аналогии со светом, интенсивность которого меняется как $1/r^2$. Законы Кеплера подходят и для окружностей, поскольку орбиты планет вытянуты очень мало.

Вращение — одно из основных видов движения в поле тяготения, и ему также соответствует определенная энергия. При равномерном движении по окружности скорость v равна длине окружности $2\pi r$, деленной на период T , т.е. на время одного оборота. Отсюда для кинетической энергии получим:

$$E_{\text{к.вр}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(2\pi r/T)^2}{2}.$$

Гравитация — источник центростремительной силы для небесных тел. Приравнявая эти две силы, можно получить важные соотношения между периодом T и радиусом вращения r планеты или спутника: $-GmM/r^2 = -4\pi^2 mr/T^2$. Разделив обе части на $-m$, получим: $GM/r^2 = 4\pi^2 r/T^2$. Перенесем зависимость от r в левую часть: $GM/r^3 = 4\pi^2/T^2$ и избавимся от дробей: $4\pi^2 r^3 = GMT^2$. Отсюда: $r^3 = (GM/4\pi^2)T^2$. Так мы пришли к третьему закону Кеплера для движения планет: $r^3 \sim T^2$ — кубы радиусов (или больших полуосей) орбит относятся как квадраты периодов.

Итак, закон тяготения Ньютона связан с законами Кеплера, полученными из наблюдений за движением планет Солнечной системы. Закон тяготения Ньютона и законы Кеплера пригодны для движений под действием тяготения в задаче двух тел, где одно является центральным, а второе вращается вокруг него по эллипсу или окружности.

Условием движения спутника по круговой орбите (1-я космическая скорость) является равенство силы тяготения и центростремительной силы. Это правило входит в законы планетных движений: квадраты периодов относятся как кубы больших полуосей (радиусов). Условием для отрыва ракеты от Земли (2-я космическая скорость) может служить равенство кинетической и потенциальной энергий гравитации.

При притяжении тела Землей $g = Gm_3/r^2_3$ и $F = Gm_3m/R^2$, где G — универсальная гравитационная постоянная. В 1798 г. английский физик и химик Генри Кавендиш измерил G с помощью точных крутильных весов (притяжение двух тел измерялось по углу закручивания нити, который регистрировался отраженным световым лучом) и получил значение $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.

3.4. Закон всемирного тяготения

Закон всемирного тяготения Ньютона многие не принимали как не соответствующий здравому смыслу, как теорию действия на расстоянии. Х. Гюйгенс развивал теорию близкодействия, гид-

98

родинамическую модель вращающейся жидкости, подобную вихрям Декарта. Этой модели придерживался и Г.Лейбниц как более наглядной в объяснении воздействия тел. Страстным пропагандистом теории тяготения Ньютона стал Вольтер. Его популярная книга «Элементы учения Ньютона» (1738) сыграла большую роль в изменении общественного и научного мировоззрения во Франции. Была предпринята попытка проверить закон тяготения на Земле, и критерием стала форма Земли. По вихревой модели наша планета должна была быть вытянута у полюсов, а по теории Ньютона — сплюснута.

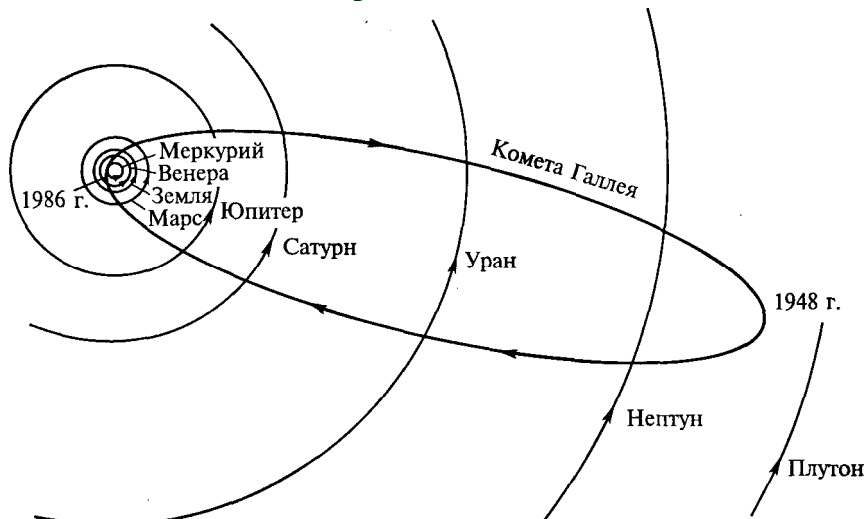
Были организованы экспедиции в Перу и Лапландию (1735, 1736 — 1737) для уточнения формы Земли. П.Мопертюи, руководивший экспедицией на север, показал сплюснутость Земли у полюсов. В этой экспедиции принимал участие А. Клеро. После обработки полученных результатов он опубликовал книгу «Теория фигуры Земли», построенную на основе гидростатической модели эллипсоида вращения. Клеро предположил, что Земля ранее была жидкой, ее частицы взаимодействовали друг с другом по закону всемирного тяготения, и вся масса медленно вращалась вокруг оси. Эта работа имела огромное значение для геодезии и теории Земли.

Тем самым теория тяготения Ньютона получила подтверждение на Земле. Это нанесло удар по взглядам ученых, которые считали, что все процессы физического мира должны представляться наглядно. Солнечная система у Ньютона — гигантский механизм, в котором гравитация управляет движением всех его элементов. Но, изучая движение конкретной планеты, нельзя не учитывать воздействие других планет и их спутников, хотя оно и мало по сравнению с притяжением Солнца. Его называют *возмущением*, или пертурбацией (от лат. *perturbatio* — расстройство, смятение). Английский астроном и геофизик Э.Галлей, изучая материалы наблюдений, обратил внимание на сходство орбит комет в 1456, 1531, 1607, 1682 гг. и периодичность их появления (около 76 лет). Он заключил, что это была одна и та же комета, и предсказал ее возвращение в 1758 г. (рис. 3.2). Но из-за возмущающего действия Юпитера и Сатурна комета Галлея появилась только в следующем году почти в точном соответствии с расчетами Клеро (он ошибся только на 19 дней!). Предсказание возвращения кометы стало первой убедительной победой теории Ньютона. Клеро проверил теорию Ньютона и по движениям Луны. Он составил точные лунные таблицы и по своим разработкам написал книгу «Теория движения Луны» (1751).

Близость Луны к Земле (около 400 тыс. км) позволяла провести измерения достаточно точно. Еще в 1693 г. Галлей заметил, что современные ему данные по орбите Луны расходятся с древними наблюдениями так, будто орбита уменьшается за столетие на $10''$. Эйлер связал ускорение с торможением в окружающей среде, а не с тяготением, Лаплас — с малы-

99

Рис. 3.2. Орбита кометы Галлея



ми изменениями вытянутости земной орбиты из-за планетных возмущений. Их объяснения (1787) верны только отчасти: такие колебания существуют, вызывая наступления ледников, так как за десятки тысяч лет широта местности может измениться. Но, кроме этого, есть еще ускорение Луны, вызванное приливами. Этот

эффект кажущийся, а причина — замедление вращения Земли из-за приливного трения. Оценка эффекта дает за 1 млрд лет удвоение суток и удаление Луны от Земли на расстояние до 600 тыс. км.

Другое явление, позволявшее усомниться в пригодности закона Ньютона, было ранее замеченное некоторое ускорение движения Юпитера и замедление движения Сатурна (Кеплер, 1625; Галлей, 1695). Оно должно бы за долгие миллионы лет разрушить Солнечную систему, но этого не произошло. Анализ планетных возмущений привел Лагранжа (1776) и Лапласа (1784) к *теореме устойчивости* Солнечной системы: взаимные возмущения планет, движущихся по почти круговым орбитам примерно в одной плоскости и в одну сторону, приводят лишь к почти периодическим колебаниям эксцентриситетов и наклонов вблизи нуля, тогда как расстояния до Солнца колеблются вблизи своих начальных значений. Или — большие оси кеплеровских эллипсов не испытывают вековых возмущений. Эта теорема доказана Лапласом для первых членов ряда возмущений. Взаимные возмущения Юпитера и Сатурна существуют, и их значения колеблются с периодом в 900 лет. За 450 лет накопления возмущений эта величина составляет меньше одного градуса.

100

Самым убедительным подтверждением ньютонова закона тяготения в Солнечной системе явилось открытие «на кончике пера» еще одной планеты, названной Нептуном. Открытие этой планеты — триумф науки и, конечно, закона всемирного тяготения. Границы Солнечной системы расширились почти вдвое.

В 1781 г. У. Гершель открыл новую планету Уран. Для нее были вычислены элементы орбиты и составлены таблицы движения. Но заметили, что Уран в своем движении отклоняется от рассчитанного по закону Ньютона: за три года — на 2' при погрешности измерений в доли секунд. Французский астроном У. Леверье предположил, что это отклонение вызвано влиянием неизвестной планеты, находящейся дальше Урана, и сделал расчет ее орбиты. Леверье сообщил результаты в письме от 18 сентября 1846 г. берлинскому астроному Галле, который имел звездные карты, содержавшие слабые звезды. Галле обнаружил в указанном месте слабую звездочку 8-й величины, которой на картах не было. Через день она переместилась относительно ближайших звезд, а в более сильный телескоп удалось разглядеть маленький диск. Это была предвычисленная по закону всемирного тяготения новая планета Солнечной системы. Ее положение на небе отличалось от предсказанного расчетом Леверье всего на 52". В это же время английский студент Дж.Адамс, впоследствии известный астроном, независимо от Леверье проделал нужные расчеты, поэтому у этого предсказания два автора, хотя официально признан первый. Позже было обнаружено, что в зарисовках Галилеем видимого в его телескоп участка неба есть слабенькая звездочка, которую он не догадался принять за новую неизвестную планету.

Планета Плутон была открыта 21 января 1930 г. Ее орбита вытянута столь сильно, что заходит даже внутрь орбиты Нептуна, как было в течение 20 лет (1979—1999).

Смещение перигелия Меркурия, обнаруженное около века назад, не удавалось объяснить по закону Ньютона. Ведь эллиптические орбиты планет не должны меняться со временем, и ближайшая к Солнцу точка орбиты — перигелий — не должна смещаться по отношению к неподвижным звездам. Но перигелий прецессировал с малой скоростью, и орбита напоминала поворачивающийся эллипс — не учитываемый эффект — 43" в 100 лет. Само измерение столь малой величины с такой погрешностью — тоже большое достижение (погрешность менее 1 %).

Подозревали, что есть еще одна планета, возмущающая орбиту Меркурия, ее даже условно называли Вулканом, но не нашли. Появилось мнение, что закон тяготения Ньютона неточен. «Подправил» его в 1915 г. А.Эйнштейн: смещение перигелия планеты Меркурий удалось объяснить только в рамках ОТО (общей теории относительности). Эти поправки играют роль только вблизи больших тяготеющих масс.

По ОТО, перигелии орбит при каждом обороте планеты вокруг Солнца должны перемещаться на долю оборота, равную $3(v/c)^2$.

101

Для перигелия Меркурия получается 43", угол поворота перигелия за сто лет составляет 42,91". Эта величина соответствует обработке наблюдений за Меркурием с 1765 по 1937 г. Так была объяснена прецессия перигелия орбиты Меркурия. Было показано, что для практических задач закон Ньютона дает хорошие результаты, но для больших скоростей и вблизи больших масс нужны иные законы.

Достижения космонавтики — величайшее подтверждение закона всемирного тяготения. Скорость, с которой должно двигаться тело у поверхности Земли, не падая на нее, называется *первой космической*. Она определяется из равенства ускорения свободного падения и центростремительного ускорения при условии, что тело движется по круговой орбите с радиусом, равным радиусу Земли, и равна 7,9 км/с. Впервые эта скорость была достигнута 4 октября 1957 г., когда советская ракета вывела на орбиту вокруг Земли первый искусственный спутник массой всего 83,6 кг. Он просуществовал как космическое тело 92 сут, совершив 1400 оборотов вокруг Земли. Искусственные спутники Земли несут трудовую вахту, решая многие задачи (дальняя радиосвязь, телевидение, метеорология, навигация, разведка, сейсмология и др.). Первый спутник был выведен на орбиту советской двухступенчатой ракетой-носителем «Спутник», ставшей основой для семейства ракет «Восток» и «Союз». Принцип действия ракеты можно объяснить с помощью второго и третьего законов Ньютона. Равенство кинетической и потенциальной энергии гравитации служит условием отрыва ракеты от

Земли и определяет *вторую космическую* скорость, равную 11,2 км/с. Старт первой автоматической станции «Луна-1» 2 января 1959 г. позволил впервые преодолеть рубеж второй космической скорости и выйти за пределы околоземного пространства. 12 апреля 1961 г. в космос был выведен космический корабль «Восток» с первым летчиком-космонавтом Ю. А. Гагариным. Так началась новая эра в истории освоения космоса людьми.

У. Гершель, открывший планету Уран и два ее спутника и измеривший звездный параллакс, хотел доказать, что «острова» во Вселенной существуют, каждый из них состоит из миллионов звезд, удерживаемых вместе за счет взаимного притяжения. Как Гюйгенс и Ньютон, он считал, что все звезды имеют одинаковую светимость, и тогда яркая звезда в паре со слабой должна быть ближе, чем слабая, и ее смещение за год будет больше. За 1782—1784 гг. Гершель измерил угловые расстояния почти 700 звезд, но смещения были не те, что он ожидал. Только в 1803 г. он понял, что открыл *орбитальные движения звезд*, образующих физические пары, компоненты которых движутся вокруг общего центра масс по закону Ньютона (они были названы визуально-двойными). Значит закон тяготения Ньютона всемирнен. На его

102

основе Гершель, Кант и Ламберт стали объяснять видимые явления во Вселенной. Гершель открыл двойные звезды, составил каталог двойных и кратных звезд (1784).

Кроме того, Гершель установил, что звезды в некоторых парах имеют разную светимость, а таких пар с отличающимися яркостями в сотни раз оказалось множество. Это не объясняется разной удаленностью звезд в паре. Все наблюдаемые в телескоп звезды образуют вместе с Млечным Путем тот «остров», к которому принадлежит и наше Солнце, а далекие «мировые острова» представляются нам туманностями, как считал и Кант. Гершель решил, что планетарные туманности — звездные системы в последней стадии гравитационного коллапса, а «звезды, их образующие в результате некоторых нарушений или утраты энергии, уже не могут больше поддерживать своего первоначального положения... и, наконец, собираются вместе и вследствие соударений объединяются в новое тело». Это объясняло природу «новой» звезды, которую видел Тихо Браге в 1572 г. в созвездии Кассиопеи, а И.Кеплер в созвездии Змееносца. Гершель обнаружил в 1790 г. новое явление — «звезду примерно 8-й величины со слабосветящейся атмосферой!» Это была планетарная туманность NGC 1514. И он нашел объяснение — это звезда, конденсирующаяся из облака светящегося вещества под действием гравитации. Так У. Гершель еще раз подчеркнул единство Вселенной и роль в этом закона всемирного тяготения.

Итак, подтверждением закона всемирного тяготения являются: в Солнечной системе — предсказание возвращения кометы Галлея, объяснение движений Луны, оценки планетных возмущений, обнаружение планеты Нептун по возмущениям планеты Уран, а затем планеты Плутон, сплюснутость Земли у полюсов, траектории астероидов, полеты космических аппаратов и т. п.; **вне Солнечной системы** — движение звезд в системе двойных звезд и звездных систем. Но и вне Солнечной системы использование закона тяготения привело к появлению ряда парадоксов (фотометрическому, космологическому и др.), которые были разрешены только в ОТО.

В закон Ньютона входит универсальная гравитационная постоянная *G*, определенная в опытах Кавендиша. Знание *G* позволило «взвесить» Землю, определить ее среднюю плотность, которая оказалась больше, чем вблизи поверхности. Значит, плотность растет с глубиной, Земля неоднородна. Это подтверждают и другие исследования, в частности сейсмические. На земной поверхности ускорение свободного падения почти постоянно, отличаясь из-за сплюснутости у полюсов на 0,18 % и из-за центробежных сил при перемещении от экватора к полюсу — на 0,34%.

Уровень земных морей и океанов, испытывающий периодические изменения, связанные с лунными сутками, зависит от приливного (или дифференциального) гравитационного притяжения. С ним же связаны и другие эффекты. Например, лунные

103

сутки примерно на час длиннее, ось вращения Земли испытывает прецессию с периодом примерно 26 000 лет, большая ось лунной орбиты вращается в прямом направлении (в направлении ее орбитального движения) с периодом почти 9 лет, точки пересечения лунной орбиты с земной (узлы лунной орбиты) движутся несколько назад вдоль орбиты с периодом 18,6 лет и т.д. При этом приливообразующая сила Луны более чем в 2 раза превышает силу Солнца, поскольку эта сила пропорциональна кубу расстояний (что следует из расчета с использованием закона тяготения Ньютона).

Точное и устойчивое решение задачи трех тел, как было показано позднее Лагранжем, возможно только в том случае, когда три тела лежат в вершинах равностороннего треугольника, вращающегося вокруг центра масс данной системы с постоянной угловой скоростью $2\pi/T$. Эти точки устойчивости определяют оптимальные условия работы космических станций.

3.5. Связь законов сохранения со свойствами пространства и времени

Закон тяготения Ньютона определяет притяжение двух точечных масс. Для двух точечных неподвижных зарядов сила электростатического взаимодействия (закон Кулона) имеет такой же вид, как и в поле

гравитации, только вместо масс будут стоять заряды q и Q . Знак зарядов может быть разным в отличие от масс, которые всегда положительны, и сила может быть притягивающей (-) или отталкивающей (+). Если тело не подвергается внешнему воздействию, его состояние движения остается постоянным. При взаимодействии двух тел сохраняется импульс $P = \Delta v$. Инертная масса M определяется так, чтобы импульс при столкновении двух тел оставался неизменным. При упругом столкновении тел сохраняется еще одна величина — $(1/2) Mv^2$, или кинетическая энергия (раньше ее называли живой силой). Эта величина всегда положительна. При взаимодействиях изолированных двух тел сохраняется сумма кинетической и потенциальной энергий, или полная энергия системы.

В изолированной системе сохраняется и момент импульса, который часто называют кинетическим моментом. Он равен векторному произведению расстояния r от оси вращения и импульса Mv .

Реакция вращающейся системы на внешнее воздействие проявляется в *гироскопических эффектах*. Земля — большой волчок, и ось ее вращения сохраняет свой наклон по отношению к горизонтали практически неизменным, но испытывает прецессию относительно вертикальной оси.

104

Потенциальную энергию считали равной «ушедшей на время» кинетической энергии ради сохранения энергии при взаимодействиях. Выделим три случая:

а) в поле гравитации потенциальная энергия пропорциональна вертикальному смещению тела и его инертной массе $E_{п.гр} = Mgh$. Более точным является выражение GmM/r , в которое входят расстояние до центра Земли r и универсальная постоянная G . По мере удаления от центра Земли потенциальная энергия начинает убывать скорее, и в знаменателе этой формулы будет стоять r^2 . При малых перемещениях вблизи поверхности сохраняется Mgh ;

б) потенциальная энергия пружины пропорциональна квадрату ее деформации $E_{п.гр} = (1/2)kx^2$;

в) магнитная потенциальная энергия в грубом приближении обратно пропорциональна первой степени расстояния между магнитами: $E_{п.магн} = K/x$.

Наклон графика зависимости потенциальных энергий от расстояния отражает тенденции изменения.

Сила, которую развивает система при убывании ее потенциальной энергии, выражается через наклон кривой потенциальной энергии, взятой со знаком «минус»: $F = -\partial E/\partial x$. Сила измеряется в ньютонах: 1 Дж/м = 1 Н.

Для указанных выше значений потенциальных энергий получим значения силы по записанной выше формуле. Поскольку для потенциальной энергии гравитации, равной Mgh , график — прямая с постоянным наклоном, сила гравитации равна Mg , т. е. силе тяжести тела, и направлена вертикально вниз. Для сжатой пружины потенциальная энергия пропорциональна квадрату сжатия, поэтому сила пропорциональна упругости пружины и величине сжатия и направлена в противоположную сторону: $F = -kx$. Для отталкивания цилиндрических магнитов потенциальная энергия пропорциональна обратной величине расстояния между полюсами магнитов, поэтому сила пропорциональна обратной величине квадрата расстояния, т. е. $1/x^2$.

Работа — скалярное произведение силы на перемещение, на протяжении которого она действует; можно записать: $A = Fx$. Но работа равна изменению потенциальной энергии той системы, на которую сила воздействует. А сила может увеличить и скорость тела (кинетическую энергию), и его потенциальную энергию, связанную с его положением. Отсюда иное определение силы: это изменение потенциальной энергии системы, отнесенное к тому расстоянию, на котором оно произошло, и равное изменению импульса системы, отнесенному к тому времени, за которое оно произошло. Это понятие наглядно, оно сохранилось с древних времен, а в современной науке является производным от энергии, сохраняющейся в замкнутых системах.

В изолированных системах при движении сохраняется полная энергия системы. Кроме того, для поступательного движения сохра-

105

няется *импульс*, а для вращательного — *момент импульса*. Поскольку последние две величины — векторные, каждой из них соответствует по три сохраняющихся компоненты импульса и момента импульса. Таким образом, при взаимодействиях в изолированных системах имеют место семь сохраняющихся величин.

Установленные связи между свойствами пространства и времени и законами сохранения содержались в скрытой форме в принципах классической механики Галилея — Ньютона. Галилей рассматривал пространство и время как реальности, существующие вне нашего сознания. Его принцип относительности отражал *однородность* и *изотропность* пространства. У Ньютона пространство и время абсолютны в том смысле, что свойства пространства не зависят от движущихся в нем тел и протекающих механических явлений, а свойства времени — от движущейся материи. Пространство и время не связаны между собой, они как бы арена, где происходят события. Однородность и изотропность пространства и времени необходимо следуют из законов Ньютона.

Впоследствии оказалось, что законы Ньютона можно заменить единым постулатом — *вариационным принципом*, который был удобнее во многих отношениях, его можно использовать при формулировке сложных задач. В механике материальной точки этот постулат равноценен законам Ньютона. Схему, основанную на законах Ньютона, иногда называют *векторной механикой*, поскольку она имеет дело с

векторными величинами, например скоростью, силой, ускорением.

Аналитическая механика построена по схеме, введенной Лейбницем и развитой Эйлером, Лагранжем, Гамильтоном. Ее величины — скаляры, и динамические соотношения получаются через операции дифференцирования. Методы аналитической механики позволили решать более сложные задачи. Оказалось, что их можно распространить на теорию поля или квантовую механику, где механика Ньютона теряет свою применимость. В аналитической механике для замкнутых систем существуют такие функции координат и скоростей материальных точек, которые при движении системы не меняются. Их называют *интегралами движения*. Если в системе N материальных точек, то сохраняющихся величин будет $N - 1$. Среди них есть такие, которые обладают свойством *аддитивности*, т.е. значение интеграла движения для системы, состоящей из невзаимодействующих частей, равно сумме значений для каждой из частей в отдельности. Все эти три сохраняющиеся величины (или семь скалярных) — интегралы движения.

Эстетически вернее было бы постулировать законы механики в аналитической форме, а потом показать, что в некоторых ограниченных простейших случаях можно получить законы Ньютона. Но векторная форма проще и нагляднее, поэтому решение — какой путь избрать при обучении — неоднозначно. В аналитической механике показывается, что со-

106

стояние любой системы можно описать введением функции Лагранжа, зависящей от координат и скоростей. И, если известно, что в моменты времени t_1 и t_2 система занимает определенные положения, характеризуемые наборами координат, то среди возможных движений между этими положениями реальным будет то, вдоль которого действие будет иметь минимум (вернее, экстремум).

Действием называется величина — скалярная функция обобщенных координат

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\dot{q}_i, q_i, t) dt, \text{ где } L(\dot{q}_i, q_i, t)$$

i — индекс координаты), скоростей \dot{q}_i ($\dot{q}_i = dq_i/dt$) и времени t . Системы N степенями свободы имеют N сохраняющихся величин. Но не все они одинаково важны, некоторые имеют общее значение, связанное со свойствами симметрии пространства и времени. С однородностью времени оказался связан *закон сохранения энергии*, с однородностью пространства — *закон сохранения импульса*, с изотропией — *закон сохранения момента импульса*. Общий вывод аналитической механики приводит к мысли, что перечисленные законы сохранения потому и стали великими, что связаны и определяются свойствами симметрии пространства и времени. На фундаментальный характер свойств симметрии обратил внимание еще И. Кеплер в своем труде «О гармонии мира», опубликованном в 1619 г.

«Симметричное обозначает нечто, обладающее хорошим соотношением пропорций, а симметрия — тот вид согласованности отдельных частей, который объединяет их в целое. Красота тесно связана с симметрией», — писал Г. Вейль. При этом он ссылаясь не только на пространственные соотношения, но также синонимом симметрии считал гармонию, указывающую на акустические и музыкальные приложения идеи симметрии. Многим творениям человеческих рук симметричная форма придается как из эстетических, так и практических соображений. Свойствами симметрии занимались многие кристаллографы — Е. С. Федоров, Г. В. Вульф, А. В. Шубников и др. И каждый из них отмечал в различных проявлениях симметрии в кристаллах основополагающую роль строения материи и всеобщий характер влияния симметрии на окружающий мир.

Центральная симметрия (поворотная) широко распространена в природе (вспомним причудливую симметрию снежинок).

Трансляционная симметрия (пространственная) представлена в многочисленных орнаментах, дошедших до нас из древности. Временная трансляционная симметрия прослеживается во всех периодически повторяющихся процессах. Примерами их могут быть и монохроматическая волна, и песни, и стихи, и колебательные химические реакции, и художественные произведения.

Зеркальная симметрия в геометрии относится к операциям отражения или вращения. Она была особо почитаема в Древнем Во-

107

стоке, что отражено в орнаментах и скульптурах той эпохи. Западное искусство, напротив, смягчало и даже слегка нарушало строгую симметрию. Зеркальна симметрия углов падения и отражения светового луча от гладкой поверхности. Зеркально симметричен узор крыльев бабочек или птиц относительно своей продольной оси. Мелкие организмы, взвешенные в воде, имеют почти шарообразную форму. У организмов, живущих в морских глубинах и подверженных давлению силы тяжести, множество поворотов вокруг центра (т. е. вращательная способность) свелось к отдельным поворотам вокруг некоторой оси. Действие факторов филогенетической эволюции, стремившейся вызвать наследственное различие между правым и левым, тормозилось теми преимуществами, которые животное извлекало из зеркально-симметричного расположения своих органов. Этим можно объяснить, почему наши конечности более подчиняются симметрии, чем внутренние органы. Возможно, это связано и с онтогенезом левого и правого, с плоскостью первого деления клетки.

Наибольшей симметрией обладают кристаллы, но не у всех из них наблюдается зеркальная симметрия. Существование оптически активных кристаллов, т.е. поворачивающих плоскость поляризации падающего на

них света, долгое время казалось удивительным. Расположение сердца и закручивание кишечника у человека почти всегда (99,98 %) левостороннее. В нашем теле у глюкозы правовращающая форма, у фруктозы — левовращающая. Было установлено, что большинство соединений углерода в природе встречается и в той, и в другой форме.

В пространстве различие между правым и левым связано с ориентацией винта, т. е. структура пространства не позволяет отличить их иначе как с помощью договоренности или произвольного выбора, на что указывал еще Лейбниц. В физике правое и левое — эквивалентны, а в мифологических представлениях символизируют соответственно добро и зло. Люди при встрече пожимают друг другу правую руку, в живописи правое создает иное настроение, чем левое.

Понятия симметрии играют в жизни человека важную роль. Природа красива и требует для своего описания красивых уравнений. Возможность записать законы природы с помощью математических формул — величайшее открытие человечества.

3.6. Колебания и волны в природе и их описание. Гармонический осциллятор

Современный мир полон волн: волны звука, распространяющиеся в воздухе и других веществах; переменный ток, используемый в быту и технике; волны механических колебаний в струнах

108

или кристаллах кварца, используемые для стабилизации частот радиопередатчика или в часах; волнение и зыбь в озерах, прудах и океанах; волны землетрясений, изучаемые сейсмологами; электромагнитные волны, которые образуют свет и передают информацию по теле- и радиоканалам; волны вероятности, используемые в мире квантов для предсказания поведения микрочастиц и более сложных форм вещества.

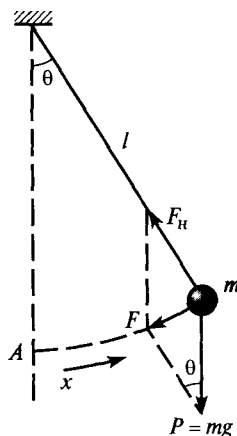
Механические колебания — это движения, которые повторяются через определенные промежутки времени. Чаще всего они возникают при нарушении устойчивого состояния равновесия системы, при этом равнодействующая сил не равна нулю. Одна из сил должна зависеть от времени, и система должна обладать избыточной энергией. Если трением пренебречь, за полное колебание выполняется закон сохранения и превращения энергии. Колебания могут происходить при наличии упругих сил, силы тяжести; электрические колебания (напряжений и сил токов) происходят в электрических цепях, а вокруг этих цепей колеблются напряженности электрического и магнитного полей. Несмотря на разную природу колебаний, в них обнаруживаются общие закономерности. Физическая система, совершающая колебания, называется **осциллятором**.

Гармонический осциллятор, определяемый колебаниями массы, прикрепленной одним концом к пружине, является самым простым примером гармонического движения. Математический маятник состоит из точечной массы, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити. При малой амплитуде почти каждый колебательный процесс можно считать гармоническим (рис. 3.3).

Период колебаний маятника при малых амплитудах, как установил еще Галилей, определяется его длиной и не зависит от массы маятника. Период колебания маятников разной длины l пропорционален квадратному корню из их длин $T = 2\pi\sqrt{l/g}$; пружины — обратно пропорционален собственной частоте колебаний $\omega = 1/\sqrt{m/k}$ (k — жесткость пружины). Это свойство изохронности колебаний маятника использовалось в XVII в. для отсчета равных промежутков времени, но колебания затухали, приходилось маятник подталкивать, и не было автоматического счета числа колебаний. Гюйгенс применил маятник в своих часах в качестве регулятора и довел их до практического использования и коммерческого успеха. Восемнадцатое столетие даже получило наименование века часов, хотя тогда они использовались, в основном, для определения долготы места.

Если сместить тело массой m , прикрепленное к пружине, то со стороны пружины на него будет действовать возвращающая сила, направ-

Рис. 3.3. Модель математического маятника



109

ленная в сторону, противоположную силе, вызвавшей смещение (будем считать, что трение отсутствует). Для небольших смещений x возвращающая сила $F = -kx$. Используя второй закон Ньютона, можно записать: $F = mW = -kx$, откуда ускорение $W = -(k/m)x$.

Это выражение — основной закон простого гармонического колебания: ускорение материальной точки математического маятника пропорционально смещению.

На языке колебаний и волн наиболее ясно предстает единство природы. *Гармонические колебания* описываются функцией, колеблющейся по закону синуса или косинуса: $S(t) = A \sin((\omega t + \varphi_0))$, где A , φ_0 — постоянные величины; A — амплитуда колебаний, $\omega t + \varphi_0$ — фаза; ω — круговая частота ($2\pi/\omega = T$ — период колебаний; $\sqrt{T} = v$ — частота). Если амплитуда со временем убывает, то колебания становятся *затухающими*; если они происходят под действием внешней, периодически повторяющейся силы, их называют *вынужденными* если же за счет внутренних сил системы после выведения ее из состояния равновесия, то это — *свободные колебания*. Колебательные явления могут иметь разную природу, но обладать общими чертами и даже подчиняться общим закономерностям, что позволяет единым образом рассматривать механические, электрические и другие колебания. Поэтому их классифицируют по способу возбуждения (собственные, вынужденные, параметрические и автоколебания), по зависимости какой-то изменяющейся величины от времени и пр. С точки зрения кинематики различают периодические и непериодические колебания.

Всякая система, совершающая колебания, обладает своим способом колебательного движения, которому соответствуют собственные колебания, а им — собственные частоты. Их можно выделить в любом колебании. Если на систему подействовать периодически меняющейся силой, то система откликнется малыми колебаниями, частота которых будет совпадать с частотой вынуждающей силы. Если частота этой силы совпадет с одной из собственных частот системы, то амплитуды колебаний резко возрастут. Такое явление называется *резонансом*. Резонанс имеет место при настройке радиоприемника на частоту передающей станции. В нелинейных системах, содержащих источник энергии, могут возникать незатухающие колебания и без внешнего воздействия — это *автоколебания*.

Любое повторяющееся движение можно рассматривать как результат сложения простых гармонических колебаний, а любое волновое движение — как сумму простых гармонических волн. Этот тезис, доказанный (1822) французским математиком и физиком Ж.Б.Фурье, служит основой для изучения повторяющихся явлений в самых разных областях. Волновые свойства света и микрочастиц лежат в основе современной картины мира. Гармоническое

110

колебание играет значительную роль при изучении любых колебаний (особенно в акустике и оптике).

Волны — это изменение состояния среды, распространяющееся в ней без переноса вещества и несущее с собой энергию и импульс. Энергия, импульс и скорость — важнейшие характеристики волн. Процесс распространения колебаний (волна) может быть описан в общем виде математически. Основные свойства волн можно изучить на простых примерах и сформулировать общие положения, которые будут справедливы для любого типа волн.

Морские волны бьются о берега, при штормах ворочают огромные камни и переворачивают корабли. Телецентр излучает волны мощностью в десятки тысяч ватт, малую долю которых улавливают телевизоры. Волны переносят энергию любой величины от одной точки к другой, распространяясь с конечной скоростью, зависящей от среды их распространения: так, световые волны распространяются со скоростью 300 000 км/с, звуковые (в воздухе) — 344 м/с. Электромагнитные волны, приходящие на Землю от Солнца, имеют мощность порядка 1 кВт/м² в широком диапазоне длин волн; эта энергия преобразуется зелеными растениями в химическую. При сжигании дерева или угля эта энергия вновь высвобождается. Наличие импульса у электромагнитных волн менее заметно, но оно было даже измерено П. Н.Лебедевым (1912). Существуют проекты использования светового давления на огромные паруса для передвижения в Солнечной системе.

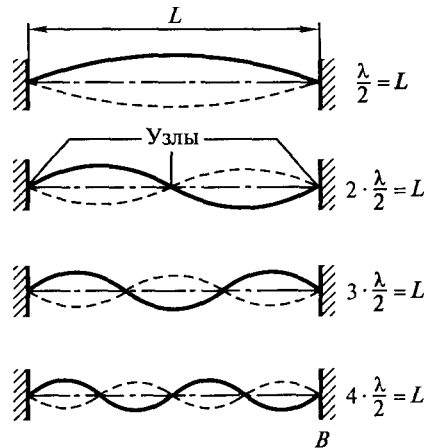
Монохроматической называют волну от гармонического источника. Если колебания происходят по гармоническому закону, при распространении от источника до точки на расстоянии z волна приходит с некоторым запаздыванием, связанным с конечной скоростью распространения волны: $x(t, z) = A \cos(t - z/u)$. В плоской волне амплитуда одинакова везде, а в сферической — убывает обратно пропорционально квадрату радиуса.

Волновой фронт — геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе. Он отделяет область пространства, вовлеченную в волновой процесс, от той, где колебания еще не возникли. В зависимости от волновой поверхности волны могут быть *плоскими* или *сферическими*.

Если тело участвует в нескольких волновых движениях, то эти движения складываются в одно. Волновое движение образуется, если колеблющихся частиц много и они связаны между собой. Каждая испытывает влияние возвращающих сил, поэтому сами частицы или части пружины больших перемещений не совершают, но вдоль пружины распространяется импульс. Следя за перемещением импульса, проходящего расстояние dx за время dt , можно ввести его скорость как $v = dx/dt$. При не очень больших возмущениях среды волновое движение подчиняется принципу суперпозиции — два импульса распространяются независимо. Если два импульса проходят через пружину и друг через друга, смещение пружины оказывается равным сумме

отдельных смещений. Импульсы, равные
111

Рис. 3.4. Схема образования стоячей волны



во всех отношениях, гасят друг друга в момент встречи (если имеют противоположные знаки) или складываются (при одинаковом направлении распространения).

Бегущая волна образуется следующим образом. Пусть один конец пружины или струны закреплен и ни одна точка не испытывает смещений, а ко второму концу приложена сила, которая начинает в момент времени $t = 0$ поднимать и опускать его. При распространении этого воздействия на соседние участки по струне или пружине побегит волна со скоростью $v = dx/dt$. Расстояние x , которое данный участок волны проходит за время t , равно vt . Период T возбуждающего колебания и будет *периодом волны*, за время T волна распространяется на расстояние, называемое длиной волны λ . Тогда скорость волны $v = \lambda/T = \lambda\nu$. Отсюда $x = vt = \lambda t/T$.

Амплитуда волны меняется по закону: $y(t) = y_0 \cos(2\pi/T)t$. Из выражения для скорости волны получаем: $t/T = x/\lambda$. Зависимость амплитуды волны от координаты в любой момент времени имеет вид: $y(x) = y_0 \cos(2\pi/\lambda)x$.

В **поперечных волнах** частицы перемещаются перпендикулярно направлению распространения волны. Смещение среды может также вызвать импульс, распространяющийся перпендикулярно к нему. Такой эффект наблюдают, когда резким боковым движением посылали импульс вдоль веревки. В электромагнитных волнах направления электрического и магнитного полей перпендикулярны направлению распространения волны.

В продольных волнах частицы перемещаются вдоль направления распространения волны, например, распространение звука в воздухе или волн сжатия — растяжения в самой пружине. В звуковых волнах плотность газа, где распространяется звуковая волна, меняется по закону синуса.

В твердых телах распространяются продольные волны, в случае неоднородной плотности могут распространяться и поперечные.

Стоячая волна (рис. 3.4) возникает, если у струны закрепить оба конца. Импульс будет отражаться от обоих концов и бегать по струне. Так как расстояния между импульсами одинаковы, процесс будет повторяться. Если первоначальный импульс — синусоидальный и оба импульса равны по амплитуде, распространяются в

разные стороны, смещение в точке поворота меняет знак, можно получить также синусоидальную волну, форма которой между двумя закрепленными точками остается неизменной, а амплитуда меняется со временем. Точки, в которых смещений нет, называют *узлами*, а точки максимального отклонения вниз или вверх — *пучностями* стоячей волны. На струне длиной L можно возбудить стоячие волны, даже если ее узлы приходятся на точки закрепления струны: $n(\lambda/2) = L$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. На соседних участках колебания противоположны по фазе. Стоячие волны на струне можно представить и как результат сложения двух бегущих волн. При наложении друг на друга они создадут весьма устойчивую картину.

Понятие стоячих волн, зародившееся в науке о звуковых колебаниях, распространилось и на другие колебательные системы, благодаря чему была решена задача теплового излучения, приведшая к созданию квантовой гипотезы. С использованием этой модели и волновой механики проникли в строение атома и сумели его описать. В современной теории атом рассматривается как система, обладающая определенными формами стоячих волн с характеристическими частотами. Вместо орбит в модели атома Бора теперь вводят замкнутые кольца стоячих волн. Чем дальше орбита, тем большее число пучностей должно войти в это кольцо. По тому же принципу строятся модели для атомного ядра. Волны — это не просто участки струны, отклоняющиеся вверх и вниз, и даже не колеблющиеся электроны, а мера вероятности того, что частица находится в данном месте.

Поверхностные волны распространяются по поверхности раздела сред. Волны на поверхности воды сопровождают перемещение судов. Если создать возмущение на поверхности воды в глубоком бассейне, то возникнут волны. Частицы жидкости, находящиеся вблизи впадины, при создании возмущения будут

стремиться заполнить ее под действием тяжести, создавая волны в воде. Частицы волны будут двигаться почти по окружностям, т. е. как бы совмещая свойства продольных и поперечных волн, но отличаясь от них обеих. Радиусы окружностей с глубиной уменьшаются до нуля. Скорость распространения волны c зависит от λ : для длинных волн — пропорциональна $\sqrt{g\lambda}$, для коротких — $\sqrt{\sigma/(\lambda\rho)}$, а для средней длины — от всех перечисленных параметров (здесь ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения). Значит, длинные волны вызваны силой тяжести, а короткие — силой поверхностного натяжения. Если длина волны меньше глубины водоема, то вблизи дна наблюдается чисто продольное движение, а на поверхности и вблизи нее каждая частица воды движется по эллипсу (комбинации колебаний в двух направлениях).

Необычную волну — уединенную — наблюдал в 1834 г. шотландский ученый Дж. Рассел. Баржу тянули по каналу; после неожиданной остановки приведенная ею в движение масса воды

113

остановилась около носа баржи, а затем оторвалась от него. И это уединенное возмущение покатилося по каналу с большой скоростью, не меняя формы. Рассел заметил, что не меняется и скорость C этой уединенной волны, она зависит от глубины канала h и высоты волны a : $C = \sqrt{g(a + h)}$, $a < h$. Кроме того, одна большая волна может распадаться на несколько, и эти волны проходят одна через другую, подобно малым волнам на поверхности. Многие отнеслись критически к открытым Расселом свойствам уединенной волны.

Уравнение для описания длинных волн на воде вывели датские ученые Д.Д.Кортевег и Г. де Фрис (1895). Их уравнение, известное по имени авторов как уравнение КдФ, является дифференциальным уравнением в частных производных и годится для описания самых разных нелинейных волн. Если скорость линейных волн зависит от длины волны и не зависит от амплитуды, то для нелинейных волн существенны обе зависимости. Точное решение имеется лишь для волн без дисперсии. Нелинейные волны начал изучать еще великий немецкий математик Георг Риман. Нелинейность проявляется при «опрокидывании» набегающих волн, которую можно наблюдать на речной отмели или в прибое на берегу моря. При нарастании крутизны волны может образоваться волна в виде ступеньки, которую называют *бором*. Бор — один из примеров **ударной волны**. Другие примеры ударных волн — взрывной звук, слышимый, когда реактивный самолет проходит звуковой барьер или когда пастух щелкает бичом. Ударные волны в воздухе — явление сложное; на фронте ударной волны скачком растут давление, плотность, температура, и значения этих скачков столь велики, что происходит яркое свечение (ядерный взрыв, падение метеоров-болидов).

Уравнение КдФ, после того как стали разрабатывать методы его решения на ЭВМ, используется для описания ионно-звуковых волн в плазме, волн возбуждения в живой материи, дислокаций в кристалле, распространения сверхкоротких световых импульсов в оптических средах и др. На его основе разработаны методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (так называемый метод обратной задачи рассеяния).

При исследовании сложения двух уединенных волн оказалось, что высокие уединенные волны движутся скорее, так как после взаимодействия волн сохраняются их форма и скорость, процесс похож на упругое столкновение двух частиц. Такую волну называли **солитон** (от англ. *solitary* — уединенный). И солитоны в самом деле ведут себя как частицы. При соприкосновении таких волн большая замедляется и уменьшается, а малая ускоряется и увеличивается. И далее — по циклу, подобно упругим мячам. Результатом взаимодействия солитонов может быть лишь сдвиг фаз. Океанические солитоны (цунами, «девятый вал») могут возникать не только на поверхности, но и в глубинах, тогда из-за неоднородностей среды они образуют «групповые солитоны» (смерчи или торнадо). В нелинейной оптике наблюдается эффект самоиндуцированной прозрачности, эти солитоны естественно использовать для передачи информации

114

по оптическим волокнам. Механизм усиления солитонов похож на явление комбинационного рассеяния света.

Аналогичный механизм распространения имеет и «элементарная частица мысли» — нервный импульс. Было установлено, что по нерву распространяется не электрический ток, а некоторая электрохимическая реакция, порождающая бегущий импульс напряжения. При этом передний фронт импульса не расплывается, т. к. диффузия ионов через мембрану носит нелинейный характер — подавляет малые отклонения от нормального состояния и усиливает большие. Огромное количество вихрей — это тоже солитоноподобные образования.

3.7. Распространение звука в средах и реакция организма на звуковые волны

Звуковыми называют упругие волны, вызывающие у человека ощущение звука. Среди них различают: тоны или музыкальные звуки; шумы; звуковые удары. Гармонический процесс — это чистый или простой тон, а ангармонический — сложный тон. Сложный тон раскладывают на простые, при этом наименьшая частота — основной тон, а обертоны или гармоники имеют частоты, кратные основному. Набор частот с указанием интенсивностей компонент называют *акустическим спектром*. Шум — это звук со сложной неповторяющейся временной зависимостью: согласные звуки речи, скрип, шорох, вибрации машин. Звуковой удар — это кратковременное звуковое воздействие: взрыв, хлопок и др.

Колеблющаяся плоская пластинка возбуждает в среде бегущую волну с амплитудой x_0 и частотой $\omega/(2\pi)$, распространяющуюся от источника, и передает слою воздуха массой Δm некоторую энергию.

Максимальная кинетическая энергия этого слоя,

$$\frac{1}{2} \Delta m v_0^2 = \frac{1}{2} \Delta m \omega^2 x_0^2$$

$\Delta E = \frac{1}{2} (\rho A \Delta x) \omega^2 x_0^2$, где ρ — плотность слоя воздуха. Но при простом гармоническом движении средняя потенциальная энергия равна средней кинетической, и это выражение описывает запас энергии в слое площадью A и толщиной Δx . Пусть колебания начинаются при $t = 0$ и распространяются в воздухе со скоростью $u = Ax/\Delta t$, где Ax — расстояние, на которое распространится возмущение за время Δt . Разделив выражение

для энергии на Δt , получим: $\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} \omega^2 x_0^2$, $P = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 x_0^2 u$, где P —

мощность, излучаемая колеблющейся пластинкой в направлении x . Зная мощность, приходящуюся на единицу площади, вычисляют интенсивность любой бегущей волны, т.е. и звука. Выражение для интенсивности звука

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 x_0^2 u.$$

Итак, интенсивность звуковой волны пропорциональна квадрату амплитуды и определяется как скорость потока энергии че-

115

рез единичное поперечное сечение. Наименьшая интенсивность звука, которую слышит человеческое ухо, порядка $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², ее называют *порогом слышимости*.

Реактивный самолет, набирающий высоту недалеко от человека, создает интенсивность звука в 10^{15} раз, а поезд метро — в 10^{10} раз большую. Болевой порог интенсивности — $10^{12} I_0$, это значение может достигаться на концертах рок-музыки. Приведенные показатели степени, умноженные на 10, определяют децибельную шкалу интенсивности звука, названную в честь Генриха Белла. Интенсивность звука в децибелах $\beta = 10 \lg(I/I_0)$ и обозначается дБ. Тогда порог слышимости составляет 0 дБ, а концерт рок-музыки — 120 дБ. Санитарная норма соответствует 30 — 40 дБ.

Шумовая болезнь проявляется в повышенном артериальном давлении, быстрой утомляемости, плохом сне и ослаблении слуха. Тембр звука при одинаковых громкости и высоте тона определяется спектральным составом звука, испускаемого разными источниками. Звуковые волны распространяются в воздухе со скоростью 330 м/с при нормальных условиях, причем их скорость не зависит от частоты.

Человеческое ухо способно воспринимать только часть звуковых колебаний, которые, попадая на барабанную перепонку, возбуждают нервную реакцию. Для оценки интенсивности звука удобнее использовать звуковое давление, возникающее в среде при прохождении звука.

Интенсивность звука I связана с давлением p , плотностью среды ρ и скоростью звука c соотношением: $I = p^2/(2\rho c)$. Высота звука определяется частотой колебаний: она тем выше, чем больше частота. Интервалу волн длиной от 20 м до 1,6 см, воспринимаемых ухом, соответствует диапазон частот между 16 и 20 000 Гц соответственно. Диапазон звуковых частот и соответствующих им длин волн Гц/м приведен ниже:

Нижний предел слышимых звуков..... 16/21,5

Самая низкая нота рояля.....27,5/12,4

Фон сети переменного тока.....60/5,7

Нижний предел для радиоприемников.. 100/3,4

Среднее «фа» для настройки оркестра.....440/78 · 10⁻²

Верхнее «си»....1048/33 · 10⁻²

Самая высокая нота рояля.....4186/8,2 · 10⁻²

Указанные пределы слышимости относятся к молодым людям. С возрастом диапазон сокращается, мужчины начинают утрачивать чувствительность к высоким нотам раньше, чем женщины. В среднем возрасте они уже не воспринимают звуки выше 12 000 Гц, а после 50 лет верхняя часть спектра звуков оказывается недоступна. Интересно, что воспринимаемый нами диапазон звуков шире того, который используется для речи или пения (100—1000 Гц). Но когда высокие звуки урезаны (как правило, в недорогих акустических системах), то теряются яркость и красота звучания. Если урезаны низкие частоты, звук кажется монотонным, хотя высота тона воспринимается верно.

116

Уже у античных авторов можно найти указания на то, что звук обусловлен колебательным движением (Птолемей, Евклид). Аристотель отметил, что скорость звука имеет конечную величину, причем не одинаковую для низких и высоких тонов. Он представлял этот процесс так: «Звук происходит оттого, что звучащее тело определенным образом приводит воздух в движение, который при этом сжимается и растягивается и ударами звучащего тела проталкивается все дальше и дальше, отчего звук и распространяется во все стороны».

С XVII в. начались попытки определения *скорости* звука. Скорость распространения упругих продольных

волн совпадает со скоростью распространения импульса, сообщенного одному концу упругого стержня. Продольные волны в стальной проволоке плотностью 8 г/см^3 и с модулем упругости $2,06 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ должны иметь скорость распространения $5 \cdot 100 \text{ м/с}$. При этом она не зависит ни от амплитуды, ни от частоты колебаний, пока упругие деформации подчиняются закону Гука.

Громким пением какой-либо ноты над открытым музыкальным инструментом можно возбудить стоячую волну основной моды в струне, частота которой соответствует взятой высоте тона, и затем услышать, как струна звучанием отзывается на голос, пока в ней не затухла стоячая волна.

Замечательную связь между числами и законами музыкальной гармонии открыл еще Пифагор. Он использовал монохорд — струну, закрепленную на одном конце и перекинутую через острие ножа, так что к ней можно было подвешивать гири, создавая различные натяжения. Тогда было известно и об ощущениях, вызываемых разными комбинациями тонов: одни были приятными, другие — диссонирующими. Пифагор доказал, что приятные сочетания создают струны с одинаковым натяжением, длины которых находятся в отношении 2:1, два таких тона отличаются на интервал в одну октаву. Интервал 3 : 2 получил название квинты. Он отметил, что приятные сочетания связаны с простыми числами, характеризующими отношение длин.

Таким образом, высота тона закрепленной струны связана с ее длиной. Для одной и той же струны, колеблющейся с одной, двумя, тремя и более пучностями, частоты колебаний находятся в пропорции 1: 2 : 3 и т. д. Уменьшение длины струны в 2 раза приводит к повышению тона рождаемого ею звука на октаву. На основании подобных закономерностей Пифагор разработал теорию музыкальной гаммы и гармонии. Пифагор и его последователи — пифагорейцы — верили, что в основе природы лежат математические закономерности. По законам гармонии строилась и их космологическая система.

Идею о выделении в любом сложном колебании основного тона и гармоник выдвинул Г.Гельмгольц (1862). Звучание любого инструмента определяется пропорциями гармоник. Из-за гармоник звук флейты от-

личен от звука скрипки, хотя колебания воздуха в трубе, флейте или органе одни и те же. Правда, колокольчики не образуют простой ряд целых чисел, поэтому их звучание не столь мелодично. Еще из опытов с маятниками поняли, что сущность музыкального звука в его периодичности. Галилей заметил, что груз резонирует на действие периодической силы, когда ее частота совпадает с собственной частотой маятника, определяемой его длиной. Он соорудил простую систему — погрузил бокал почти по самый край в сосуд с водой и, слегка ударя по краю, извлекал из бокала звуки различной тональности. Вокруг бокала появлялась радиальная рябь. Галилей отметил, что при изменении высоты тона на октаву рябь усиливается. Чтобы сделать количественную оценку, он сопоставил массу единицы длины и подсчитал, что частота тона зависит от корня квадратного из «размера» струны. Впоследствии Галилей дал правило для определения частот колебаний струн, сделанных из разных материалов.

3.8. Волновое описание процессов. Типы и свойства волн. Спектр и его анализ

Волны могут *отражаться* (звук от стены, свет от зеркала, водяные волны от преграды) и *преломляться* (когда ход луча изгибается из-за попадания в среду с другой скоростью распространения). Для понимания волновых свойств необходимо перейти к волнам — плоским и трехмерным, встречаемым в природе. Звук в воздухе распространяется во все стороны от сферического источника. При опускании в воду плоской доски, когда один ее конец погружен и приводится в движение в вертикальном направлении, получают бегущие по поверхности двумерные плоские волны. Электромагнитные волны, сохраняющие движение электрической и магнитной компонент в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны, тоже являются плоскими.

Дисперсией называется зависимость показателя преломления n света от частоты колебаний ν (или длины волны λ). Ньютон отметил, что разложение белого света в спектр — проявление дисперсии. Направив разложенный на составляющие свет на вторую призму, он получил вновь белый свет, значит, белый свет есть набор цветов с разным показателем преломления n , который связан со скоростью v распространения света в этой среде: $n = c/v$.

Сравним их для фиолетового и красного цветов: $n_{\text{ф}} = c/v_{\text{ф}}$.

Поскольку частоты $\nu_{\text{ф}} < \nu_{\text{к}}$, $n_{\text{ф}} > n_{\text{к}}$ для той же среды, то и скорости $v_{\text{ф}} > v_{\text{к}}$. Таким образом, в одном и том же веществе скорости света для разных частот различны, различны и показатели преломления n , причем и зависит от ν .

Явление *дифракции* (от лат. *diffRACTUS* — разломанный) возникает, если плоская волна длиной λ попадает на преграду с щелью шириной s . Оно было впервые описано как новый тип отклонения

света за отверстием в посмертной публикации Ф. Гримальди в 1665 г. Результаты своих опытов он объяснял по аналогии с волнами вокруг брошенного в воду камня.

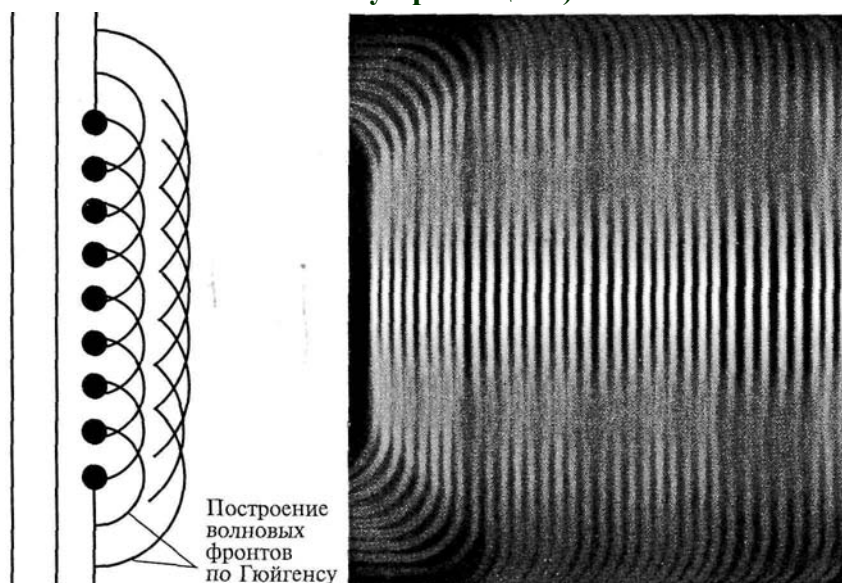
Явление *интерференции* (или сложение когерентных волн) происходит, если щелей на пути волны несколько или волна распространяется от нескольких источников. Рассмотрим два источника. При размере

щели $s > \lambda$ никаких искажений практически не наблюдается. Если $s < \lambda$, наблюдается картина, существенно зависящая от того, в какой фазе каждая из волн подошла к щели. Явление интерференции наблюдается и для поперечных, и для продольных волн.

Принцип Гюйгенса, объясняющий явление отражения, преломления и двойного лучепреломления света с позиций волновой теории, сформулирован в «Трактате о свете» (Х.Гюйгенс, 1678). Суть принципа в следующем (рис. 3.5): когда волновой фронт проходит через отверстия, каждый элемент фронта ведет себя так, как если бы стал источником излучения.

Приняв существование эфира (для распространения звука нужна среда, для света — нет, значит, среда должна быть невесомой, разреженной, проникающей во все поры и в то же время жесткой и упругой), Гюйгенс за механизм распространения выбрал аналогию с пламенем. Каждая точка пламени сообщает движение частицам окружающего эфира, т.е. создает

Рис. 3.5. Схема принципа Гюйгенса (если ширина щели велика по сравнению с длиной падающей волны, то она проходит через нее без искажений; влияние дифракции больше заметно у краев щели)



119

собственную волну, а каждая частичка эфира, которой достигла волна, становится, в свою очередь, центром новой волны. Так движение и распространяется от точки к точке через вторичные сферические волны, как и пожар. И каждая точка волнового фронта — источник новых волн, огибающая которых станет волновым фронтом в следующий момент, и так далее. Для наблюдения интерференционных эффектов не обязательно иметь отдельные источники света.

Как принцип Гюйгенса и принцип суперпозиции объясняют картину интерференции? Если две щели являются источниками волн, то какова картина интерференции в точке P , не погасят ли волны друг друга? Вторая волна должна пройти до этой точки большее расстояние, чем первая, и разность хода получится $(L_2 - L_1)$. Если в $(L_2 - L_1)$ точно укладывается целое число λ , то в точке P одновременно окажутся максимумы обеих волн (волны придут в фазе), и амплитуды возрастут. Это условие конструктивной интерференции запишется так: $(L_2 - L_1)/\lambda = N$, где $N = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. Если же разность хода составляет нецелое число полуволен, то максимумы одной волны окажутся в точке P смещенными на $(\lambda/2)$ относительно максимумов другой волны, т.е. окажутся в противофазе. Условием этого является равенство: $(L_2 - L_1)/\lambda = N + (1/2)$, где $N = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. В точках, где разность фаз волн находится между этими значениями, будет промежуточная картина.

Волновую природу света впервые показал экспериментально английский ученый, врач, человек с очень разносторонними интересами, известный как египтолог, расшифровавший древние иероглифы, первоклассный музыкант Томас Юнг. Ему же принадлежит и термин *физическая оптика*.

Т. Юнг стал заниматься волновыми движениями в связи с изучением человеческого голоса (периодических изменений усиления и ослабления звука, воспринимаемого ухом). В 1801—1803 гг. ученый представил материалы своих исследований по свету и звуку Королевскому обществу. Они содержали его формулировку принципа интерференции: для получения интерференции нужно, чтобы обе волны из одного источника (с одинаковым периодом), прошли различный путь до исследуемой точки и, попав в эту точку, шли почти параллельно.

Юнг продемонстрировал эффект интерференции, проколов булавкой два отверстия в прозрачном экране и направив на него свет, проходящий через маленькое отверстие: темные полосы отмечали провалы волн, светлые — сложение их максимумов. Из картины проведенного опыта он первым (и с удивительной точностью) измерил длины волн, составляющие белый свет, и получил 1/36 000 дюйма (0,7 мк) для красного

цвета и $1/60\,000$ дюйма (0,42 мк) для фиолетового.

Интерференция волн с близкими частотами, распространяющимися с одной скоростью и в одном направлении, приводит к *биениям*. Получается синусоидальная волна с колеблющейся амплитудой (по гармоническому закону), а частота биений равна разности частот отдельных волн (см. рис. 3.3). Чтобы получить биения для звуковых волн, можно провести опыт с двумя аналогичными музыкальными инструментами. Возьмите две струны, звучащие на одной ноте, и, чуть-чуть изменив высоту тона

120

одной из них, вы услышите, как быстро возрастает и уменьшается интенсивность звучания, как бы пульсирует. Если пульсация происходит медленно, попробуйте подсчитать количество биений в секунду.

Дифракционная картина получается, если между щелями расстояния небольшие (порядка $300/1$ мм). Такая система щелей называется *дифракционной решеткой*. Пучок белого света при попадании на нее разбрасывается достаточно широко, и по обеим сторонам от узкой белой центральной полосы становятся видны широкие цветные полосы — спектры. Изучением и измерением спектров занимается специальная наука — спектроскопия. С ее помощью был определен состав и земной атмосферы, и небесных тел. Длины волн измеряются с погрешностью до 10^{-10} , а смещения — еще точнее. Исключительная узость спектральных линий, строгая закономерность распределения их по шкале частот и смещение спектральных линий в электрическом и магнитном полях дали много сведений о строении атомов и привели к разнообразным моделям строения атома.

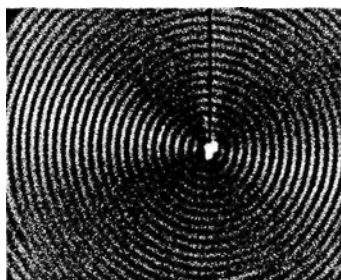
Явление *поляризации*, свойственное только поперечным волнам, состоит в следующем: луч света, пропускаемый через два кристалла исландского шпата, подвергался двойному лучепреломлению в зависимости от взаимной ориентации осей кристаллов.

В начале XIX в. французский физик Э.Малюс обнаружил, что поляризованным оказывается луч света, отраженный от поверхности воды под углом $52^\circ 45'$. Оказалось, что двойное лучепреломление всегда возникает при отражении луча от поверхности, а угол определяется коэффициентом преломления вещества. Он объяснил явление поляризацией световых корпускул, ориентирующихся в кристалле или при отражении (закон Малюса). Закономерности поляризации изучили до 1815 г., но их объяснил О.Френель только через семь лет, для чего пришлось признать свет поперечной волной. Продольные волны не поляризуются. Обычно направление поляризации связывают с направлением вектора *E*, плоскость поляризации — это плоскость, содержащая вектор *E* и направление распространения волны. Тогда вектор *H* будет перпендикулярным этой плоскости (см. рис. 2.6, *в*). Если направление *E* остается у волны неизменным, волна называется плоско- или линейно-поляризованной.

Большинство источников испускает некогерентный и неполяризованный свет, когда направление вектора *E* непрерывно меняется в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. Неполяризованный свет поляризуется при пропускании через поляризатор. Таковым может служить экран из ряда тонких параллельных проволок для микроволнового излучения или фильтр из кристаллической пластинки (турмалина, исландского шпата, кварца или пленки кристаллов герпатита, нанесенной на стекло). Неполяризованный солнечный свет приобретает поляризацию при отражении от поверхностей воды, песка, дороги и т.д.

121

Рис. 3.6. Схема, поясняющая эффект Доплера



При этом, если ось поляроида перпендикулярна плоскости поляризации отраженного света, отражение гаснет. Поляризованный свет применяется для гашения зеркальных бликов при фотографировании, предупреждения ослепления водителя встречным транспортом, регулирования освещенности и др.

Излучаемый каждым атомом свет строго поляризован. Но направления векторов поляризации от всех атомов определяются чисто случайными причинами и не имеют определенной ориентации в пространстве. И световой луч можно уподобить нити, состоящей из множества свитых волнистых волокон. Для поляризации луча надо привести этот хаос в порядок, что и делают те или иные поляризационные фильтры.

3.9. Эффект Доплера, его исследование и значение для науки

Зависимость частоты волнового импульса от скорости при движении источника волн относительно наблюдателя называют *эффектом Доплера*. Эффект Доплера имеет место для всех типов волн — звуковых в

атмосфере, упругих в твердом теле, волн на воде, световых волн.

Австрийский физик и астроном К. Доплер обнаружил эту зависимость в 1842 г. Многие слышали, как меняется звук свистка проносящегося мимо платформы поезда. Первое подтверждение эффекта было получено для акустических волн в опытах голландского физика с группой музыкантов на железной дороге (1845). Часть группы разместились на платформе, двигавшейся с известной скоростью вдоль перрона, где находились остальные, воспринимая их музыку. Затем музыканты поменялись ролями. Данные, полученные от непосредственных впечатлений участников опыта, хорошо укладывались в формулу Доплера.

Но эффект Доплера можно не только «слышать», но и «видеть», хотя бы в ванне или пруду (рис. 3.6). Периодически погружая палец в воду,

чтобы на поверхности образовались волны, равномерно перемещайте его в одном направлении. Следуя друг за другом, гребни волн в направлении движения пальца будут сгущаться, т. е. длина волны станет меньше обычной, в направлении назад — больше.

Период волны, излучаемой неподвижным источником, равен $\tau_0 = \lambda_0/v$, где λ_0 — длина волны, излучаемой покоящимся источником, v — скорость волны в среде. Пусть источник движется со скоростью u в сторону

122

наблюдателя. Тогда длина волны, воспринимаемая неподвижным наблюдателем, равна

$$\lambda = \lambda_0 \pm u\tau_0 = \lambda_0 \pm u \frac{\lambda_0}{v} = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{u}{v}\right).$$

Поскольку системы отсчета, связанные с источником и наблюдателем, инерциальны, $v\lambda = v_0\lambda_0 = v$, где v — частота волны в системе отсчета наблюдателя, v_0 — частота волны в системе отсчета источника. Отсюда

$$v = \frac{v_0\lambda_0}{\lambda} = \frac{v_0\lambda_0}{\lambda_0 \left(1 \pm \frac{u}{v}\right)} = \frac{v_0}{1 \pm \frac{u}{v}}.$$

Здесь знак «-» соответствует движению источника от наблюдателя, а знак «+» — движению источника к наблюдателю.

Таким образом, частота волны, регистрируемая наблюдателем, отличается от частоты волны, излучаемой источником, на величину, равную доплеровскому сдвигу частоты:

$$v_D = v - v_0 = \pm v_0 \frac{u}{v}.$$

Пусть теперь источник движется со скоростью w . Тогда относительная длина волны, воспринимаемая наблюдателем, равна

$$\lambda = \lambda_0 \pm (u - w)\tau_0,$$

где $u - w$ — относительная скорость движения источника и наблюдателя. Отсюда частота волны, воспринимаемая наблюдателем, равна

$$v = v_0 \left(1 \mp \frac{u - w}{v}\right).$$

Для доплеровского сдвига частоты получаем

$$v_D = v - v_0 = \mp v_0 \frac{u - w}{v}.$$

Следовательно, доплеровский сдвиг частоты равен частоте волны в системе отсчета источника, умноженной на коэффициент, равный относительной скорости источника и наблюдателя, деленной на скорость распространения волны в среде.

Измерение доплеровского смещения в спектрах позволяет с большой точностью и, не возмущая измерением движение и систему, определить скорости движущихся объектов. Французский физик А. Физо предложил (1848) использовать эффект Доплера для измерения радиальной составляющей скорости звезд по сме-

123

щению спектральных линий (эффект Доплера — Физо). Он заметил, что в линейчатых спектрах можно измерять смещение. В 1867 г. английский астроном У. Хеггинс измерил доплеровское смещение водородной линии в спектре Сириуса и сравнил его с той же линией в спектре, полученном в лаборатории. Он заключил, что скорость звезды относительно Земли равна 66,6 км/с, а относительно Солнца — 47,3 км/с. Но для доказательства применимости эффекта Доплера к свету нужно было найти объект, скорость которого можно было бы измерить и другим способом. В 1871 г. немецкий астроном Г. Фогель измерил доплеровские смещения для двух точек солнечного экватора, находящихся на краях диска, и определил их линейную скорость — 2 км/с, что совпадало с результатом, полученным по движению пятен. Затем определили скорости вращения планет, колец Сатурна, звезд вокруг своей оси, ядер и хвостов комет.

Академик А.А.Белопольский считал, что нужно провести проверку в земных условиях, поскольку неизвестны условия излучения в Космосе. С этой целью в 1894 г. он разработал установку, состоявшую из двух колес, к каждому из них в виде лопастей прикреплялись 8 плоских зеркал. Зеркала обоих колес были строго параллельны и вращались с постоянной скоростью. Съемки проводились при неподвижных зеркалах и при вращающихся с частотой 32 — 44 об/с (это соответствовало перемещению изображения со скоростью 240

— 330 м/с). Обработка результатов дала хорошее совпадение по числу оборотов колес и доплеровскому смещению. Вращение производилось в обе стороны поочередно. Опыт длился всего 1 ч, но он был наиболее убедительным в применении эффекта Доплера к свету.

Эффект Доплера как основной в оптике движущихся сред сыграл решающую роль в обосновании СТО. Физо поставил (1851) классический эксперимент по определению увлечения эфира движущейся Землей. Он заставил интерферировать два луча света проходящих столб воды: один в направлении течения, а другой — против него. Если эфир увлекается, то полосы должны смещаться по отношению к положению, соответствующему неподвижной воде. К тому же результату пришли Э. Кеттлер (1871) и Майкельсон и Морли (1886) — эфир движется вместе с Землей. Ранее Майкельсон пытался обнаружить «эфирный ветер» при движении Земли в эфире, посылая световые лучи по взаимно перпендикулярным путям и заставляя их интерферировать. Хотя линейная скорость Земли (29,7 км/с) много меньше скорости света и установка позволяла засечь и в 100 раз меньший эффект, опыт дал отрицательный результат. Опыты, показывавшие увлечение эфира, противоречили объяснению явления *абберации* (от лат. *aberratio* — отклонение), требовавшей неподвижности эфира. Это противоречие было разрешено отказом от эфира и созданием СТО.

124

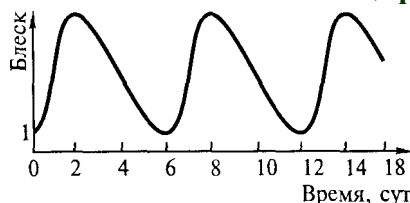
Когда картина мира стала меняться на квантовую, возникла необходимость в ином объяснении эффекта Доплера. Как отмечал известный немецкий физик А. Зоммерфельд, казалось почти невозможным трактовать эффект Доплера как обусловленный взаимным сближением или удалением волновых поверхностей. В 1922 г. один из создателей квантовой механики австрийский физик-теоретик Э. Шредингер дал обобщение формулы Доплера для частоты на случай больших скоростей, но пока эти малые изменения частоты при переходе атома с одной боровской орбиты на другую на опыте не обнаружили.

Метод для измерений скоростей звезд и галактик, основанный на эффекте Доплера, получил в астрономии наиболее впечатляющее применение.

Спектры галактик слабы, измерения достаточно трудны. Американский астроном В. Слайфер с помощью мощного спектрографа, соединенного с телескопом, измерил доплеровский сдвиг в спектре туманности Андромеды (1912), затем — еще в тринадцати спиральных галактиках. Скорости большинства из них были направлены в противоположную сторону от Земли и составляли до 1800 км/с. К 1925 г. Слайфер измерил лучевые скорости еще 45 спиральных галактик, и все они, кроме нескольких ближайших, удалялись, а скорость удаления почему-то возрастала по мере уменьшения их яркости, будто они разбегались от Млечного Пути во всех направлениях с возрастающей скоростью. Чтобы согласовать это с однородным распределением галактик в пространстве, пришлось считать, что это — однородное расширение. Но тогда их лучевая скорость (проекция скорости на луч зрения) должна быть пропорциональна расстоянию до них. Так, если галактика выглядит в 100 раз слабее, значит, она в 10 раз дальше. Галактики из списка Слайфера имели лучевую скорость 1800 км/с, а расположенные в 10 раз дальше — 180 000 км/с (половина значения скорости света).

Для формулирования закона пришлось искать возможность определения расстояния до галактик независимым образом. Параллакс для ближних звезд можно измерить по методу, предложенному еще Фалесом, для далеких — искать некий индикатор расстояний. Американский астроном Г. Левитт обратила внимание на четкую зависимость периода цефеид от яркости (рис. 3.7). Цефеиды — наиболее яркие звезды в небольшой ближайшей к нам галактике — Малом Магеллановом Облаке. Название они получили от типичной цефеиды — дельта звезды созвездия Цефея. Датский астроном Э. Герцшпрунг сразу оценил идею Левитт и откалибровал выведенную ею зависимость период-яркость в период-светимость и определил

Рис. 3.7. Колебания блеска цефеид



125

расстояние до этой галактики в 200 тыс. св. лет. Хаббл с помощью 100-дюймового телескопа обнаружил цефеиды в нескольких галактиках и смог оценить расстояние до них. Так Хаббл в 1929 г. вывел прямую линию на графике зависимости скоростей далеких галактик от расстояния до них (рис. 3.8).

Итак, скорости удаления галактик возрастают пропорционально расстоянию до них.

Расширение Вселенной — самое грандиозное из известных в настоящее время явлений природы. Если допустить, что оно и раньше происходило теми же темпами, то можно оценить, когда же началось расширение. Этот промежуток времени составляет 13 — 20 млрд лет. Таким образом, смещение спектральных линий из-за эффекта Доплера привело к новой картине расширяющейся Вселенной.

Рис. 3.8. Красное смещение в спектрах далеких галактик (к пояснению закона Хаббла)



3.10. Явление резонанса. Резонансы в движении планет

Явление резонанса — это резкое возрастание амплитуд вынужденных колебаний, происходящее при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой системы или при приближении к ней. Явление имеет наиболее простой характер, если внешнее воздействие не меняет колебательных свойств системы и свойства системы, со своей стороны, не меняют внешнего воздействия. Если отношения частот колебаний кратны отношению целых чисел, говорят, что они находятся в резонансе. При этом если взаимодействие тел поддерживает кратность частот, то резонанс устойчив. Вообще свойства резонанса частот обеспечивают устойчивость вращений и обращений в Солнечной системе. Вращение Луны резонансно ее обращению.

В середине XVII в. немецкий математик Д.Тициус для ряда из расстояний планет до Солнца нашел правило: $S = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$, $n = 1, 2, 3, \dots$, где n — номера планет в Солнечной системе. Астроном И.Э.Боде дал разъяснения, и получилось правило расстояний Тициуса — Боде. Отличие от реальности было порядка 2,4 %. В 1956 г. астроном В.Чистяков нашел другую гармонию: натуральные логарифмы больших полуосей планет ложатся на прямую линию. Есть попытки выразить согласованность через «золотую пропорцию», через числа Фибоначчи. Поиски скрытого смысла

126

закономерностей строения Солнечной системы продолжаются, в этом отражается единство природы и единство науки.

Синхронизация вращающихся тел в технике заставляет вращаться с одинаковыми или кратными скоростями несколько роторов, связанных малыми силами. При этом между вращениями устанавливаются определенные фазовые соотношения. Подобное можно ожидать и в Солнечной системе, и в регуляризации излучения звезд. Многие миллионы лет эволюционировало газопылевое облако, вращаясь вокруг Солнца. Ритмы этих вращений сказывались в формировании комочков материи, вокруг которых группировались другие, давшие начало планетам.

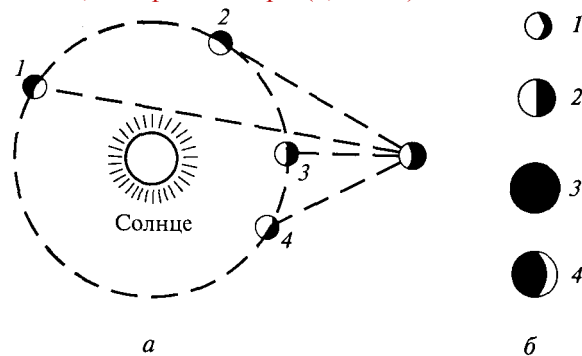
Вращаются все планеты и их спутники, и угловая скорость их вращения пропорциональна массе. Вероятно, это — следствие образования планет из одной туманности. Столкновения частиц сильнее происходили в центре масс системы, куда собирался почти весь газ первоначальной туманности — образовалось Солнце. Но почти весь момент импульса оказался сосредоточенным в планетах. Когда на Солнце начались термоядерные реакции, оно стало звездой, легкие газы под действием его излучения собрались на периферии вращающейся туманности. Так образовались большие планеты — газовые шары. Планеты же земной группы образованы из более твердого вещества. По закону сохранения момента импульса при сжатии вещества вращающейся туманности в плотные шары скорость вращения должна расти. Поэтому у планет-гигантов скорость вращения оказывается больше. И зависимость угловой скорости вращения от масс планет почти линейна. Отклонения связаны с замедлением, вызванным тормозящим действием спутников планет.

В системе Земля — Луна отношение масс составляет всего $m_1 m_3 \approx 1/81,3$, и они тормозили друг друга. Среднее расстояние до Луны $r_L \approx 60R_3$. У других планет спутники много легче (кроме Плутона и его спутника Харона). Хотя в Солнечной системе есть спутники и более близкие к своим планетам, но солнечные затмения на Земле особенные — угловые диаметры Солнца и Луны почти равны друг другу, и поэтому бывают полные солнечные затмения. Под действием притяжения Луны земная орбита испытывает колебания, амплитуда которых определяется $r_L(m_L/m_3) = 4700$ км. Поэтому орбита Земли несколько «волнообразна», и в каждое полнолуние (Солнце и Луна находятся по разные стороны от Земли) мы ближе к Солнцу на $1,5 R_3$, чем в предыдущее. Это колебание мало по сравнению с вытянутостью орбиты Земли, но меняет движение Луны — совокупность ее орбит за время прецессии Земли (с периодом 26 тыс. лет) представляет некий тор. Его воздействие на Землю равно усредненному за это время действию Луны. Сплюснутость Земли, составляющая всего $1/300$, достаточна для того, чтобы притяжение этим «бубликом» экваториально-

127

Рис. 3.9. Схема, поясняющая образование для земного наблюдателя фаз Венеры, открытых М.В.Ломоносовым:

a — схема расположения небесных тел; *б* — фазы Венеры (1, 2, 3, 4)



го уширения фигуры Земли создало пару сил, стремящуюся развернуть Землю так, чтобы ее экватор совпал с плоскостью эклиптики. Если бы Луны не было, земная ось все равно испытывала бы прецессию под действием Солнца и планет, но ее период прецессии был бы около 100 тыс. лет, а Луна меняет его. Еще больше сказывается близость Луны в явлении приливов и отливов.

Приливы вызываются Солнцем и Луной не только в водной оболочке Земли. Под их влиянием даже твердая Земля несколько удлиняется — до 30 см. Земля тоже «вытягивает» Луну на 40 см. Взаимное расположение Солнца и Луны меняет величину приливов. Если их приливные действия складываются (во время полнолуния или новолуния), то приливы большие — *сизигийные* (от греч. *syzygia* — соединение, пара), если Луна находится в первой или третьей четверти, то приливы существенно меньше и называются *квадатурными*. Из-за приливных сил Луна обращена к Земле одной стороной, ее период вращения вокруг своей оси сравнялся с ее «годом».

Почти в той же ситуации находится Меркурий: его сутки равны 59 земным, и он успевает всего три раза обернуться вокруг своей оси за два оборота вокруг Солнца, т.е. за свои сутки проходит $2/3$ своего годового пути. На Венере вращение происходит тоже медленно. Существует гипотеза, что Меркурий и Венера раньше вращались по одной орбите. У Меркурия наибольшая вытянутость орбиты, и Солнце, расположенное в фокусе эллипса, значительно смещено от центра, поэтому скорость у Меркурия в перигелии в 1,52 раза выше, чем в афелии. Оценим период между двумя восходами Солнца на Меркурии P : $1/P_0 = 1/P - 1/T = (1/2) T$; $P_0 = 2T = 176$ сут. Получается, что солнечные сутки на Меркурии втрое больше звездных и вдвое больше периода обращения. Если нарисовать «годовой путь» Меркурия, то видно, что в перигелии Меркурий обра-

128

щен к Солнцу то одним боком, то другим, а в афелии прогреваются его полюсы.

У Венеры ось вращения почти перпендикулярна плоскости ее орбиты, поэтому можно приписать знак минус ее периоду вращения: $P = -243,16$ сут. Она вращается медленнее и в противоположную сторону, в отличие от других планет, кроме Урана. Для них момент орбитального импульса близок к моменту импульса собственного вращения. Периоды вращения P и обращения Γ Венеры связаны с периодом обращения Земли T_3 следующим равенством: $1/P = -4(1/T) + 5(1/T_3)$. Вычислим период T_C сближения на минимальное расстояние Венеры с Землей (соединений планет): $1/T_C = \sqrt{T} - 1/T_3$; $T_C = TT_3/(T_3 - T) = 583,92$ сут. Перейдем в систему отсчета неподвижной Земли, и теперь период сближения T_C окажется временем возвращения Венеры к Земле после оборота ее вокруг Солнца. Полученное число 583,92 земных суток соответствует пяти суткам на Венере, т.е. за время между сближениями Венеры с Землей над горизонтом Венеры Солнце взойдет всего пять раз. И $T_C/5 = 116,8$ — это солнечные сутки Венеры.

Поскольку $T_C/4 = 146,0$, то наблюдатель на Венере увидел бы за это время восход Земли ровно 4 раза. Значит, в моменты соединений Венера повернута к Земле всегда одной стороной (в центре этой «нашей» стороны находится высокая гора — вулкан Максвелл). Кроме того, периоды обращения Венеры и Земли соотносятся как 8 : 13, т.е. за 8 лет происходит 13 оборотов Венеры вокруг Солнца и 5 соединений с Землей. Не только Венера, а вся система Солнце — Венера — Земля ориентируется по отношению к звездам одним из пяти способов, а не произвольно. И эта упорядоченная ситуация повторяется (рис. 3.9).

Большие планеты при вращении имеют свои особенности, показывающие, что они — газовые шары. Планеты земной группы вращаются как твердые тела, тогда как скорости вращений планет-гигантов зависят от широты и, видимо, от глубины. Все эти кинематические особенности планет сказываются на их внутренней динамике и связаны с эволюцией планеты.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Сформулируйте основные законы и понятия классической механики материальной точки. Как моделируется система, состоящая из двух и более материальных точек? Приведите примеры задач, в которых можно считать Землю материальной точкой, а в каких — нельзя.

2. Сформулируйте законы сохранения импульса и момента импульса в классической механике и свяжите их с законом динамики Ньютона. Приведите примеры использования этих законов. Как они связаны со свойствами симметрии пространства-времени и почему фундаментальны?

3. Дайте представление о модели гармонического осциллятора и использовании этой модели. Что такое «когерентность», «резонанс», «поляризация»? Объясните, почему Луна обращена к Земле одной стороной.

4. В чем суть законов Кеплера? Поясните их связь с законом всемирного тяготения. Насколько применима модель, принятая Ньютоном? И как она была уточнена?

5. Поясните понятия «энергия» и «сила», укажите на связь между ними. Какие виды энергии вы знаете? В каких системах энергия сохраняется, как закон сохранения энергии связан со свойствами симметрии пространства-времени?

6. Приведите доказательства справедливости и применимости закона всемирного тяготения на Земле, в Солнечной системе и за ее пределами. Какие явления, произошедшие в последние годы и подтверждающие этот закон, вы можете привести?

7. Поясните понятия «момент силы» и «момент импульса». Как изменяются кинетическая, полная и потенциальная энергии планеты при ее движении вокруг Солнца? В какое время линейная скорость движения Земли по орбите наибольшая и почему?

8. Опишите, как будет меняться вес тела при движении его от поверхности Земли к Луне. Объясните причины возникновения приливов на Земле и особенности наблюдения за затмениями Луны и Солнца.

9. В чем состоит эффект Доплера и какова его роль в исследовании звезд, Вселенной?

10. Как реализовались в построении науки о движении материи дедуктивный и индуктивный методы? Постройте логическую схему построения механики и смежных дисциплин. Оцените, к каким объектам и в какой степени могут быть применены модели, используемые в механике.

Глава 4. КОНЦЕПЦИИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Проблема соотношения динамического и статистического подходов в описании природы — одна из актуальных в философии современного естествознания. Отношение к ней изменялось в ходе развития науки. Сначала стремились обосновать молекулярно-кинетическую теорию строения вещества с позиций классической механики. Но после установления атомного строения и понимания большей глубины статистической трактовки основных законов проблема несколько утратила свою остроту. В неклассической трактовке она вновь стала актуальной в связи с необходимостью построения теории элементарных частиц, выходящей за рамки квантовой теории поля. В ней отражено взаимодействие необходимого и случайного, пронизывающего все явления природы. И любые законы, касающиеся сложных форм движения материи, связаны теснейшим образом с фундаментальными проблемами диалектики детерминизма и индетерминизма, случайного и необходимого, динамического и статистического, как и принципа причинности.

4.1. Теплота, температура и механический эквивалент теплоты

Температуру и количество теплоты как различные понятия первым определил Ламберт (1755). В том же году и М. В. Ломоносов указал, что температура тела — степень теплоты — определяется скоростью движения частиц, тогда как количество теплоты зависит от общего количества движения этих частиц, т.е. от их кинетической энергии.

Теплота считалась или веществом, или состоянием еще со времен античности. У философов ионийской школы огонь был четвертым элементом. Тепловые явления рассматривались в разделе «Огонь» и в «Курсе физики» Мушленбрука (1739). Бэкон и Кеплер считали, что теплота есть состояние движения внутренних частей тела. В XVII в. можно было услышать, что термометры измеряют «абсолютное» количество теплоты в теле. Классическая термодинамика родилась в борьбе с теорией теплорода, в которой теплота рассматривалась как неуничтожимая невесомая жидкость, способная перетекать от нагретых тел к более холодным. Но рядом с теорией теплорода возникла кинетическая теория теплоты, твор-

131

цами которой были Бэкон, Гук, Бойль, Ломоносов, Клаузиус. Термодинамика, возникшая сначала как инженерная дисциплина, имеет целью установление соотношений между параметрами макросистем, не опираясь ни на какие модели строения веществ. Молекулярная физика, наоборот, исследует тепловые явления с микроскопической точки зрения.

Измерение *температуры* ввели для характеристики степени нагретости тел, но требовались объективные критерии. Исследование тепловых явлений началось после изобретения **термометра**.

Галилей, Ньютон и другие конструировали *термоскопы*: тонкая стеклянная трубка, один конец которой заканчивался шариком, а другой, открытый, опускался в сосуд с водой, заполняющей часть трубки. Когда воздух в шарике нагревался (охлаждался), столбик воды в трубке опускался (поднимался). Затем трубки стали снабжать шкалой. Термометр с четкими показателями впервые сделал гданьский стеклодув Г.Д. Фаренгейт: 0°F — температура смеси воды, поваренной соли и льда, 212°F — кипения воды, 32°F — таяния льда, 96°F — человеческого тела. Эта шкала распространилась с 1714 г., и сейчас принята во многих странах, в том числе в США. Шведский астроном А. Цельсий предложил за 0° взять температуру кипения воды при нормальном давлении, а за 100° — температуру таяния льда (1742). Шведский ботаник К. Линней переставил на шкале Цельсия точки 0 и 100, и появился **бытовой термометр** с этой шкалой.

Помимо свойства расширения веществ при нагревании, лежащего в основе действия этих термометров, используют изменение электрических свойств с изменением температуры. Термопара состоит из двух проволок разных металлов (обычно меди и Константина, сплава меди с никелем), спаянных на одном конце, свободные концы присоединены к прибору, измеряющему напряжение. Прибор имеет интервал (от -269 до +2300) °С. Поскольку обычно сопротивление металлов растет при повышении температуры, а в некоторых полупроводниках — падает, то этот эффект тоже используют в очень точных термометрах.

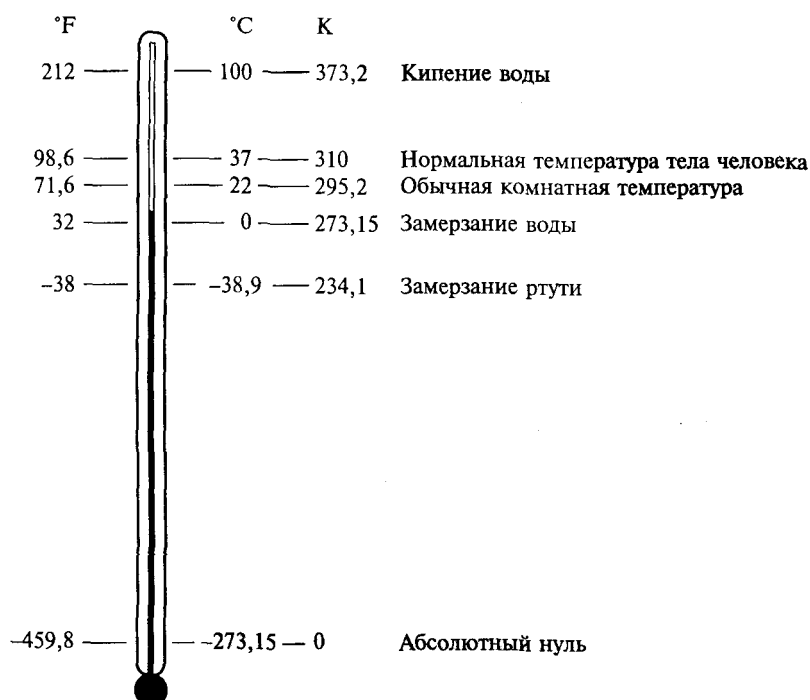
Определение температуры через операцию измерения называется операционным. Для количественного определения нужно найти величину, обладающую свойством температуры — быть одинаковой у всех тел, находящихся в тепловом равновесии. Австрийский физик Л. Больцман установил (1866), что этим свойством обладает средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул: $E_{к\text{ ср}} = (3/2)kT$, где постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Значит, температура — мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа.

Абсолютная шкала температур, введенная лордом Кельвиным, принята в науке, и потому единица температуры (градус) в этой шкале в системе СИ названа в честь автора и обозначена К. Соотношение

температурных шкал показано на рис. 4.1.

132

Рис. 4.1. Сравнение температурных шкал Фаренгейта, Цельсия и Кельвина



К уравнениям теплового баланса пришли петербургские академики Г. Крафт и Г. Рихман, выясняя вопрос о температуре смеси. Рихман открыл, что при смешивании равных количеств воды с разной температурой получается смесь температурой, равной среднему арифметическому начальных температур. Это уравнение вскоре стали называть «задачей Рихмана».

Понятия *скрытой теплоты таяния и испарения* сформировались на основе этого уравнения и теории теплорода, которую развивал известный французский революционер Ж. Марат. Считали, что теплород содержится в газе, как сок в апельсине, сожмешь апельсин — выдавишь сок, сожмешь газ — выделишь теплород, газ нагреется. Для количественных характеристик нужна единица измерения, ее ввел шведский академик И. К. Вильке (1772). *Калория* — количество теплоты, соответствующее изменению температуры 1 г воды на 1 °C. Когда Дж. Блэк открыл *постоянство точки плавления льда*, возникло понятие *скрытой теплоты*. Калориметр — классический прибор для измерения количества теплоты, используемый и сейчас, сконструировали в 80-е годы XVIII в. Лавуазье и Лаплас, нашедшие *удельные теплоемкости* многих твердых и жидких тел и их зависимости от температуры. Они отмечали, что «опыты

133

дают сведения только об отношении количеств теплоты», а не о полном количестве теплоты, и считали природу теплоты иной, не связанной с особым флюидом, теплородом. Они предчувствовали, что наука уйдет от наглядности модели теплорода, и их кинетические взгляды на природу теплоты окажутся более верными. Лавуазье и Лаплас, видимо, первыми поняли физическую сущность понятия теплоемкости.

Работы Л.Эйлера, Д.Бернулли и М.В.Ломоносова показывают, что с точки зрения «корпускулярной философии» можно объяснить различные физические и химические явления, в том числе и тепловые. В работе «Размышления о причине теплоты и стужи» (1745) М.В.Ломоносов исходил из того, что материей и движением определяются все явления природы, что «теплота состоит в некотором движении мельчайших частичек тела».

Понятие *теплоемкости* ввели для характеристики зависимости количества энергии Q , необходимого для изменения температуры T на 1°, от количества вещества, его вида и температуры: $c = dQ/dT$. Им стали пользоваться Вильке и Блэк к началу XIX в. Так как количество теплоты, необходимое для повышения температуры тела на ΔT , пропорционально массе тела m , то $\Delta Q = cm\Delta T$. Величина c — удельная теплоемкостью вещества. Для воды она максимальна и принята — 1 кал на 1 г на 1 °C.

Открытие Р. Майером эквивалентности теплоты и энергии позволило измерять количество теплоты энергетическими единицами (1842). В системе СИ единицей работы и теплоты является джоуль.

Механический эквивалент теплоты вывел Р.Майер из данных об удельной теплоемкости газов при постоянных давлении c_p и объеме c_v . Разность удельных теплоемкостей он приравнял работе, совершаемой при расширении газа, находящегося при постоянном давлении. И уравнение $c_p - c_v = R$ названо уравнением Майера [R — универсальная газовая постоянная, равная 2 кал.(моль· K)].

В работе Майера (1841) содержалась мысль о том, что «движение, теплота и, как мы намерены показать в

дальнейшем, электричество представляют собой явления, которые могут быть сведены к одной силе, которые измеряются друг другом и переходят в друг друга по определенным законам». В книге «Органическое движение в связи с обменом веществ» (1845) он последовательно и систематично изложил учение о сохранении и превращении энергии (по его терминологии, силы). Воспользовавшись данными по удельной теплоемкости, Майер получил значение механического эквивалента теплоты $I = 425 \text{ кГм/ккал}$.

Джоуль экспериментировал с проводниками электрического тока и измерял количество выделенной теплоты. Он открыл закон, по которому количество теплоты, выделенной током, пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению. Этот же закон, независимо от Джоуля, получил в 1844 г. петербургский академик Э.Х.Ленц, поэтому он известен как закон Джоуля—Ленца. Джоуль провел много экспериментальных ра-

134

бот по исследованию тепловых явлений в гальванических цепях и выделению теплоты в химических реакциях.

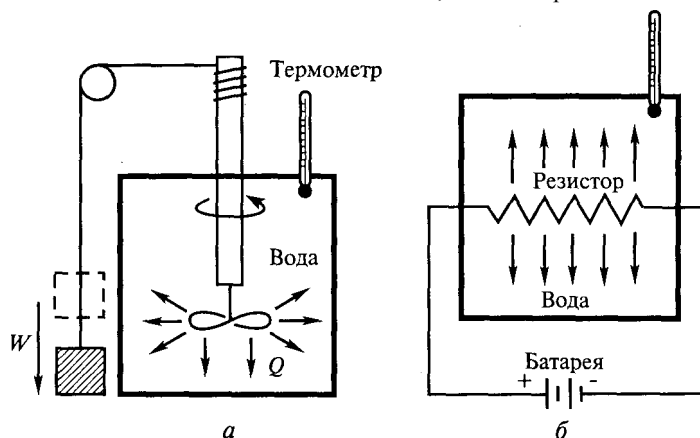
Для определения механического эквивалента теплоты Джоуль построил установку (рис. 4.2, а, б). Масса m спускается с высоты h , ее потенциальная энергия гравитации mgh теряется при опускании груза и превращается в кинетическую энергию вращающихся лопаток, которые отдают свою энергию воде, налитой в калориметр. При этом поглощенная водой энергия (в калориях) пропорциональна произведению массы воды $m_{\text{вод}}$ на наблюдаемое изменение ее температуры ΔT : $mgh = cm_{\text{вод}}\Delta T$. Если слева в формуле все величины выражены в системе СИ, то энергию получим в джоулях (Дж). Если массу воды взять в граммах, температуру в градусах Цельсия, то получим тепловую энергию в калориях, так как теплоемкость воды в этих единицах измерения $c = 1 \text{ кал/(г} \cdot ^\circ\text{C)}$. Так Джоуль пришел к соотношению, которое принято сейчас: $1 \text{ кал} = 4,185 \text{ Дж}$.

Как видно из работ Джоуля (1872), в середине 40-х годов он уже владел идеей сохранения и превращения энергии. Термин «энергия», впервые введенный в науку Юнгом, автором принципа интерференции световых волн, окончательно вошел в научный обиход в 1849 г. после работ Кельвина. Говоря о природе теплоты, Джоуль считал ее родом колебательных движений частичек тела (вслед за М. В. Ломоносовым). Независимо от Майера, он рассматривал животную силу как результат химических процессов.

Важность эквивалентности энергии (работы) и теплоты сумел оценить в 1847 г. Г. Гельмгольц.

Рис. 4.2. Схема опытов Джоуля:

а — по определению механического эквивалента теплоты; б — по определению теплового действия тока



135

4.2. Понятие «внутренняя энергия». Первое начало термодинамики

Закон сохранения и превращения энергии — один из основных законов, справедливых для неживой и живой природы. Важнейшее в нем — положение об эквивалентности теплоты и работы как разных форм энергии. Система *изолированная* не может обмениваться с окружающей средой ни веществом, ни энергией. Она большую часть времени находится в статическом состоянии, но эти условия почти не осуществимы. Если происходит обмен только энергией, систему называют *замкнутой*, а если энергией и веществом, — *открытой*. Существуют системы, помещенные в так называемую *адиабатическую оболочку* — это замкнутые системы, почти не обменивающиеся теплотой (например, закрытая крышкой кастрюля, термос). При равновесии ни одно из свойств системы не меняется со временем.

Функции состояния — величины, однозначно определяемые при равновесии. Нахождение этих функций и вычисление их изменений при переходе из одного состояния в другое входит в задачу термодинамики. Но абсолютные их значения не важны, и время как параметр в термодинамике не фигурирует. Фактически классическая равновесная термодинамика — это *термостатика*. Кроме того, в ней рассматриваются процессы, происходящие через последовательность равновесных состояний, т.е. обратимые. Да и равновесие в статическом состоянии соответствует смерти системы. Но она дает важные результаты, потому введем ее основные понятия и будем в дальнейшем путем формальных преобразований учитывать динамическую

природу объектов и систем.

Полная энергия тела складывается из кинетической энергии движения тела как целого, из потенциальной энергии его во внешнем поле сил и внутренней энергии.

Внутренняя энергия — это обычно кинетическая энергия хаотического (теплого) движения его частиц и их взаимная потенциальная энергия. В последнюю включают и энергию колебательного движения атомов в молекулах, и внутриаомную энергию. В идеальном газе внутренняя энергия — энергия хаотического движения молекул. Понятие внутренней энергии относится к равновесным состояниям систем. Так как начальные и конечные состояния равновесны, на процессы, происходящие между ними, такого ограничения можно не накладывать.

Внутренней энергией системы U называют такую функцию состояния, приращение которой во всяком процессе, совершаемом системой в адиабатической оболочке, равно работе внешних сил над системой при переходе из начального состояния в конечное.

136

Под адиабатической оболочкой состояния меняются только путем изменения внешних параметров. И работа над системой в такой оболочке зависит не от способов перехода в состояние, а только от начального и конечного состояний. Для такой системы, перешедшей из состояния 1 в состояние 2, можно записать: $U_2 - U_1 = A_{12}$, причем работа внешних сил не зависит от вида пути. Внутренняя энергия U может быть положительной и отрицательной, как и работа внешних сил, и записанные соотношения нужно понимать алгебраически. Для квазистатических процессов $A^{\text{ВНЕШ}} = -A$, т.е. можно записать $U_1 - U_2 = A$, работа системы при адиабатических процессах совершается за счет убыли внутренней энергии.

Итак, внутренняя энергия есть функция параметров, определяющих состояние, т.е. $U = U(V, T)$. Это уравнение называют *калорическим уравнением состояния* (в отличие от термического уравнения состояния типа $pV = RT$ для идеальных газов). Эти уравнения следуют из обобщения опыта.

Механическую теорию теплоты разрабатывал немецкий физик Р. Эмануэль, взявший себе имя Клаузиус (под которым и вошел в историю науки). Отметив, что между затраченной работой и полученной теплотой наблюдается постоянство соотношения только при процессах циклических (когда тело всегда возвращается в исходное состояние), Клаузиус ввел для уравнивания счета понятие внутренней энергии. И теплота, подводимая к воде, частично преобразуется во внутреннюю энергию расширения пара и воды, а частично — во внутреннюю энергию, которую пар возвращает при конденсации. Джоуль установил, что при рассеянии одинаковых количеств обеих энергий образуется одно и то же количество теплоты. Вслед за Джоулем, Томсоном и Гельмгольцем Клаузиус применил закон сохранения и превращения энергии к электрическим явлениям (1852): «Подобно тому как посредством теплоты может быть произведена механическая работа, так и электрический ток способен вызывать частично механическое действие, включая теплоту». У. Томсон применил этот закон к световым явлениям, химическим процессам и жизнедеятельности живых организмов, а затем — к электрическим и магнитным явлениям, установив выражение для энергии магнитного поля в виде интеграла, взятого по объему.

Молярная теплоемкость вещества определяется отношением количества теплоты, полученного одним молем вещества, к происходящему при этом увеличению температуры: $c = Q/\Delta T$. Эта теплота расходуется на увеличение внутренней энергии вещества и совершение работы: $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$. Полная внутренняя энергия определяется кинетической энергией поступательного движения частиц: $E_k = N(l/2)mv_{cp}^2 = N(3/2)kT = (3/2)RT$. Здесь $R = 8,31$ Дж/(моль · К), N — число молей.

Поэтому при изменении температуры меняется и внутренняя энергия.

137

Работа может быть совершена за счет расширения газа: $A = p \Delta V$. Если газ находится в постоянном объеме, $A = 0$ и молярная теплоемкость определяется только изменением внутренней энергии и обозначается c_v . Итак, $c_v = Q/\Delta T = (3/2)R = 12,6$ Дж/(моль · К).

Если при подводе теплоты газ имел возможность расширяться, можно вычислить работу при постоянном давлении. Из уравнения газового состояния $pV = nRT$ видно, что увеличение температуры при постоянном давлении ведет к увеличению объема, т.е. $p\Delta V = nR\Delta T$.

Совершаемая работа равна $p \Delta V$. Из первого начала термодинамики можно записать:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A = (3/2)nR\Delta T + nR\Delta T.$$

Для одного моля газа это означает, что $\Delta Q = (3/2)R\Delta T + R\Delta T$. Для молярной теплоемкости при постоянном давлении получаем значение:

$$c_p = (\Delta Q/\Delta T)_p = (3/2)R + R = (5/2)R = 5R = 21 \text{ Дж/(моль · К)}.$$

В рассматриваемой нами простой модели для газов все значения молярной теплоемкости должны быть равными, но теплоемкость при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме на 8,4 Дж/(моль · К). Сравните с уравнением Майера: $c_p - c_v = R$.

Если два атома как-то связаны, то они могут не только начать двигаться поступательно, но и вращаться вокруг общего центра масс. Поскольку каждый вид движения оттягивает на себя поступающую энергию, то изменение внутренней энергии за счет поступающей теплоты должно состоять из изменения энергии поступательного движения $\Delta(N(l/2)mv_{cp}^2)$, вращения $\Delta(N(1/2)I\omega_{cp}^2)$ и колебаний $\Delta(N(l/2)kx_{cp}^2)$. При

поступательном движении двухатомной молекулы как целого возможно движение по трем равноправным направлениям, поэтому естественно предположить, что энергия делится поровну между этими тремя направлениями. При вращении молекулы, имеющей форму гантели, два направления являются равноценными — это направления, перпендикулярные оси вытянутости молекулы, на каждое из которых должна приходиться одинаковая энергия. При колебаниях (атомы связаны между собой чем-то вроде пружины) меняются потенциальная и кинетическая энергии, и на каждый тип колебания тоже приходится одинаковая энергия.

Молярная теплоемкость металлов имеет одинаковое значение, равное 25,2 Дж/(моль · К) (закон Дюлонга и Пти). Это объясняется тремя степенями свободы колебаний каждого атома около своего положения равновесия в кристаллической решетке, причем на каждую приходится вдвое больше энергии, чем на поступательные (одна — на кинетическую энергию и одна — на потенци-

138

альную). Зависимость теплоемкости от температуры, несколько отличающуюся для разных металлов, не способна объяснить классическая теория. Кроме того, исходя из значения молярной теплоемкости, непонятно, почему электронный газ, переносящий энергию в металле, не получает тепловой энергии. Или он переносит энергию, обеспечивая теплопроводность и электропроводность, но сам энергии не поглощает?! Загадкой оказывается и огромная теплоемкость воды, в три раза большая теплоемкости металлов. Все эти нерешаемые в классической теории вопросы говорят о более сложной структуре веществ, чем эта примитивная модель.

Закон сохранения и превращения энергии в середине XIX в. приобрел права всеобщего закона природы, объединяющего живую и неживую природу. Его кратко формулируют так: «Энергия сохраняется», или: «Тепло, полученное системой, идет на приращение ее внутренней энергии и на производство внешней работы». Сохраняется именно энергия, а не теплота. Понятие энергии позволило рассматривать все явления природы и процессы с единой точки зрения, объединить все явления. Впервые в науке абстрактное понятие заняло центральное место, оно пришло вместо ньютоновой силы, соответствующей чему-то осязаемому, наглядному, конкретному, хотя и облаченному Ньютоном в математические одежды.

Понятие «энергия» прочно вошло в нашу жизнь. Под энергией чаще всего понимают способность тела совершать работу. Лорд Кельвин признал, что силы могут исчезать и возникать, а энергия не уничтожается. Это понятие соответствовало и его религиозным взглядам: он считал, что Творец в самый момент творения мира наделил его запасом энергии, и этот божественный дар будет существовать вечно, тогда как эфемерные силы подвержены многим превращениям, и с их помощью в мире ткется ткань явлений преходящих.

Первое начало термодинамики, связанное с законом сохранения и превращения энергии, акцентирует внимание на внутренней энергии: приращение внутренней энергии при переходе системы из одного состояния в другое складывается из суммы работы внешних сил над системой и количества теплоты, получаемого системой. Оно требует сохранения энергии изолированной системы, но не указывает направления, в котором процессы могут происходить в природе. Это направление указывается вторым началом. Кроме того, второе начало вводит температурную шкалу, не связанную с рабочим веществом термометра и его устройством. Два начала позволяют установить множество точных количественных соотношений между различными макроскопическими параметрами тел в состояниях термодинамического равновесия или около него.

139

4.3. Преобразование тепловой энергии в механическую работу

Исследовать работоспособность тепловых машин решил молодой французский инженер Н.С. Карно. Его работа «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824), в которой он сформулировал общий и абстрактный методы решения специальной задачи, вышла за пределы специального исследования, положив начало новой науке — **термодинамике**.

Анализируя механизм действия тепловых машин, Карно исходил из того, что для их работы нужно наличие разности температур ΔT и затем их выравнивание, так же, как для работы водяных машин необходима разность уровней воды. Поэтому «возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, а переходу его от горячего тела к холодному, т.е. восстановлению его равновесия». Но определяет ли ΔT производимую машиной работу? Ведь возможен процесс выравнивания температур без всякой работы, как при непосредственном тепловом контакте. Для того чтобы работа производилась, нужен посредник, рабочее вещество, которое было бы способно отобрать теплоту у нагревателя (более горячего тела) при более высокой температуре и отдать ее холодильнику (более холодному телу) — при более низкой.

Карно рассмотрел идеальную машину, которая имела бы большую эффективность, чем любая реальная машина. Идеальна она потому, что в ней отсутствует внутреннее трение, а процесс характеризуется только двумя температурами.

Теорема Карно, доказанная в этой работе: эффективность любой тепловой машины, работающей при температурах T_1 и T_2 , причем $T_2 < T_1$ меньше эффективности идеальной машины. Карно не вычислял коэффициент полезного действия (КПД), но указал, что он пропорционален разности падения температур

единицы теплорода: $(T_1 - T_2)/T_1$.

Идеи Карно в течение 10 лет не вызвали интереса, пока Клапейрон не выпустил свою книгу (1834), в которой он дал анализ работы Карно, перевел ее на математический язык и несколько улучшил сам цикл Карно — заменил его другим, теперь общеизвестным циклом из двух адиабат и двух изотерм, называемый *циклом Карно*. Клапейрон впервые употребил графическое изображение обратимых круговых процессов и вычислил работу как соответствующую площадь на графике.

Превращение теплоты в работу для практических целей важно, как и превращение одного вида энергии в другой. Обратимся к схеме работы тепловой машины. В цилиндре машины помещается при атмосферном давлении вещество (газ), называемое *рабочим телом*. Повысим его температуру, не меняя давление, и газ должен расшириться. Поршень пере-

140

местится на расстояние x , причем он будет двигаться против внешнего давления атмосферы. Если площадь поршня равна s , то совершается работа против силы, равной ps , так как p — сила, приходящаяся на единицу площади. Поршень переместился на расстояние x , и работа на этом пути $A = -psx$. Здесь поставлен знак минус, так как работа совершается газом, который отдает ее внешней среде, перемещаясь в направлении, противоположном приложенной силе. Поскольку произведение sx есть изменение объема газа $V_2 - V_1$, то $A = -p(V_2 - V_1)$ и равна теплоте, затраченной на нагревание газа.

Пусть газ под поршнем в цилиндре находится в равновесии с окружающей средой. Будем медленно выдвигать поршень из цилиндра, не нарушая равновесия в каждый данный момент и сохраняя постоянство температуры. Этот процесс соответствует эмпирическому закону Бойля—Мариотта: $pV = \text{const}$. Точка 1, представляющая состояние газа, перейдет на плоскости p, V — в точку 2. Если опять же медленно и при постоянной температуре сжимать газ, то точка 2 вернется в точку 1, потому что изотермический процесс обратим. Существует и другой обратимый процесс в идеально теплоизолированном сосуде — адиабатический. Этот процесс тоже очень медленный, так что температура во время сжатия или расширения выравнивается во всех точках, но меняется в зависимости от объема: $pV^\gamma = \text{const}$, $\gamma = c_p/c_v$.

Оба этих обратимых процесса, конечно, идеализированы, реальные процессы могут только приближаться к ним, поскольку всегда есть какие-то потери теплоты на теплоизоляцию, вязкость среды и т. п. Цикл Карно состоит из двух изотермических и двух адиабатических процессов, которые образуют на графике в координатах (p, V) криволинейный четырехугольник. Адиабаты идут круче изотерм, поэтому они образуют боковые линии, а изотермы — основания. Теплота подводится и отнимается при изотермическом процессе, поэтому верхняя изотерма отвечает расширению газа в тепловом контакте с нагревателем температуры T_1 , а нижняя — сжатию при контакте с холодильником при температуре T_2 . Пусть газ получает от нагревателя теплоту Q_1 , а холодильнику отдает теплоту Q_2 . Тогда за весь цикл он получит теплоту $Q = Q_1 - Q_2$, равную совершенной работе A . Отношение работы A к теплоте, полученной у нагревателя (с нагревателем связаны основные затраты, ведь это ему нужно топливо), называется коэффициентом полезного действия теплового двигателя: $\text{КПД} = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1$.

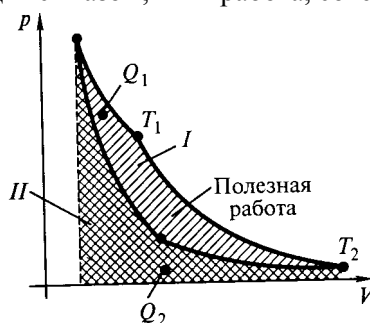
Коэффициент полезного действия двигателя, таким образом, определяется разностью температур нагревателя и холодильника, деленной на температуру нагревателя: $(T_1 - T_2)/T_1$.

На рис. 4.3 графически представлена совершенная работа при $Q = A + Q_1$. Возможность построения машины без холодильника, т.е. с $\text{КПД} = 1$, которая могла бы превращать в работу всю теплоту, заимствованную у теплового резервуара, не противоречит закону сохранения энергии. По своему практическому значению она

141

Рис. 4.3. Схема работы тепловой машины:

I — работа, совершаемая расширяющимся газом; II — работа, совершаемая над газом



не уступала бы перпетуум-мобиле, так как могла бы производить работу за счет почти неисчерпаемых запасов внутренней энергии, содержащихся в воде морей и океанов, в атмосфере и недрах Земли. Такую машину У.Оствальд назвал перпетуум-мобиле второго рода (в отличие от перпетуум-мобиле первого рода — вечного двигателя, производящего работу из ничего). Карно исходил из идеи невозможности вечного двигателя, опираясь на факты многочисленных опытов, которая была возведена в постулат, названный вторым

началом термодинамики.

На основе термодинамики У. Томсон (впоследствии лорд Кельвин) предложил абсолютную шкалу температур (см. рис. 4.1). Он исходил из того, что КПД всех обратимых двигателей определяется только абсолютными температурами холодильника и нагревателя. Машина Карно может использоваться для градуировки шкалы, если закрепить точку таяния льда. Проведя цикл Карно между данным телом и тающим льдом и измерив соответствующие количества теплоты, можно из прямой пропорциональности количества теплоты и температур найти абсолютную температуру (в К). С 1954 г., по определению X Генеральной конференции по мерам и весам, температура тройной точки воды (точка равновесного сосуществования льда, воды и пара) считается равной 0,01 °C (273,16 К) при давлении 6,09 гПа.

Можно ли повысить КПД за счет уменьшения температуры холодильника? Казалось бы $\text{КПД} = 1$ при $T_2 = 0$, но все газы гораздо раньше начинают сжижаться, т. е. перестают быть газами, следовательно, абсолютный нуль температур недостижим. Это и составляет содержание *третьего начала термодинамики*, утверждающего, что нельзя охладить вещества до температуры абсолютного нуля посредством конечного числа шагов. Понимание этого начала требует представлений об атомном строении вещества, тогда как другие начала есть обобщение непосредственного опыта и не зависят ни от каких предположений. Но: можно ли повысить КПД за счет увеличения температуры нагревателя? По этому пути развивается вся теплотехника (плазменные двигатели, например, имеют температуру горячего вещества до 3000 °C), но этим путем повышение КПД происходит медленней, чем понижением T_2 . А когда хотят понизить температуру холодильника, обычно забывают, что на это надо затратить работу хотя бы с помощью жид-

142

кого воздуха. В холодильных установках теплота отбирается от холодного тела и отдается горячему, но только за счет работы извне. Смысл второго начала термодинамики в том и состоит, что нельзя непрерывно получать работу, не имея резервуара энергии. Для Земли таким источником энергии является Солнце. На солнечной энергии работают и гидростанции, и солнечные батареи, и ветряные двигатели. Их работа не противоречит второму началу термодинамики. В 1851 г. Кельвин сформулировал второе начало иначе: «Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара». Близкую формулировку дал Макс Планк: «Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счет охлаждения теплового резервуара». Поэтому иногда говорят: «Процесс Томсона — Планка невозможен». Клаузиус выдвинул второй постулат в таком виде: «Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к телу более нагретому». Можно показать, что все эти варианты второго начала эквивалентны и вытекают один из другого.

4.4. Понятие «энтропия». Суть спора о «тепловой смерти Вселенной»

Феноменологическая термодинамика свела всю совокупность тепловых явлений в три начала без всякой модели вещества, т. е. они просто описывают все явления (отсюда и термин — феноменологическая). Клаузиус не только уточнил идеи Карно, но отказался от теплорода, объясняя природу теплоты в соответствии с концепцией атомизма. Важную роль в этом сыграла и новая абстрактная величина — *энтропия* (от греч. *entropia* — поворот, превращение), введенная им в 1865 г. Клаузиус определил понятие энтропии и показал, что в термически изолированных системах энтропия при обратимых процессах не изменяется, а при реальных и необратимых — растет всегда. Поэтому она является как бы мерой отклонения реальных процессов от идеальных.

Энтропия, как характеристика состояния системы сыграла в развитии науки фундаментальную роль. Как каждому уровню высоты над поверхностью Земли отвечает своя потенциальная энергия, так и каждому состоянию — своя энтропия. Как работа в поле тяжести не зависит от вида пути, а определяется только изменением потенциальной энергии, так и энтропия не зависит от вида процесса, определяясь только состоянием. Понятие энтропии как функции состояния было введено из рассмотрения квазистатистических циклов.

Обратимся к бесконечно малому циклу Карно. Если обозначить через S сумму величин (Q/T) , то для любого обратимого процесса $S = \sum_i (Q_i/T_i) =$

143

$= S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = 0$, тогда как сумма количеств теплоты Q не равна нулю. В результате завершения квазистатистического цикла в источниках работы и теплоты происходят изменения. Между ними должны быть общие связи, выражением которых служат, с одной стороны, принцип эквивалентности теплоты и работы, с другой — теорема о сумме приведенных теплот.

Согласно второму началу термодинамики, из всех тепловых двигателей, работающих при данных температурах нагревателя и холодильника, обратимый двигатель имеет наибольший КПД, т. е. КПД необратимого двигателя меньше, чем КПД обратимого. Как меняется энтропия в необратимых процессах? Нагреватель отдает и получает теплоту Q_1 при одной и той же температуре, т. е. его энтропия не меняется: $S_1 - S_1' = Q_1/T_1 - Q_1'/T_1 = 0$. В то же время энтропия холодильника или окружающей среды растет: $-S_2 + S_2' = -Q_2/T_2 + Q_2'/T_2 = (-Q_2 + Q_2')/T_2 > 0$. При спаренной работе холодильник получает теплоту Q_1' от необратимого двигателя и отдает теплоту Q_2 обратимому. Температура окружающей среды из-за ее очень большого объема практически не меняется от передачи теплоты Q_2' , но это

изотермический процесс, а он обратим, т.е. для окружающей среды: $S_1 - S_2 = \Delta S > 0$. Таким образом, получилась замкнутая система — источник внешней работы, нагреватель, холодильник и спаренные двигатели. В ней есть только одно необратимое звено, и оказалось, что энтропия системы выросла.

Можно считать, что рост энтропии в изолированной системе есть мера необратимости какого-то процесса в ней. Всякий необратимый процесс в замкнутой системе ведет к росту энтропии. Рассуждая в обратную сторону, приходим к формулировке невозможности построить вечный двигатель второго рода. Существование энтропии доказано для обратимых процессов и выражает второе начало термодинамики в наиболее общей форме. С этим законом известный физик и астроном А. Эддингтон связал *стрелу времени*. Точнее, все необратимые процессы могут идти только в направлении вперед во времени, тогда как обратимые — в обе стороны. Но почти все процессы являются необратимыми.

Второе начало термодинамики претерпело эволюцию — от тепловой аксиомы, выражающей опытный факт о невозможности самопроизвольного перехода теплоты от холодного тела к горячему (1850), к принципу эквивалентности превращений (1854) и к принципу существования и возрастания энтропии (1865). Итак, в изолированной системе энтропия может только возрастать, что эквивалентно второму началу термодинамики.

Основоположники классической термодинамики — Кельвин и Клаузиус — считали, что ее начала годятся для любой изолированной системы, в том числе и для всей Вселенной. Отсюда — вывод о неизбежности ее «тепловой смерти», т.е. такого состояния, когда все процессы прекратятся, и мир перейдет в состояние термодинамического равновесия. Они не находили процессов, в которых энергия могла бы повышать свое качество, считали, что все тепловые явления самопроизвольно происходят

144

только в одном направлении: горячие тела охлаждаются, холодные — сами по себе не нагреваются, т.е. распределение энергии необратимо. Но они отделяли это свойство мира от сохранения количества энергии при всех превращениях. Второе начало термодинамики указывает естественное направление изменения распределения энергии, не зависящее от количества энергии. Идеи Клаузиуса и Кельвина носили описательный характер, но вызвали дискуссии.

Так, Ранкин выдвинул гипотезу *реконцентрации энергии*: Вселенная окружена особой эфирной оболочкой, обладающей свойствами зеркальной поверхности, и энергия может не рассеиваться, а концентрироваться в каких-то центрах мира, где температура будет повышаться. Возникшая разность температур вновь нарушит тепловое равновесие. В ответ Клаузиус показал, что никакое вогнутое зеркало не может дать температуру выше той, которая была присуща телу. Папа Пий XII считал: «Закон энтропии, открытый Рудольфом Клаузиусом, дал нам уверенность в том, что в изолированной материальной системе в конце концов процессы в макроскопическом масштабе когда-то прекратятся. Эта печальная необходимость свидетельствует о существовании Необходимого Существа». Энгельс расценил эти выводы как доказательство необходимости сотворения мира, как противоречие закону сохранения энергии, если второе начало говорит о качественном уничтожении энергии. Он указывал, что «вопрос будет решен окончательно лишь в том случае, если будет показано, каким образом излученная в мировое пространство теплота может быть снова используемой». Его «Диалектика природы» построена на идее круговорота энергии.

Начала термодинамики свидетельствуют о том, что энергия превращается из одной формы в другую так, чтобы энтропия возрастала (энергию и энтропию и называли «царица мира и ее тень»). Все виды энергии классифицируют в порядке возрастания «ценности». Высший класс у тех, которые способны превращаться в большее число форм энергии, им присущи минимальные хаос и энтропия. Средний класс — у химической энергии, а низший — остается теплоте, энергетические превращения которой ограничены принципом Карно. Самопроизвольные превращения энергии с ее деградацией и ростом энтропии — это преобразования от высших форм к низшим. Направление потока превращения энергии во Вселенной задается главным образом гравитацией, преобладающей в космосе количественно и имеющей почти нулевую энтропию. Поэтому КПД гидроэлектростанций во много раз больше, чем тепловых.

Но почему же гравитационная энергия до сих пор не превратилась в свет и теплоту? Больцман считал гипотезу «тепловой смерти Вселенной» Клаузиуса — Томсона плодом недоразумения. Он признал вероятностный смысл второго начала термодинамики и распространил его на Вселенную: «Если смотреть на мир как на нечто бесконечное, то возникают опять те же самые противоречия, какие получались, когда бесконечное считалось только пределом». Больцман нарисовал картину огромного

145

космического пространства, возможно, даже бесконечного во времени и пространстве, полная энтропия которого достигла своего максимального значения, но в котором имеются области, где в данный момент энтропия уменьшается. «Данный момент» может длиться биллион лет, а «данная область» может насчитывать биллионы галактик. Возможно, что та ничтожно малая область из этого бесконечного пространства, где находимся мы, и есть одна из областей гигантской флуктуации. В некоторый момент в прошлом энтропия уменьшилась, а сейчас возрастает. В вечном и бесконечном потоке материи в некотором месте появилась зона упорядоченности, а ныне порядок постепенно разрушается. Где-то процессы могут идти в обратном порядке, тогда и время там должно идти в обратном направлении, поскольку рост энтропии связан со стрелой времени. Но в этом случае и наше понимание причинности должно измениться на обратное: выходит, в тех областях пространства и времени следствие предшествует причине?! Больцмана это не смущало, он находил, что живое существо всегда будет определять путь от прошлого к будущему как от события маловероятного к более вероятному, и не отличит нарушений, как мы не отличаем верха и низа в пространстве. Эта идея Больцмана получила название *флуктуационной гипотезы*: на фоне всеобщей тепловой смерти возникают и эволюционируют отдельные миры, переходя из маловероятных состояний в более вероятные, что обуславливает протекание необратимых процессов.

Наблюдения в области эволюции звездных ассоциаций показывают, что процесс образования звезд не сводится к спонтанным флуктуациям, что одни формы энергии непрерывно превращаются в другие. Хотя огромное число достаточно изолированных галактик охвачено наблюдениями, пока не видели галактики в состоянии тепловой смерти. Таким образом необходимо расширить рамки флуктуации, где находимся мы, до размеров всей наблюдаемой Вселенной. По этому поводу Ландау и Лифшиц высказали замечание, что «неизмеримо большей вероятностью обладала бы флуктуация в размере одной только Солнечной системы, что было бы достаточно для обеспечения существования наблюдателя». Но Больцман пытался объяснить существование необратимых процессов во Вселенной на основе обратимых элементарных законов природы. Русский физик, астроном и метеоролог А.А.Фридман в 1922 г. утверждал, что, если уравнения теории тяготения Эйнштейна применимы ко Вселенной, то она должна меняться со временем — либо расширяться, либо сжиматься, либо пульсировать. Хотя модели расширяющейся Вселенной называют моделями Фридмана, но он не обсуждал начальный момент, считая, что для этого недостаточно данных. В 30-е гг. английские астрофизики А. Милн и М. Мак-Кри показали, что и в теории Ньютона можно получить режим сжатия и разрежения мира (см. гл. 9).

Флуктуационную гипотезу уточняли введением поправок на скорости и массы тел. Я.П.Терлецкий считал, что для больших масс вещества возможны большие флуктуации сжатия и разрежения. В периоды сжатия идут процессы конденсации, возникают звезды и планеты, в периоды разрежения, когда звезды «разбегаются» на достаточно большие расстояния, неизбежен распад конденсированных систем и превращение их в однородную газовую среду. Оценки, приведенные П.Дираком, Дж.Уи-

146

лером, Р.Фейнманом и Р.Пенроузом с учетом собственных гравитационных полей космических тел по строгим формулам ОТО показали, что в момент, когда сжатие прекращается и начинается разрежение, общекосмическое время поворачивает вспять, и на мгновение могут потухнуть все звезды. Такой вывод должен был служить доказательством теории «пульсирующей Вселенной», одна из теорем которой утверждает, что в этот момент меняется и знак материи. В 60-е гг. А. Д. Сахаров выдвинул гипотезу, по которой до момента рождения Вселенной существовала анти-Вселенная, где все было зеркальным отражением нашего мира, она постепенно сжалась в массу сверхплотного вещества, ставшего нейтральным. Из нее при сверхвысоких температуре и плотности возникла Вселенная, так как в тот момент образовалось больше протонов и нейтронов, чем антипротонов и антинейтронов, поэтому нам неизвестны антимир и антигалактики.

В 1922 г. немецкий физико-химик В.Нернст, считая тепловую смерть Вселенной невероятной, обратился к *явлению радиоактивности*, которое «познакомило нас с энергией такого могущества, о котором мы ранее не имели представления». Образование тяжелых атомов, скопление их в холодные звезды, разогреваемые за счет высокой радиоактивности, превратит их в раскаленные. Во Вселенной возникнут центры концентрации энергии, противодействующие тепловому равновесию. Р. Милликен основывал подобные выводы на свойствах космических лучей, пополняющих радиацию, непрерывно испускаемую звездами. Позже были открыты объекты, обладающие достаточной мощностью, чтобы быть источником космических лучей: сверхновые (взрывающиеся) звезды, радиогалактики (гигантские облака истекающих из них электронов, невероятно богатых энергией), галактики Сейферта (галактики с очень ярким и турбулентным ядром, описанные в 1943 г. американским астрономом К.Сейфертом), источники рентгеновского излучения, пульсары и квазары, выделяющие огромные количества энергии. В ядрах галактик и квазаров столь необычные условия, что на них невозможно распространять сложившиеся представления, т.е. необходимы новые модели (см. гл. 9).

Идеи непрерывного творения материи возникали неоднократно. Так, в 1948 г. ученые Кембриджского университета Г. Бонди, Т. Голд и Ф.Хойл выдвинули гипотезу *стационарной Вселенной*. Они оценили число порожденных за 100 лет из «ничего» атомов водорода для восполнения убыли материи из-за разбегания — 1 атом в кубе с ребром 100 м (!), т.е. за 5 млрд лет должно было образоваться всего 4 кг атомов. Но открытие в 1965 г. однородно распределенного в пространстве излучения с $T = 2,7$ К, истолкованного как «реликтовое» (оставшееся от Большого Взрыва), ослабило интерес к этой теории. Пока не ясно, существует ли скрытая полевая форма материи, непрерывно порождающая известные нам формы.

Термодинамика Вселенной — это теории звездных атмосфер и внутреннего строения звезд. Излучение, рождающееся в недрах звезды, покидает ее фотосферу, достаточно тонкую ее область. В ней происходит лучистый перенос энергии, который изучается в теории и сравнивается с данными наблюдений по распределению энергии в непрерывном спектре Солнца и звезд. Считают, что атмосферы спокойных звезд находятся в состоянии лучистого

147

равновесия, т.е. каждый элемент объема излучает столько энергии, сколько поглощает. Равновесное излучение в полости определяется только абсолютной температурой, его интенсивность не зависит ни от свойств полости, ни от места, ни от направления. Для него выведены законы Вина, Кирхгофа, Стефана — Больцмана. В звездных атмосферах ситуация несколько сложнее, но можно допустить локальность равновесного излучения.

Релятивистская термодинамика лежит в основе современной космологии. На обобщенных термодинамических принципах построены теория процессов в таких экзотических объектах, как «черные дыры», и модель эволюции Вселенной, в которую необходимо включить и открытое Хабблом красное смещение в спектрах галактик как одно из доказательств расширения Вселенной.

4.5. Начала термодинамики. Энтропия и вероятность. Принцип Больцмана

Термодинамика сначала исследовала тепловые явления, а после установления закона сохранения и превращения энергии стала изучать также превращения энергии во всех ее формах. Термодинамика основана

на трех-четырех утверждениях, которые включили в себя огромный опыт человечества по превращению энергии и называются началами термодинамики. Исторически первым установлено второе начало, потом — первое и третье, а последним — нулевое.

Нулевое начало термодинамики уточняет понятие температура. Тепловое равновесие существует, если система А приведена в тепловой контакт с системой В, но потоки энергии отсутствуют. Количественно введено понятие температуры: если системы А и В имеют одинаковую температуру, то системы находятся в тепловом равновесии друг с другом.

Первое начало термодинамики — это закон сохранения и превращения энергии в изолированной системе, утверждение существования внутренней энергии, поэтому его называют *принципом энергии*. Энергия утвердилась как основная сохраняющаяся величина (1847), когда договорились о терминах Кельвин и Джоуль. Теплота и работа определяют способы передачи энергии.

Второе начало термодинамики устанавливает направленность всех процессов в изолированных системах. Кельвин и Клаузиус отделили это начало — хотя полное количество энергии сохраняется в любом процессе, распределение энергии изменяется необратимо. Второе начало называют *принципом энтропии*. Теплота переходит самопроизвольно только от более нагретых тел к менее нагретым. При этом для направления, в котором происхо-

148

дит изменение распределения энергии, оказывается не важно само количество энергии. Это начало проявилось при преобразовании теплоты в полезную работу, оно сыграло важнейшую роль в преобразовании энергии, запасенной в топливе, в движущую силу. Ограничения, устанавливаемые вторым началом термодинамики, показали, что трудно выделить упорядоченное движение из неупорядоченного. В формулировке Кельвина второе начало таково: «Невозможен процесс, единственный результат которого состоял бы в поглощении теплоты от нагревателя и полного преобразования этой теплоты в работу».

Третье начало термодинамики определяет свойства веществ при очень низких температурах, утверждая, что нельзя охладить тела до температуры абсолютного нуля за конечное число процессов. Оно предполагает *атомное строение вещества*, тогда как остальные являются обобщением опытных данных и не содержат сведений о какой-либо структуре вещества.

Достоинство термодинамики в том, что она позволяет рассмотреть общие свойства систем при равновесии и общие закономерности установления равновесия, получить многие сведения о веществе, не зная в полной мере его внутреннюю структуру. Ее законы применимы к любому веществу, к любым системам, включающим электрические и магнитные поля и излучение, поэтому они вошли в физику газовых и конденсированных сред, химию и технику, необходимы в геофизике и физике Вселенной, используются в биологии и управлении процессами. В начале XX в. американский ученый Гиббс разработал метод термодинамических потенциалов, в котором состояние системы характеризуется той или иной функцией: внутренней энергией, энтальпией, свободной энергией или потенциалом Гиббса (см. гл. 8). Термодинамика строилась как классическая динамическая теория, так как все устанавливаемые ею связи носили однозначный характер и все описываемые ею явления объяснялись как абсолютно необходимые. Как и в механике, случайность не входит в теорию.

Энтропия — мера беспорядка в системах, как и сами понятия порядка и беспорядка, приобретает фундаментальное значение. Более глубокое толкование и понимание смысла энтропии и начал термодинамики было дано с позиций статистической физики. Если каждое макроскопическое состояние газа может быть получено с определенной вероятностью, то вероятность может быть вычислена через вероятности микросостояний.

Термодинамической вероятностью W называют число микросостояний, которыми может быть осуществлено данное макроскопическое состояние. Замена одной микрочастицы на другую из-за их неотличимости не меняет макроскопического состояния, хотя с микроскопической точки зрения ситуация изменилась. Свойства термодинамической вероятности похожи на свойства энтро-

149

пии — обе максимальны в состоянии равновесия, и переход к равновесию связан с их ростом. Энтропия является **аддитивной** (от лат. *additivus* — придаточный) величиной и пропорциональна логарифму термодинамической вероятности: $S = k \ln W$. Это известное выражение определяет *принцип Больцмана*.

Пусть сначала газ, содержащий N молей, занимает объем V_1 , после открытия заслонки он расширился в объем V_2 . При этом логарифм вероятности его возрос на величину $N (V_2 - V_1)$. Сравним ее с величиной изменения энтропии при расширении газа в пустоту: они отличаются только единицами измерения, и при умножении логарифма вероятности на величину R/N получим изменение энтропии при необратимом процессе. Итак, логарифм изменения вероятности состояния с точностью до постоянного множителя совпадает с изменением энтропии. Больцман считал атомистическую гипотезу обоснованной. Бесконечное или огромное число частиц делает невозможным механическое, требует статистического описания. Математическим инструментом статистики является исчисление вероятностей. Больцман показал, что поскольку в основе термодинамических процессов лежат обратимые кинетические процессы, то необратимость в термодинамике, измеряемая энтропией, не может быть абсолютной. Поэтому и энтропия должна быть связана с вероятностью осуществления данного микросостояния.

Понятие вероятности, неявно использованное Максвеллом, Больцман применил для преодоления

трудностей, связанных с пониманием второго начала термодинамики и гипотезы «тепловой смерти Вселенной» (1878). Вершиной творчества Больцмана явилось установление связи между энтропией и термодинамической вероятностью. Планк записал эту связь через введение константы $\kappa = R/N$, которую назвал *постоянной Больцмана*.

Итак, необратимый процесс есть переход из менее вероятного состояния в более вероятное, а логарифм изменения вероятности состояния с точностью до постоянного множителя совпадает с изменением энтропии состояния. Эту связь Больцман установил сначала для идеального газа.

Чем выше степень беспорядка в координатах и скоростях частиц системы, тем больше вероятность того, что система будет в состоянии хаоса. Формула Больцмана может рассматриваться как определение энтропии.

Поскольку S увеличивается с ростом W , и все системы стремятся перейти в более вероятное состояние, то и изменение энтропии $S_2 - S_1 = k (\ln W_2 - \ln W_1) = k \ln(W_2/W_1) > 0$. При расширении газа в пустоту W_2/W_1 пропорционально соответствующему изменению объемов в степени N , поэтому для изменения энтропии можно записать $Nk \ln(V_1/V_2)$. Умножая и деля это выражение на T , получим: $S = NkT \ln(V_1/V_2)/T$. Но так как $dS = dQ/T$, то в числителе формулы для изменения энтропии стоит подводимая к системе по обратимому пути теплота.

Рассмотрим два одинаковых по массе m и удельной теплоемкости c тела, которые первоначально имели разные температуры T_1 и T_2 . После

150

установления между ними теплового контакта в результате перехода теплоты dQ их температуры изменились: T_1 , $-dT_1$ и $T_2 + dT_2$. Поскольку $dQ = -mcdT_1$ и $dQ = +mcdT_2$ равны, то и $dT_1 = -dT_2 = dT$.

Если $dS = dQ/T$, для каждого процесса можно записать: $dS_1 = -mcdT/T_1$ и $dS_2 = mcdT/T_2$.

Суммарное изменение энтропии равно: $dS = mcdT(1/T_2 - 1/T_1)$, а температуры — $dT = (T_1 T_2 / mc) (dS / (T_1 - T_2))$. Так как $dS > 0$, то и $dT > 0$ или $T_1 \sim T_2 > 0$.

Это значит, что при $T_1 > T_2$ теплота будет самопроизвольно перетекать от тела с более высокой температурой к менее нагретому телу. И при увеличении энтропии замкнутой системы, содержащей тела с разными температурами, ее рост сопровождается потерями механической работы в количестве, равном величине dS , умноженной на температуру более холодного тела. Можно ли уменьшить энтропию? Второе начало термодинамики применимо только к изолированным системам, при совместном рассмотрении всех частей системы энтропия не уменьшается.

Деятельность человека может приводить к локальному уменьшению энтропии. Холодильники и тепловые насосы перекачивают теплоту от холодного тела к более горячему за счет траты энергии извне, но в полной системе энтропия может только расти. Больцману удалось установить в теории газов основное различие между тепловыми и механическими явлениями, которое долгое время было главным аргументом против всякой кинетической теории. Механические явления обратимы, и знак времени в них не играет никакой роли, тогда как тепловые явления так же необратимы, как и выравнивание двух температур. Если теория газов, основанная на механике, приводит к необратимым явлениям, то это связано с гипотезой молекулярного беспорядка, и аналогия с ростом энтропии здесь очевидна. В настоящее время понятие энтропии получило дальнейшее развитие в теории информации, лежащей в основе кибернетики, но об этом речь будет идти позже.

4.6. Микро- и макропеременные в описании систем. Основные модели

Идеал научной теории, сложившийся под влиянием успехов классической механики, состоял в отыскании наиболее общих, количественно формулируемых законов природы. В механике состояние системы однозначно определяют координаты и скорости частиц; по ним можно вычислить любую величину в данный момент времени: энергию, момент импульса и пр. Знание действующих на систему сил позволяет определить состояние сис-

151

темы в любой другой момент времени. Эта удивительная *однозначность и детерминизм* — основы классического динамического описания.

Параллельно с развитием классической механики частиц и твердых тел шло развитие и механики сплошных сред (жидкостей, газов и деформируемых твердых тел). Трудami Бернулли, Эйлера и других ученых были заложены основы гидродинамики *идеальной жидкости*. Уравнение Эйлера для движения жидкостей и газов в отсутствие вязкости и теплопроводности можно вывести из законов Ньютона для системы материальных точек. Вместо координат и импульсов частиц Эйлер задавал состояния системы некоторыми функциями, описывающими распределение различных физических величин в пространстве (плотность, давление и скорость); они связаны не с отдельной частицей, а с точкой пространства в данный момент времени, т.е. описывают состояние среды в целом. И для решения задач нужно задавать не конечное число координат и импульсов, а начальные и граничные условия на них. Если уравнение Эйлера решать вместе с уравнением непрерывности, выражающим закон сохранения вещества в гидродинамике, решаются любые задачи динамики идеальных сред, т.е. *динамический характер законов динамики идеальных сред* остался неизменным.

Гидродинамика неидеальной (вязкой) жидкости стала развиваться в XIX в. При движении такой жидкости (или газа) возникают *силы трения* и *теплообмен*. Имеет место *диссипация энергии*, которая не учитывается в идеальных моделях. В этом случае уже нельзя строить теорию процессов, опирающуюся только на механику, где все процессы обратимы. И такая теория была построена только на основе теории теплоты, где иначе (чем в механике) определяется состояние системы.

Состояние системы в термодинамике зависит от ее параметров — температуры T , давления p , объема V . Если последние два параметра имеют механический смысл, то первый его лишен. Между параметрами существует связь, выражаемая уравнением состояния, которое устанавливается из опыта и не получено теоретически. Известно, что состояние для заданной массы газа в отсутствие внешних воздействий не меняется, если газ находится в равновесном состоянии.

Газ — это совокупность слабосвязанных частиц. Атомы в газах находятся на значительном расстоянии друг от друга и обладают свободой движения, хаотически сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. Расстояния между атомами столь велики по сравнению с их размерами, а время сближения частиц столь мало, что все газы ведут себя одинаково.

Модель идеального газа — это газ, молекулы которого пренебрежимо малы, свободно двигаются и сталкиваются по законам упругого удара. Частицы принимаются за материальные точки,

152

взаимодействующие на расстоянии. Частицы газа являют собой наилучший пример неупорядоченной совокупности однородных объектов (фр. *gaz*, греч. *chaos* — **хаос**).

Модель реального газа, предложенная Ван-дер-Ваальсом (1873), отличалась от модели идеального газа учетом объема самих молекул и их взаимодействия. Последний фактор несколько уменьшает давление — каждая молекула при столкновении как бы тормозится притяжением соседних. Так появилось новое уравнение состояния, которое получило имя автора.

При низких абсолютных температурах газы уже не похожи на газы, их свойства определяются квантовыми законами. В этих условиях используют квантовые функции распределения, которые переходят в классические с повышением температуры. Области, в которых наступают отклонения от закона распределения, называют *областями вырождения* газа (для водорода, например, эта область находится при $T = 1$ К, для других газов — еще ниже).

4.7. Основные положения молекулярно-кинетической теории и эмпирические газовые законы

Тела могут находиться в разных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твердом или в виде плазмы), но все они состоят из молекул, а молекулы — из атомов. Элементарная молекулярно-кинетическая теория газов основана на классической механике, молекулы представлены материальными точками.

Молекулярно-кинетическая теория строения вещества основана на следующих основных положениях:

1. Молекулярное строение веществ подтверждено существованием процессов растворения, диффузии, броуновского движения и др.

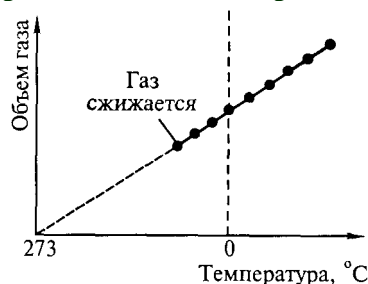
2. Молекулы находятся на определенных расстояниях друг от друга, что доказывается возможностью сжатия и перечисленными выше процессами. Размеры молекул газа малы по сравнению с расстояниями между ними. При отсутствии внешних сил молекулы газа равномерно заполняют весь предоставленный им объем.

3. Молекулы связаны силами молекулярного взаимодействия — притяжения и отталкивания. Силы отталкивания на малых расстояниях превосходят силы притяжения, но быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами, и с некоторого расстояния r_0 , называемого радиусом молекулярного действия, ими можно пренебречь. В отсутствие внешних воздействий молекулы находятся в устойчивом состоянии на расстояниях $2r_0$. Эти силы имеют электромагнитную природу.

4. Молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении, что доказывают те же процессы.

153

Рис. 4.4. График зависимости объема газа от температуры, экстраполированный к точке, в которой объем был бы равен нулю



5. Внутреннюю энергию молекулярной системы составляет сумма кинетической энергии движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия и всех прочих энергий этой системы.

6. В любом, даже самом малом объеме газа, к которому применимы выводы этой теории, число молекул велико.

Газовые законы были получены эмпирически для равновесного состояния:

закон Бойля — Мариотта, который выполняется при постоянной температуре T , имеет для 1 моля идеального газа следующий вид: $p_1 V_1 = p_2 V_2$, т. е. описывается изотермой на p – V -диаграмме;

закон Гей-Люссака — изменение объема при температуре T , постоянном давлении (β — коэффициент объемного расширения газа): $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$, т.е. описываемом изобарой (рис. 4.4);

закон Шарля — изменение давления и температуры T при постоянном объеме $p = p_0(1 + \alpha \Delta T)$, т. е. изохорный процесс. Здесь α — термический коэффициент давления.

Уравнение состояния, введенное Клапейроном, для заданной массы газа объединяет три газовых закона, связывая между собой параметры газа. Клапейрон впервые употребил и графическое изображение обратимых круговых процессов, вычислив работу как соответствующую площадь на графике. Согласно закону Авогадро, количества любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковый объем, который при нормальных условиях равен $22,4 \text{ л} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Д. И. Менделеев обобщил с учетом закона Авогадро уравнение Клапейрона: $pV = (m/\mu)RT$, где m — масса газа; μ — его молекулярная масса; R — универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Газовые законы, как всякие эмпирические, справедливы приблизительно и описывают поведение почти идеальных газов при невысоких давлениях и не слишком высоких температурах. Подобных универсальных законов нет для жидкостей или твердых тел. Их свойства зависят от типа частиц, из которых они состоят, и силы взаимодействия между частицами в них меняются в широких пределах. Опыт показывает, что эти силы, имеющие отчасти характер электростатического взаимодействия, при расстояниях между молекулами более 10^{-9} м убывают столь быстро, что ими можно пренебречь. Поэтому свойства идеальных газов близки к свойствам реального газа.

154

Так как молекул много и они часто ударяются о стенку, их суммарное действие на поверхность можно заменить одной непрерывно действующей силой, которая как бы сглаживает отдельные толчки. Такое описание называется **статистическим** — время и место удара каждой молекулы о поверхность не интересны, важен только общий эффект, т. е. то, что входит в статистический закон.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа при тепловом равновесии одинакова для всех молекул газов, находящихся в тепловом контакте. Значит, $E_{\text{к.ср}}$ обладает основным свойством температуры и не зависит от внутренней структуры молекул. И ее можно принять за меру температуры газа или тела, находящегося в тепловом контакте с газом: $E_{\text{к.ср}} = (3/2) kT$.

Температура газа должна определяться средней кинетической энергией его молекул. В 1730 г. Д. Бернулли наметил **кинетику** газовых сред. В частности, он сумел из атомистических представлений вывести закон Бойля — Мариотта. Этот закон вывел и М.В. Ломоносов — его гипотеза о внутреннем вращательном движении составляющих материю частиц позволила наглядно объяснить механизм нагревания двух трущихся друг о друга поверхностей.

4.8. Связь параметров газа с его микроструктурой. Распределение Максвелла

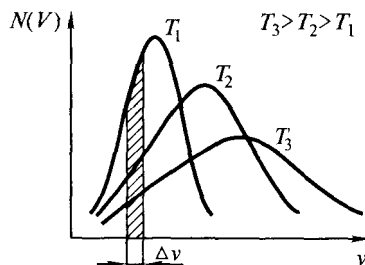
Процесс — это переход системы из одного состояния в другое через некоторую последовательность промежуточных состояний. Важной схематизацией, часто используемой в молекулярной физике, является понятие о равновесном процессе.

Равновесным называют состояние, если характеризующие его параметры при отсутствии внешних воздействий постоянны неограниченное время", иначе — состояние **неравновесное**. Равновесное состояние изображается точкой в координатной плоскости, если по осям отложить значения каких-либо двух параметров системы. Неравновесное состояние так изобразить нельзя, так как параметры имеют неопределенные

значения. Процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое всегда связан с нарушением равновесия системы. Но если это происходит медленно, то за любой малый промежуток времени состояние системы можно охарактеризовать определенными значениями параметров. И такой процесс можно считать состоящим из ряда равновесных процессов. Равновесный процесс состоит из непрерывной последовательности равновесных состояний, и чем медленнее протекает процесс, тем он больше похож на равновесный. Только равновесный процесс можно изобразить непрерывной линией; на графике.

155

Рис. 4.5. Распределение молекул по скоростям при температурах T_1 , T_2 , T_3



Рассматривая газ как совокупность мельчайших упругих шариков — атомов, которые хаотично двигаются в пустоте, А. Крениг из вероятностных соображений принял, что атомы газа движутся по трем взаимно перпендикулярным направлениям с одинаковой скоростью. Элементарный расчет дал уравнение, связывающее давление p и объем V газа с его массой m и скоростью атомов v : $pV = kmv^2$. Крениг в 1856 г. верно указал на связь pV с кинетической энергией частиц, получил из кинетической модели закон Авогадро и объяснил охлаждение газа при адиабатическом охлаждении (хотя при оценке давления он взял коэффициент $1/6$ вместо $1/3$). Работа Кренига подтолкнула Клаузиуса к опубликованию своих результатов (1857). Рассматривая удар молекул о стенку по законам упругих столкновений, Клаузиус вывел:

$$p = Nm\overline{v^2}/3V \text{ или } pV = (3/2)N(m\overline{v^2}/2) = (3/2)K,$$

где K — энергия поступательного движения всех частиц газа. Поскольку давление и объем идеального газа связаны уравнением Клапейрона, он получил: $N(m\overline{v^2}/2) = kT$, здесь k — постоянная Больцмана.

Кинетическая теория объяснила многие явления — теплопроводность, диффузию, растворение и др., позволила рассчитать сначала относительные и абсолютные значения средних скоростей молекул разных газов, найти **средний свободный пробег** молекулы — среднее значение длины прямолинейного пути, проходимого молекулой между последовательными соударениями. Его дал Дж. Максвелл в 1866 г.

Отсюда нетрудно посчитать и **среднее число соударений** частицы за определенное время. При обычных условиях оно велико — около 5 млрд соударений за 1 с. Подведение теплоты увеличивает кинетическую энергию движения частиц, растут давление и температура. Как только они достигают высоких значений, возрастает вероятность столкновений между частицами, и сходство газов исчезает.

Поступающая в газ энергия должна как-то распределиться между атомами. Но одна часть атомов движется быстрее, другая — медленнее, а их средняя кинетическая энергия пропорциональна температуре газа T . Если к сосудам, содержащим равное число молекул двух разных газов, подвести равное количество теплоты, то их температура повысится на одну и ту же величину, т.е. удельные теплоемкости c , приходящиеся на одну молекулу, одинаковы.

156

Распределение молекул по скоростям определяет распределение энергий, или энергетический спектр газа, от которого зависят многие свойства газов. В состоянии равновесия все направления скоростей равновероятны, иначе тепловое движение частиц не было бы беспорядочным, но равными по величине они быть не могут. Если такое и случится, то столкновения быстро изменят эту ситуацию. Максвелл рассуждал следующим образом: ни одно направление движения и ни одно значение скорости не являются выделенным, и предоставленный самому себе газ приходит в стационарное состояние с определенным распределением скоростей (рис. 4.5).

Поскольку по всем трем осям проекции скоростей должны быть независимы и равновероятны, можно записать $W(v_x, v_y, v_z) = W(v_x)W(v_y)W(v_z)$, причем все вероятности распределения $W(v_i)$ должны иметь одинаковый вид. Кроме того, с одинаковой вероятностью будут встречаться скорости вдоль каждой оси и против нее, т.е. вероятность должна зависеть от квадрата скоростей $W(v_i^2)$. Повернем теперь координатные оси так, чтобы новая ось x' совпала с направлением вектора скорости, т.е. проекции скорости в новой системе будут $(v, 0, 0)$. От поворота осей значение функции $W(v)$ измениться не должно, поэтому $W(v_x, v_y, v_z) = W(v'^2_x)W(0)W(0)$.

$$\text{Но } v'^2_x = v^2 = v^2_x + v^2_y + v^2_z, \quad W(v^2)W^2(0) = W(v'^2_x)W(v'^2_y)W(v'^2_z).$$

Таким образом, нужно найти функцию от суммы величин, которая распадается на произведение таких же функций от каждого слагаемого в отдельности. Этим свойством обладает только показательная функция. Например, для основания степени числа 10: $10^{a+b+c} \cdot (10^0)^2 = 10^a \cdot 10^b \cdot 10^c$. (Можно взять и любое другое число.) Но квадраты проекций скорости на оси — величины размерные и потому не могут стоять в показателе степени без коэффициента, обеспечивающего его безразмерность.

Среднее значение кинетической энергии имеет размерность квадрата скорости:

$\langle E_K \rangle = m \langle v^2 \rangle / 2 = (3/2)\theta$. Поэтому величина θ/m имеет ту же размерность, а обратная ей m/θ — размерность обратного квадрата скорости. Если взять за основу величину $e = 2,718\dots$, то среднее значение кинетической энергии не изменится и согласуется с прежним определением. Тогда искомая функция $W(v_x)$ окажется пропорциональной $\exp(-mv_x^2/2\theta)$. Очевидно, что нужно подобрать еще коэффициент пропорциональности, исходя из условия, что $W = 1$. Запишем этот коэффициент в готовом виде и получим искомое максвеллово распределение по скоростям:

$$W(v_x) = \sqrt{m/2\pi\theta} \exp(-mv_x^2/2\theta).$$

Можно показать, что никакая другая функция распределения, кроме $\exp(-E/\theta)$, не совместима с законом сохранения энергии при отдельных соударениях частиц. Графически $W(v_x)$ представляется гауссовой кривой. Максимум этой кривой лежит в окрест-

157

ности нуля, т.е. в газе больше всего молекул с нулевыми значениями компонент скорости. Это связано с равной вероятностью направлений скоростей, так что средняя проекция скорости хаотического движения на любое направление равна нулю. Гауссовы распределения встречаются в разных системах (даже в социальных). Площадь под кривой соответствует общему числу молекул газа.

Максвелл рассматривал свою модель газа как математическую аналогию реальности. «Вместо того, чтобы говорить, что все частицы тверды, упруги и шарообразны, можно сказать, что частицы являются центрами сил, действие которых ощутимо лишь на некотором малом расстоянии, где они проявляются внезапно и в виде очень интенсивной силы отталкивания». Далее он проводит сопоставление с величинами, характеризующими тепловое движение, заменяя среднюю скорость распределением скоростей (1859). Проведя ряд опытов, Максвелл заключил, что сила отталкивания должна быть обратно пропорциональна пятой степени расстояния между молекулами. В 1866 г. он вывел свой закон распределения по скоростям уже с этой поправкой.

Распределением Максвелла называется распределение молекул по проекции скорости, определяемое функцией $W(v_x) = (m/2\pi\theta)^{1/2} \exp(-mv_x^2/2\theta)$. Распределение по компонентам скорости является частным случаем нормального закона распределения Гаусса, которому подчиняются случайные ошибки при измерениях.

Абсолютное значение скорости не может быть отрицательным, и так как неподвижных частиц в газе нет, функция распределения по абсолютному значению скорости начинается с ее нулевого значения:

$$dN = 4N(m/2)^{1/2} \exp(-E/\theta) dv \text{ и } dN = F(v).$$

Основное отличие от предыдущего распределения заключается в существовании множителя — квадрата скорости.

Поскольку $\exp(-E/\theta)$ при возрастании скорости убывает быстрее, чем возрастает квадрат скорости, получающееся распределение асимметрично. Максимум функции $F(v)$ имеет место при наиболее вероятной скорости $v_B = \sqrt{2kT/m}$. Среднее арифметическое значение скорости находится по формуле: $\langle v \rangle = \int v F(v) dv = \sqrt{8kT/m}$. Среднее значение квадрата скорости равно $\langle v^2 \rangle = 3kT/m$, а квадратный корень из него называют средней квадратичной скоростью:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3kT/m}.$$

Распределению Максвелла удовлетворяют закон сохранения энергии и принцип детального равновесия в отдельных соударениях, когда при хаотическом движении в газе скомпенсированы два противоположно направленных процесса с равными скоростями. Этот принцип справедлив не только для газов, но и для любых систем в состоянии полного хаоса.

158

4.9. Распределение частиц газа во внешнем поле и в атмосферах планет

Распределение Больцмана — это распределение газа по занимаемому объему, если газ находится во внешнем поле; оно отлично от равномерного. Для газа в поле силы тяготения имеет место барометрическая формула $p = p_0 \exp(-gh/RT)$, которая может быть записана и для концентрации на определенных высотах в виде: $n = n_0 \exp(-mgh/kT)$.

Формулу для концентраций, записанную через $\exp(-E/kT)$, где E — потенциальная энергия в любом поле (не обязательно в гравитационном), называют *формулой Больцмана*. Плотность газа убывает с высотой, но температура остается постоянной. Множитель $\exp(-mgh/kT)$ определяет вероятность того, что молекула находится на высоте h над поверхностью Земли, и задает зависимость плотности атмосферы от высоты. Отношение плотностей на высотах h и 0 равно отношению функций $W(h)/W(0)$. Последняя из них равна единице, так как $\exp(0) = 1$. Поэтому и $n(h) = n(0) \exp(-mgh/\theta)$.

В соответствии с этой формулой, концентрация тяжелого газа в атмосфере должна убывать быстрее, чем легкого, и слой атмосферы на высоте более 60 км должен состоять уже из самых легких газов — водорода и гелия. Но из-за сильного перемешивания атмосфера однородна по составу на высоте до 90 км, меняясь лишь с высоты 95 км. Причина отклонения — диссоциация молекул под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Считалось, что потенциальная энергия равна mgh , что верно для $h \ll r_3$. Так как сила тяжести убывает как $1/r^2$ от центра, потенциальная энергия должна убывать как первая степень расстояния. С ростом r плотность $n(r)$ падает, т.е. и показатель степени становится меньше, тогда можно записать: $n(r) = n(0) \exp(-mgr_3/kT)$.

При удалении от Земли на бесконечно большое расстояние $n(r)$ сохраняет конечное значение, что, странно. Земная атмосфера не может простираться до бесконечности, а этот множитель показывает, во сколько раз плотность атмосферы на бесконечности должна быть меньше, чем на поверхности Земли. Парадокс в том, что, если наступит статистическое равновесие, улетучится атмосфера Земли. Но множитель мал, и такого не случится. Для оценки величины показателя степени умножим и разделим его на число Авогадро N . В знаменателе заменим $N = RT$, в числителе учтем, что N_m равно молекулярному весу. Подставляя значения $r_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м и $g = 10$ м/с² и считая $T = 300$ °С, получим: $Nmgr_3/RT = (30 \cdot 1000 \cdot 6,4 \cdot 10^8)/(8,3 \cdot 10^7 \cdot 300) = 700$ и $\exp(-700) = 10^{-300}$, т.е. на бесконечности атмосфера фактически ничтожно мала.

159

Для Луны это число порядка 10^{-25} и тоже мало, но не так, как для данных Земли. Если бы атмосфера у поверхности Луны была такой же, как у поверхности Земли, т.е. равна $2,7 \cdot 10^{19}$ мол/м³, то на бесконечности остался бы 1 атом/м³. Приближаясь к состоянию статистического равновесия, атмосфера Луны улетучилась. В самом деле, из-за малой массы Луны вторая космическая скорость в 12 раз меньше, чем на Земле. У Марса, который тоже меньше Земли, весьма разреженная атмосфера, а у Юпитера и Сатурна, напротив, атмосферы очень плотные. При точном расчете нужно было бы рассмотреть процессы в нижних и верхних слоях атмосферы, но оценки можно сделать только при знании скоростей убегания молекул на высоте и у поверхности планеты, которые связаны со значениями ускорения свободного падения на разных высотах.

Оценка времени рассеяния атмосферы, зависящего от изменений температуры, такова: при изменении T на 15% оно меняется на два порядка. Это объясняет наличие атмосферы на Титане (шестом спутнике Сатурна) и отсутствие ее на Луне, хотя скорости убегания на этих спутниках почти одинаковы — 2,6 и 2,4 км/с соответственно. На Титане температура 70—120 К, т.е. намного ниже, чем на Луне. При такой низкой температуре только легкие газы типа гелия и водорода имеют тепловые скорости, позволяющие им убежать из атмосферы. Обнаруженная на Титане атмосфера состоит из метана и, возможно, аммиака. На Меркурии скорость убегания порядка 3,8 км/с, но близость его к Солнцу позволяет даже тяжелым молекулам иметь достаточную скорость для убегания из атмосферы, поэтому для существования атмосферы на Меркурии самые плохие условия в Солнечной системе. Рассеяние атмосферы, кроме того, сильно возрастает из-за диссоциации многоатомных молекул под действием солнечного излучения.

Число Авогадро

Число Авогадро, введенное в показатель степени в распределении Больцмана, впервые определил Ж.Перрен по зависимости плотности газа от высоты. Он взял коллоидный раствор частиц гуммигута в воде, в котором при равновесии концентрация больше у основания сосуда. При боковом освещении эти частички напоминают пылинки в солнечном луче. Перрен сумел построить функцию $\exp(-mgh/kT)$, натуральный логарифм которой равен: $mgh/kT = Nmg/RT$. Зная массу коллоидных частиц из других измерений, он вычислил N . Так впервые была доказана реальность существования молекул, а статистическая физика позволила из свойств совокупности многих молекул найти свойства и характеристики отдельных частиц. Возникла возможность избежать неудобств, связанных с решением уравнений движения отдельных частиц.

В равновесном состоянии распределение частиц должно быть наиболее вероятным, и это осуществляется посредством многих столкновений. Если возникнут какие-то иные распределения, то при создании в системе беспорядка они исчезнут, и установится наиболее вероятное распределение.

Если вывести распределение Больцмана из принципа детального равновесия, то получится та же формула, где E — полная

160

энергия молекулы. Это распределение названо **распределением Максвелла — Больцмана**, поскольку оба распределения обусловлены столкновениями молекул. Кинетическая энергия частиц, позволяющая им подниматься в силовом поле, вызвана только столкновениями.

Распределение Максвелла — Больцмана соответствует наиболее вероятному распределению числа молекул в состоянии статистического равновесия. Для реальных газов этот закон применим пока можно пренебречь взаимодействием молекул на расстоянии, т.е. для достаточно разреженных газов.

Ричардсон опытным путем проверил Максвеллово распределение по скоростям (1908), а Дж. Франк и Г. Герц измерили длину свободного пробега ионов водорода (1912). В то же время еще с конца 90-х гг., атомистика подвергалась непрерывным критическим атакам со стороны ряда естествоиспытателей и философствующих физиков (Оствальд, Мах, Дюгем, Гельм и др.). В своем неприятии атомистики критики исходили из следующего положения: поскольку законы термодинамики есть обобщение огромного опыта человечества, они абсолютны, поэтому обратимость во времени, связанная с тенденцией возрастания энтропии, не может объясняться механическим движением мифических микрочастиц, так как законы механики обратимы.

Приведенный выше вывод распределения Максвелла по скоростям относится к одноатомным газам. Для двух- или трехатомных газов следовало бы в энергию ввести члены, характеризующие вращение или переносное движение атомов в молекуле относительно друг друга. На каждый вид вращения приходится энергия $kT/2$, так что средняя энергия вращения двухатомной молекулы $2(kT/2) = kT$, трехатомной — $3(kT/2) = (3/2)kT$, но более трех вращений не может быть, поэтому для многоатомной молекулы энергия вращения также $(3/2)kT$.

Средняя энергия колебаний считается равной на каждое колебание, т.е. для молекулы водорода средняя

энергия равна $(3/2)kT + kT + kT = (7/2)kT$. Здесь первое слагаемое обязано переносному движению, второе — вращательному, третье — колебательному. Из опыта следует, что она равна не $(7/2)kT$, а $(3/2)kT$. Это связано с тем, что оценки по классической механике в этом случае не дают верного результата — для повышения температуры на 1 °C требуется теплота, равная c . Квантовые законы меняют вид функций распределения, но они должны использоваться при низких температурах.

4.10. Понятие «флуктуация» и точность измерений

Возрастание энтропии замкнутой системы есть стремление системы к наиболее вероятному состоянию. Оно близко к состоянию с несколько меньшей вероятностью, и всегда будут иметь

161

место небольшие, меняющиеся со временем, отклонения от него. Так, если сосуд с газом разделить перегородкой на две равные части, а затем ее убрать, то при равновесии в каждой части должно оказаться одинаковое количество частиц. Равновесие это динамическое, так как о равенстве числа частиц можно говорить лишь применительно к средним значениям, которые устанавливаются за длительный промежуток времени. Самопроизвольные отклонения величин от средних значений, обусловленные тепловым движением, называются *флуктуациями*.

Флуктуациями объясняется открытое Броуном хаотическое движение мельчайших частиц в жидкости (1827). Польский физик-теоретик М. Смолуховский исследовал броуновское движение (1906) на основе статистического подхода, а на следующий год А.Эйнштейн завершил теорию. У.Оствальд писал: «Совпадение броуновского движения с требованиями кинетической гипотезы дает теперь право самому осторожному ученому говорить об экспериментальном доказательстве атомистической теории материи. Таким образом, атомистическая гипотеза выведена в ранг научной прочно обоснованной теории» (1908). Эйнштейн в 1905 г. оценил число столкновений в газе атомов за 1 с в 10^{21} , считая, что скорости должны определяться именно столкновениями. При таком большом числе столкновений возможно только вероятностное описание. Он рассчитал средний квадрат смещения броуновской частицы и дал формулы для определения величин, характеризующих размеры молекул, их число в единице объема и т. п. Так было введено статистическое описание.

Большие флуктуации, т.е. отклонения от среднего, в системах огромного числа частиц по закону больших чисел должны быть редкими. Меньшие флуктуации должны бы встречаться чаще, но они слишком малы, и в то время не было чувствительных приборов для их обнаружения. Статистический подход к термодинамике способствовал пересмотру ее основ. Например, «вечное» движение броуновских частиц противоречит раннему варианту второго начала термодинамики, согласно которому температура в замкнутой системе должна постепенно выравниваться. Когда система придет к равновесию, в ней нельзя преобразовать тепловую энергию в полезную энергию, или работу. Эйнштейн и Смолуховский (независимо один от другого) разрабатывали теорию флуктуаций и вводили статистические понятия применительно к тем явлениям, в которых «антиэнтропийное» поведение можно наблюдать непосредственно. Смолуховский на многих примерах показал, как микроскопически обратимые процессы приводят к необратимым макроявлениям. Он оценил «время возврата» для разных процессов и показал, что оно может быть наблюдаемо для небольших флуктуаций, тогда как для больших оно чудовищно велико. Поэтому обратимость и необратимость

162

процессов связаны со временем наблюдения и, значит, относительны.

Теория флуктуаций приводит к выводу о существовании некоторого предела чувствительности измерительных приборов из-за флуктуаций, размеров измеряемой величины и элементов самого прибора. В 1912 г. Смолуховский указал на важный случай флуктуаций, имеющих отношение к измерениям: маленькое зеркальце, подвешенное на крутящейся нити, и сама нить должны испытывать флуктуации из-за броуновского движения молекул воздуха и атомов вещества, т. е. сама структура вещества, из которого изготовлены приборы, налагает запрет на безграничное повышение точности измерений.

Происхождение голубого цвета неба Смолуховский объяснил также с помощью теории флуктуаций и проверил свои идеи опытом: он пропустил сквозь тщательно отфильтрованный воздух мощный поток света и наблюдал на фоне зачерненной поверхности голубоватую окраску воздуха. Тиндаль считал, что причиной этого служит рассеяние коротковолновой части солнечного излучения мельчайшими частицами тумана, дыма или пыли. Рэлей предполагал, что оптическую неоднородность атмосферы создают отдельные молекулы воздуха.

4.11. Процессы обратимые и необратимые. Принцип локального равновесия

Положению равновесия с молекулярно-кинетической точки зрения отвечает состояние максимального хаоса в **изолированной системе**. По законам термодинамики такая система вернется в положение равновесия; при удалении от него ее состояние становится все более неустойчивым, и даже малые изменения какого-либо параметра могут перевести систему в новое состояние. Необходимо обобщение теории на необратимые процессы и на **открытые системы**, которые могут обмениваться с окружающей средой веществом или

энергией. Таких обобщений требовала и развивающаяся техника, и многочисленные приложения в физике, химии, биологии.

Учет зависимости параметров от времени и положения при неоднородностях приводил к движению в системах. У. Томсон начал развивать динамическую **теорию теплоты** (1854), когда французский физик Ж. Пельтье предсказал эффект: при прохождении тока через неравномерно нагретый проводник может наблюдаться поглощение или выделение теплоты в зависимости от направления тока. Эти обратимые явления сопровождаются необратимым процессом — выделением теплоты вдоль неравномерно нагретой цепи и теплопроводностью. Томсон ввел неравенство во

163

второе начало и связал коэффициенты теплоты с температурными коэффициентами электродвижущей силы. Так появилась **теория термоэлектричества**. Г.Гельмгольц (1878) и В.Нернст (1889) расширили границы применения второго начала термодинамики, а Онсагер обобщил (1931): потоки теплоты и вещества при небольших отклонениях от термодинамического равновесия могут быть выражены как линейные функции градиентов температур и химических потенциалов различных компонентов системы.

Принцип линейности Онсагера утверждает: потоки вызываются обобщенными термодинамическими силами (градиенты температуры или концентрации — простейшие примеры термодинамических сил). Термодинамические уравнения движения связывают термодинамические обобщенные силы (градиенты величин) с соответствующими потоками. Законы Фика (для диффузии) и Фурье (для теплопроводности) имеют похожий вид и определяются соответственно градиентами концентрации и теплоты. Этот принцип позволил рассмотреть единым образом все явления переноса. Если в системе имеются флуктуации, то линейный закон приобретает более общее значение.

Принцип микроскопической обратимости Онсагер применил к флуктуациям, считая макроскопическим характер их затухания. Он пришел к выводу о равенстве средних скоростей в прямом и обратном направлениях, а потом и к соотношениям взаимности между коэффициентами. На основе его теории в 40—50-е гг. XX в. разрабатывались проблема разделения изотопов методом термодиффузии, вопросы физики плазмы, биологии и др.

На выводе уравнений для **скорости изменения энтропии** развивалось другое направление термодинамики необратимых процессов. Австрийские ученые Яуманн и Лор получили **уравнение непрерывности энтропии**, обобщив (1911) подход, развитый в 1874 г. Умовым для потока энергии. Уравнение содержало член, отвечающий за скорость возникновения энтропии. Баланс в том, что изменение энтропии в некотором объеме приравнивалось сумме производства энтропий — воспроизведенной и привнесенной в данный объем. Исследование открытых систем возможно на основе только термодинамики необратимых процессов: в них энтропия может возникать и переноситься, тогда как возрастание энтропии пригодно только для изолированных систем.

В гигантской фабрике естественных процессов принцип энтропии занимает место директора, который предписывает вид и порядок исполнения всех сделок. Закон сохранения энергии играет роль бухгалтера, который приводит в равновесие дебет и кредит. Для биологических систем, принципиально открытых, такой подход оказался очень плодотворным.

Внутренняя релаксация противостоит процессам, нарушающим равновесие. Для разреженных газов — это процессы столкновений.

164

Если возмущающие процессы менее интенсивны, чем релаксационные, то говорят о **локальном равновесии**, существующем в малом объеме. При этом не обязательно, чтобы в других частях системы состояние было близко к равновесию. Например, газ располагается между неодинаково нагретыми плоскостями. Процесс теплопроводности крайне медленный, газ находится в неравновесном состоянии, а где-то в системе будет малая область с локальным равновесием. Эту идею высказал бельгийский химик И.Пригожин, и она позволила описывать в этой области состояния теми же параметрами, как и при равновесии.

Понятие локального равновесия вводят при медленном изменении внешнего воздействия и для времени, большего характерного времени элементарного релаксационного процесса, формирующего равновесие. Эти условия — из статистического рассмотрения процессов. Принцип локального равновесия ограничивает число систем, доступных термодинамическому рассмотрению. Есть также взаимное влияние друг на друга одновременно происходящих необратимых процессов. Существует **принцип симметрии Кюри**, который в формулировке Вейля гласит: «Если условия, однозначно определяющие какой-либо эффект, обладают некоторой симметрией, то результат их действия не нарушит эту симметрию». Поэтому формально все неравновесные процессы разделяют на **скалярные** (химические реакции), **векторные** (теплопроводность, диффузия) и **тензорные** (вязкое трение). В соответствии с этим принципом величины разных размерностей не могут быть связаны друг с другом. И скалярная величина (химическое сродство) не может вызвать векторный поток (теплопроводность).

Сложные системы в отличие от простых, описываемых несколькими параметрами, состоят из большого числа переменных и большого числа связей между ними. В сложной системе появляется из-за внутренних

взаимодействий много свойств, которых нет у ее частей (*эмерджентные* свойства), они — следствие целостности системы. На пути любой достаточно сложной системы к равновесию, которое характеризуется максимумом энтропии, встречаются обстоятельства, не позволяющие это сделать. В качестве таковых выступают граничные условия. Если они постоянны, например, поддерживают ΔT на границах, то переменные состояния стремятся асимптотически к независимым от времени величинам, достигая квазистационарного или стационарного состояния.

Стационарные состояния в открытых системах австрийский (впоследствии канадский) биолог-теоретик Л. Берталанфи назвал **текущим равновесием**. Он построил теорию биологических организмов на базе обобщений физической химии, кинетики и термодинамики, назвав ее «теорией открытых систем». Берталанфи ввел формальное выражение таких важных свойств

165

системных параметров, как сумма, целостность, организация, рост, конкуренция и т.д., широко применяя аппарат дифференциальных уравнений. Понятие локального, или текущего, равновесия он ввел для живого организма — неравновесной открытой системы. Такие состояния, близкие к равновесным, встречаются в различных областях естествознания.

Рассмотрим *прерывные явления*, моделирующие процессы в различных объектах, — от пленочных биосистем с мембранами до гидродинамических потоков с фильтрацией. Пусть система состоит из двух сосудов, соединенных тонким капилляром, пористой стенкой или проницаемой мембраной, и каждый из сосудов находится в равновесии. Поскольку процессы установления равновесия в каждом из сосудов происходят много быстрее, чем между ними, то к такой системе применимы законы термодинамики необратимых процессов. Если они отличаются температурой T и давлением p , между ними возникнут потоки массы и энергии, которым соответствуют обобщенные силы $X_m \sim p$ и $X_E \sim T$. Фиксируя разницу температур, будем наблюдать за системой. Сначала возникнут потоки энергии и массы, потом появятся и перекрестные эффекты (массоперенос из-за T и теплотперенос из-за p). Поток массы вызовет противодействие, которое будет препятствовать этому потоку. Через некоторое время установится режим, когда поток массы прекратится вовсе, будет только поток энергии, поддерживаемый T . Возникнет *стационарное состояние*, которое неравновесно, так как в системе остаются части с разными силами давления. Это явление названо *термомеханическим эффектом* и проверено опытным путем. В подобных стационарных состояниях характеристики системы не зависят от времени, поэтому постоянна и энтропия S . Но она все время возникает, поскольку потоки и силы в системе отличны от нуля. Полная энтропия будет постоянна только при поступлении в систему извне отрицательной энтропии или негэнтропии, которая компенсирует производство энтропии внутри системы.

Производство энтропии минимально в стационарных неравновесных состояниях: скорость приращения энтропии при двух обобщенных силах X_1 и X_2 , соответствующих потокам I_1 и I_2 , определится суммой $I_1 X_1 + I_2 X_2$. В общем случае скорость возникновения энтропии $\sigma = dS/dt$ определяется $\sigma = \sum I_i X_i$. При равновесии $\sigma = 0$. Когда нет потоков, то энтропия не меняется, и $\sigma = 0$. В стационарном неравновесном состоянии при фиксированной X_1 , соответствующей градиенту температуры, исчезает поток I_2 , связанный с другой силой, т.е. уменьшается сумма или производство энтропии.

Теорема о минимуме производства энтропии в стационарном неравновесном состоянии, сформулированная Пригожиным, отражает внутреннюю устойчивость неравновесных систем, ее своеобразную инерционность. Поэтому, если какие-то граничные условия не позволяют системе прийти в устойчивое равновесие, где $\Delta S = 0$, она придет в состояние с минимальным производством энтропии. Этот вывод годится в случае независимости феноменологических коэффициентов (вязкости, диффузии,

166

теплопроводности) от параметров среды, что справедливо при небольших значениях градиентов и линейных зависимостях между потоками и термодинамическими силами. Устойчивость стационарных состояний с минимальным производством энтропии связана с принципом, сформулированным в 1884 г. Ле Шателье и обобщенным в 1887 г. с точки зрения термодинамики немецким физиком Карлом Брауном.

Принцип Ле Шателье—Брауна означает, что система, выведенная внешним воздействием из состояния с минимальным производством энтропии, стимулирует развитие процессов, направленных на ослабление внешнего воздействия. В самом деле, внешнее воздействие меняет фиксированные термодинамические силы (градиент температур, например), система откликнется на это воздействие изменением потока, связанного с этой силой (потока энергии). Вторая нефиксированная сила (например, градиент концентраций) может испытывать флуктуации. Они увеличат производство энтропии по отношению к ее минимуму в стационарном состоянии. В результате система будет эволюционировать в новое стационарное состояние, в котором изменение потока энергии будет меньше первоначального. В 80-е гг. XX в. принцип был обобщен профессором МГУ Е.В.Ступоченко.

В стационарных неустойчивых состояниях, когда фиксирована одна из термодинамических сил, вторая может испытывать флуктуации. Производство энтропии возрастет, и система может выйти из стационарного состояния. Однако в силу самопроизвольного стремления в состояние с наименьшим производством энтропии она может вновь перейти в стационарное состояние.

Общая теория устойчивости состояний была разработана А.М.Ляпуновым. Эти состояния не теряют своей устойчивости при флуктуациях физических параметров, система за счет внутренних взаимодействий способна погасить возникающие флуктуации. Неустойчивые системы, наоборот, при возникновении флуктуаций способны усиливать их, и в результате такого нарастания амплитуд возмущений система уходит из стационарного состояния. Критерием эволюции при этом является величина $da/dt < 0$, которая указывает направление развития физической системы к устойчивому стационарному состоянию. Процессы, о которых здесь шла речь, происходят достаточно медленно, так что на каждом этапе достигается равновесие.

Функция диссипации — это прирост энтропии за единицу времени в единице объема в открытых системах, а системы, в которых функция диссипации отлична от нуля, названы **диссипативными**. В таких системах энергия упорядоченного движения переходит в энергию неупорядоченного движения и, в конечном счете, в теплоту. Практически все системы являются такими, поскольку трение и прочие силы сопротивления приводят к диссипации энер-

167

гии. Принцип локального равновесия и теорема о минимуме производства энтропии в равновесных состояниях были положены в основу **термодинамики необратимых процессов**.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. В каких единицах измеряют энергию, работу, мощность? Как эти величины связаны между собой и что характеризуют? Каково значение установления механического эквивалента теплоты?
2. Дайте представление о внутренней энергии. Как измерить внутреннюю энергию? В чем смысл первого начала термодинамики?
3. Поясните модель идеального газа. Как он описывается через макро-и микропараметры?
4. Поясните понятие «энтропия». Как энтропия может быть измерена, как можно изменять ее величину? Поясните принцип Больцмана.
5. Поясните смысл второго начала термодинамики. В чем суть споров о «тепловой смерти Вселенной»?
6. Что такое «начала термодинамики», реальный и идеальный циклы работы тепловых машин?
7. Определите понятие «температура» с точки зрения микроструктуры вещества. Как это определение связано с операционным определением?
8. Поясните понятие изолированной, замкнутой и открытой систем. Насколько распространены равновесные состояния? Что такое «функция состояния»? Приведите примеры.
9. В чем состоит принцип Онсагера и каково его значение?
10. В чем состоит принцип Ле Шателье? Как он связан с принципом минимального производства энтропии и каково значение этой связи?

168

Глава 5. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ МАТЕРИИ

5.1. Ограниченность законов классической оптики. Измерение скорости света

Оптика — это учение о физических явлениях, связанных с распространением электромагнитных волн. Длина λ , частота ν и скорость u распространения любой волны в любой среде связаны соотношением $\lambda = u/\nu = uT$, в пустоте $\epsilon = \mu = 1$ и $u = c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Электромагнитное излучение описывается уравнениями Максвелла. Многие явления — дифракция, интерференция, поляризация — можно понять (см. гл. 3) только на основе представлений о поперечных волнах независимо от их электромагнитной природы. Их относят к **волновой оптике**. Часть явлений распространения света может быть объяснена законами отражения и преломления света на границе сред. Они — предмет **геометрической оптики**. Квантовая природа света проявляется тем резче, чем меньше длина его волны. Таков ряд действий света — люминесценция, давление света, фотохимические реакции и др. Свет — это электромагнитное излучение (см. рис. 2.7, в), которое исторически рассматривали в наглядных моделях или как волну, или как поток частиц.

Основную информацию о внешнем мире человек получает через зрение. Свет Солнца — источник жизни на Земле. Видимая часть солнечного излучения занимает участок спектра $(0,38... 0,77) \cdot 10^{-8}$ м (от фиолетового до красного). Оптический диапазон — это инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые лучи, но границы диапазонов нечеткие. Свет пересекает огромные пространства, доставляя нам сведения о Солнце и звездах, и этим он отличается от звука, которому обязательно нужна среда от источника до нашего уха, чтобы быть «услышанным». Тень не отстает от нас при ходьбе, т.е. скорость света много больше скорости нашего передвижения. Если мысленно соединить все точки тени с соответствующими точками предмета, то, продолженные в пространстве, они сойдутся в точке расположения источника света, что свидетельствует о его прямолинейном распространении.

Закон прямолинейного распространения света в однородной среде общепринят, но доказать его достаточно трудно. Евклид построил геометрическую оптику по аналогии с геометрией, считая, что человек видит предметы при помощи «зрительных лучей», исходящих из глаз.

169

Закон отражения от плоских, вогнутых и выпуклых зеркал, сформулированный Евклидом, — это равенство угла отражения углу падения. Легенда о том, что Архимед сжег флот противника с помощью вогнутых зеркал, отражает знание греками в III в. до н. э. свойства вогнутых зеркал давать сходящиеся пучки света (тогда как выпуклые зеркала дают только расходящийся пучок лучей). У Евклида в его «Катоптрике» говорится: «С помощью вогнутых зеркал можно зажечь костер».

Закон преломления света тоже был известен в древности. Так, в комедии Аристофана некто советует должнику расплавить восковую долговую табличку с помощью зажигательного стекла, да и Аристотель рассуждал о кажущемся преломлении палки, частично опущенной в воду.

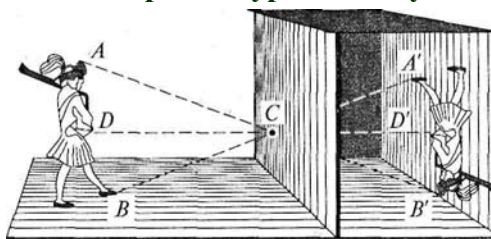
Великий астроном Птолемей интересовался не только геометрической оптикой, но и процессами, лежащими в основе зрения, и связанными с ними оптическими иллюзиями. Он описал прибор для изучения преломления: опустить в воду разграфленный на 360° диск, к центру которого прикреплены две линейки. Когда диск опущен наполовину в воду, линейки установить так, чтобы при взгляде вдоль верхней казалось, что они образуют прямую. Птолемей в преломлении видел причину того, что околополюсные звезды описывают не правильные, а слегка сплюснутые около полюса круги. Положение звезд из-за рефракции нам кажется выше истинного, так что на горизонте бывают видны звезды, которые или еще не взошли, или уже ушли. Арабский ученый Альхазен нарисовал ход лучей в глазу, но не рискнул довести изображение до сетчатки, так как оно переворачивалось, но «никто не видит мир перевернутым!» Он писал: «Зрительный образ получается с помощью пирамиды, вершина которой находится в глазу, а основание — на видимом теле». Альхазен усовершенствовал прибор Птолемея, начал ставить опыты по падению тел и разлагать скорость на две составляющие, после чего заключил, что при переходе света из менее плотного тела в более плотное уменьшается только нормальная составляющая его скорости (Х в.). В XVII в. Кеплер освободил закон преломления от физиологических наслоений, ввел понятие **фокуса зеркал** и продолжил ход луча света до сетчатки. Он построил простую и ясную теорию камеры обскуры (рис. 5.1). Так произошел переход от физиологической оптики к современной геометрической.

Закон преломления был открыт экспериментально В.Снеллиусом (1620). Обсуждая его, Декарт использовал аналогию Альхазена с мячом, брошенным на слабую сетку, и уже раскладывал скорости на составляющие. Он записал (1637) закон: *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная*. Ньютоновы корпускулы света объясняли и отражение, и преломление, каждое в

отдельности, но не могли объяснить их одновременное возникновение при падении луча на поверхность: ведь для получения зеркального отражения поверхность должна толкать частицы в одном направлении, а для преломления — в противоположном! Какие же причины «заставляют» поверхность толкать частицы в том или ином направлении? Ньютон для объяснения свето-

170

Рис. 5.1. Камера обскура и ход лучей в ней



вых явлений вынужден был вводить периодически меняющиеся свойства корпускул: Показательно, что большую часть своей «Оптики» он написал в виде вопросов. Ньютон не принимал волновых представлений, не понимал, как можно объяснить прямолинейное распространение волны, и то, что скорость света в преломляющей среде должна быть меньше, чем в пустоте.

Из принципа наименьшего времени распространения света вывел свой закон преломления французский математик П. Ферма. Если скорость света бесконечна, то экстремальным должен быть путь луча. При отказе от бесконечности скорости можно говорить о принципе наименьшего времени, считая скорости света в разных средах различными, но постоянными для каждой среды. Этот закон многие не приняли, так как выходило, что свет наделяется «свободой воли» в выборе своего пути в среде.

Законы геометрической оптики сформулировал Декарт — закон прямолинейного распространения света, прохождение света через прозрачные тела, отражение и рассеяние.

Закон прямолинейного распространения света был известен давно, но свет может и обогнуть небольшое препятствие. Это явление, выходящее за рамки геометрической оптики, первым изучил итальянский физик и астроном Ф. Гримальди и назвал *дифракцией* (1665). В книге Р. Гука «Микрография» описаны цвета тонких пленок и объяснены с точки зрения волновой природы света.

Для Гука свет — быстрое колебательное движение, причем он «распространяется с одинаковой скоростью в однородной среде, откуда необходимо, чтобы каждый импульс или колебание светящегося тела возбуждали сферу, которая непрерывно увеличивалась бы так же, хотя бы и намного быстрее, как волны или круги на поверхности воды расходятся вокруг упавшего камня. Из этого следует, что части этих сфер волнообразно распространяются через однородную сферу, пересекая лучи под прямыми углами». При преломлении могут происходить изменения, а цвет определяется углом падения луча и связан с восприятием на сетчатке глаза. По выражению Г. Юнга, автора *принципа интерференции*, в объяснениях Гуком цветов тонких пленок можно найти зачатки интер-

171

ференционных полос. Х. Гюйгенс из аналогии света со звуком рассматривал свет как распространяющиеся в эфире упругие импульсы — возмущения. Он подчеркивал: «Не нужно представлять себе, что эти волны следуют друг за другом на одинаковых расстояниях».

Принцип Гюйгенса позволял теоретически определить и направление светового луча: «Любая точка, до которой дошло волновое возбуждение, является центром вторичных элементарных сферических волн. Поверхность, огибающая вторичные волны, если во всех ее точках фаза возбуждения одна и та же, есть фронт волны» (см. рис. 3.5). При этом «обратные» элементарные волны, направленные к источнику, не принимаются во внимание как не имеющие физического смысла. Гюйгенс объяснил все известные тогда явления оптики. В дальнейшем этот принцип был дополнен Френелем (принцип Гюйгенса—Френеля). Волновая теория Гюйгенса не получала поддержки еще почти сто лет (только М. В. Ломоносов и Эйлер развивали идеи Гюйгенса). Авторитет Ньютона был столь велик, что его последователи не обращали внимания на поставленные им самим вопросы, выхолащивая содержание его работ и не замечая иных объяснений. Лишь в XIX в. волновая теория получила всеобщее признание. К тому времени на ее основе были объяснены явления интерференции (Т. Юнг, 1801), поляризации и дифракции (О. Френель, 1818), предсказан тонкий эффект конической рефракции (У. Гамильтон, 1832), обнаружено, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе, что противоречило корпускулярной теории (Л. Фуко, 1852).

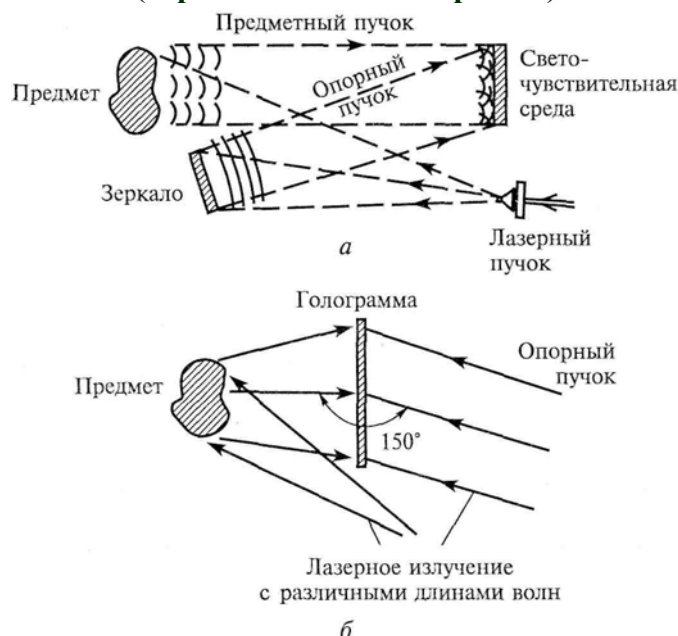
Явления дифракции и интерференции нашли многочисленные применения в прикладной оптике. Дифракция света на краях линз, оправ и диафрагм ограничивает возможности получения точечных изображений. Разработано много разных усовершенствований для увеличения разрешающей силы оптических приборов. Дифракция электромагнитной волны на неправильной плоской или трехмерной структуре ведет к отклонению части потока энергии от первоначального направления или к явлению рассеяния света. При этом интерференции таких отклонившихся пучков не происходит, а эффект рассеяния оказывается

пропорциональным концентрации рассеивающих частиц. Наибольший эффект происходит в мутных средах (туман, дым, взвесь нерастворимых жидкостей), которые детально на опыте исследовал английский физик Дж.Тиндаль, а теорию рассеяния построил Дж. Рэлей.

Английский физик Д. Габор сформулировал идею нового метода фиксирования и последующего восстановления волнового фронта, который получается при рассеянии световой волны (1948). Идея Габора — использовать фотопластинки для регистрации фазы волны (рис. 5.2, *а*). Потом появились конкретные схемы наблюдения, предложенные Ю.Н.Денисюком (1962) (рис. 5.2, *б*), а также

172

Рис. 5.2. Схема получения голограммы: *а* — по методу Габора; *б* — по методу Денисюка (отражательная голограмма)



Лейтом и Упатниксом (1963). С созданием лазеров — мощных источников когерентного излучения — эти методы интенсивно развивались и получили название **голографических** (от греч. *holos* — весь, **полный**), т.е. дающие полную информацию. Объект освещают пучком света от лазера, предварительно уширенным простым оптическим устройством. Рассеянная волна и исходная (опорная), отраженная от зеркала, попадают на фотопластинку, регистрирующую интерференционную картину. Эта пластинка содержит всю информацию об объекте, при ее рассмотрении видна микроструктура интерференции двух волн. Освещая голограмму светом того же лазера, можно изучать восстановленное изображение, которое сохраняет то же распределение освещенности, как и у объекта. При этом каждый участок голограммы способен восстановить изображение всего объекта, но качество изображения при уменьшении площади голограммы снижается. Качественные голограммы требуют использования фотоматериалов с большим разрешением, чем обычные.

Скорость распространения электромагнитных волн — одна из фундаментальных констант. Она приобрела особую роль, когда расшифровали смысл константы *c* в уравнениях Максвелла и в СТО. Свет обладает удивительным свойством: его

173

скорость не зависит от скорости движения источника. Это было установлено опытами А. Майкельсона и стало основным принципом СТО.

Древние считали эту скорость бесконечно большой. Предположение о конечности величины скорости света встречается у Альхазена. Галилей первым поставил вопрос об определении скорости света в своей книге «Беседы...» (1638). По предложению его героя Сальвиати, два человека с фонарями вставали на определенном расстоянии друг от друга и договаривались, что первый открывает фонарь, как только увидит открытым фонарь другого. Сигнал второго вернется к нему через удвоенное время. Возможности так измерить скорость света были почти нулевые, и распространилось мнение, что она бесконечна. Так считали Кеплер и Декарт, хотя Декарт обсуждал возможность проверки этого вывода. Физо провел свой опыт, заменив одного из наблюдателей зеркалом, и определил значение скорости света.

Астроном Жан Доминик Кассини, приглашенный в Парижскую обсерваторию Людовиком XIV, изучая движения спутников Юпитера (1672), отметил некоторое запаздывание в моментах вхождения спутника Ио в конус тени планеты и выхода из нее. Казалось, будто время обращения спутника было больше, когда Юпитер находился дальше от Земли. Датский ученый Оле Ремер объяснил это запаздывание конечностью скорости света.

Ио вращается вокруг Юпитера с постоянным периодом почти в 7 сут, испытывая одно затмение за один оборот. Ремер установил, что затмения происходят на 11 мин раньше срока, если Земля находится на

кратчайшем расстоянии от Юпитера, и опаздывают на 11 мин при наибольшем удалении. Отметив момент вхождения спутника в тень Юпитера при минимальном расстоянии Юпитера от Земли, можно вычислить момент, соответствующий его вхождению в тень примерно через полгода, когда Земля и Юпитер будут находиться на большем расстоянии друг от друга. Значит, запаздывание вызвано конечностью скорости света, поскольку свет должен пройти дополнительный путь (рис. 5.3). Осенью 1676 г. Ремер предсказал запаздывание вхождения спутника в тень на 22 мин (точнее — на 16 мин 36 с; расхождение связано с неточно определенными в то время размерами земной орбиты). Последователи Декарта не поверили результату Ремера, продолжая считать скорость света бесконечной, лишь Кассини и Галлей поддержали его.

Вывод Ремера был подтвержден Дж. Бредлеем, исследователем параллакса звезд. Он обнаружил в 1725 г., что в своей кульминации звезды отклоняются к югу от ожидаемой точки, и объяснил это явление тем, что скорость света складывается с орбитальной скоростью Земли. И **конечность скорости света в пустоте** была признана как факт. Определение скорости света и полученное значение связаны с его прямолинейным распространением.

Но какова **скорость света в преломляющей среде**? Закон преломления имеет вид $\sin i / \sin r = n$, где i и r — углы падения и преломления. По корпускулярной теории показатель преломления должен выражаться так: $n = v_1/v_2$, где v_1 — скорость

174

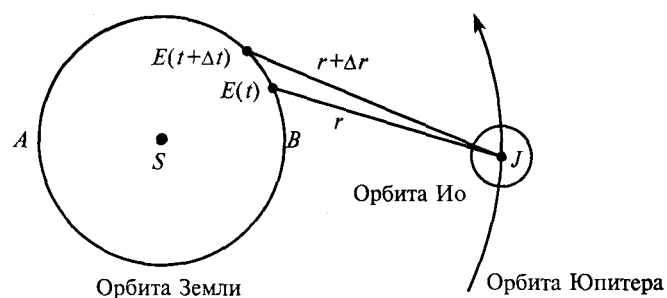
света в первой среде, в которой определяется угол падения, а v_2 — во второй, в которой определяется угол преломления, по волновой теории — обратное отношение скоростей в формуле для показателя преломления среды: $n = v_2/v_1$.

Д.Араго исследовал преломление света, идущего от звезд и от земного источника, в призме, покоящейся относительно Земли, в пределах точности опыта движение Земли не оказывало влияния на преломление света. Френель объяснил это тем, что часть эфира, пронизывающего тела, увлекается при движении Земли. Такое объяснение не всех удовлетворило, и были предприняты новые эксперименты. Первые опыты измерения скорости света на уже известном расстоянии на Земле были проведены Физо с использованием стробоскопа (1849). Их высоко оценили на Международном физическом конгрессе (1900) в Париже: «Это — первостепенное открытие не только по трудности решенной задачи, но также благодаря осуществлению оптической установки, изумительной по тонкости и точности... Создать светящуюся почти микроскопическую точку между зубцами колеса, направить выходящий из нее расходящийся пучок на несколько десятков километров, заставить его там отразиться от зеркала и вернуть к исходной точке — это результат, который был бы признан невозможным, вероятно, даже абсурдным, если бы он был предложен до своей реализации».

Ж.Фуко провел измерения с использованием вращающегося зеркала. Для получения нужного числа оборотов он впервые применил миниатюрную паровую турбину, сконструированную по принципу сирены. В 1862 г. Фуко измерил скорость света в воде и получил результат около $2,23 \cdot 10^8$ м/с (примерно 3/4 с в воздухе). Майкельсон повысил точность измерений скорости света до 3 км/с, или до 0,001 %, за счет увеличения расстояния, и получил, что скорость света в сероуглероде $1,71 \cdot 10^8$ м/с. Показатель преломления сероуглерода $n = 1,63$, скорости света в среде v и в вакууме c связаны соотношением $v = nc$, значит, корпускулярная теория

175

Рис. 5.3. Схема измерения скорости света



света оказалась несостоятельной. Опыты А. Майкельсона (1881) и Э.Морли (1887), связанные с измерением скорости света на Земле, сыграли для СТО такую же роль, как попытки создать вечный двигатель для установления принципа сохранения энергии. Они же служили для измерения абсолютной скорости Земли во Вселенной. Проведенные повторно в 1904 г. опыты вновь убедительно показали отсутствие всяких признаков эфирного ветра — скорость света независимо от направления была одинакова и равна 300 000 км/с.

Постоянство скорости света в пустоте Эйнштейн возвел в ранг естественного закона и поставил его как фундаментальное положение в СТО: скорость света в вакууме есть наибольшая возможная скорость в природе.

Точность определения значения скорости света определяется точностью определения момента выхода и

возвращения сигналов, поэтому важно использовать в этих измерениях быстродействующие оптические затворы. В настоящее время используют «ячейку Керра». Это устройство, носящее имя шотландского физика Джона Керра, отличается быстродействием (скорость срабатывания 10^{-9} — 10^{-12} с), что позволяет делать измерения на лабораторном столе. В 1967 г. с помощью He-Ne-лазера, используемого в качестве источника света, получено значение скорости света ($299\,792,5 \pm 0,15$) км/с.

5.2. Волновые свойства света. Спектр электромагнитного излучения

Двойное лучепреломление — явление в некоторых кристаллических веществах, когда при расщеплении луча света на два появлялись два изображения вместо одного. Это явление впервые отметил Бартолиниус в 1669 г. в кристалле карбоната кальция (или исландского шпата). Получалось, будто этот кристалл имеет два показателя преломления: одна часть света преломляется по одному закону, другая по другому. Но измерения показали, что один из лучей вообще не подчиняется закону преломления — при нулевом угле падения угол преломления отличен от нуля. Этот луч называли «необыкновенным», а второй, удовлетворяющий закону Снеллиуса, — «обыкновенным».

По Ньютону, «каждый луч света имеет противоположные стороны, наделенные неким свойством, от которого зависит необыкновенное преломление, и другие, не обладающие этим свойством». По аналогии с магнитом можно сказать, что Ньютону пришлось считать, что корпускулы поляризованы. Но ни Ньютон, ни Гюйгенс не предполагали, что свет можно представить поперечными колебаниями.

176

Явления двойного лучепреломления и поляризации света с волновой точки зрения объяснил Френель (1821), с корпускулярной — пытались объяснить Био и Лаплас, их поддерживали Пуассон и шотландский физик Брюстер, известный изобретением калейдоскопа (1817). Но они не могли объяснить явление дифракции и одновременное отражение и преломление света поверхностью, как и Ньютон. Френель описывал дифракцию и интерференцию с помощью принципа Гюйгенса (см. гл. 3). В опыте с двумя зеркалами, расположенными под углом, он получал с помощью одного источника два мнимых и всегда когерентных (от лат. *cohaerentia* — сцепление, связь) источника света. По его теории дифракции получалось, что внутри тени от непрозрачного диска должно быть светлое пятно. На замечание Пуассона, что это противоречит здравому смыслу, Френель ответил, что здравый смысл подчас ошибается, и продемонстрировал светлое пятно внутри тени.

Волновая теория должна объяснить и явление интерференции. Т.Юнг, поставив опыт с двумя щелями (1807), заключил, что две волны могут интерферировать, если они когерентны, и показал, что все части фронта волны, выходящей из малого отверстия, можно рассматривать как почти когерентные. Исследованием интерференции поляризованных волн занялись Френель с Араго. Они установили, что два луча, поляризованные в параллельных плоскостях, интерферируют, а в перпендикулярных — нет. Аналогии с акустикой тут не могло быть. Френель предположил, что световые волны поперечны, так как явление поляризации свойственно лишь поперечным волнам. Но тогда тончайший и невесомый эфир должен быть твердым, так как поперечные волны распространяются лишь в твердых телах. Гипотеза была столь смелой, что Араго отказался подписаться под статьей, в которой она излагалась. И Френель один строил теорию.

Френелем создана **механическая модель света**. Он считал, что скорость распространения колебаний в среде зависит от длины волны, и при определенной длине волны она тем меньше, чем больше преломление среды. Отсюда — преломление света и дисперсия. Все явления поляризации в теории Френеля представляли частный случай закона сложения скоростей и прекрасно соответствовали эксперименту. Исследование двойного лучепреломления привело к анализу сил, возникающих в упругой среде из-за малых молекулярных перемещений. Это дало основную идею для развития *теории упругости*, созданной математиками Коши, Гринном, Пуассоном и Г. Ламе. Упругий эфир не увлекается движущимися телами, а проходит сквозь них, и коэффициент преломления определяется, по Френелю, как квадратный корень из отношения плотности эфира в веществе к его плотности вне вещества. По аналогии с электрическими и магнитными полюсами Малюс на-

177

звал явление поляризацией света (стороны света — его полюса). Проблема увлечения эфира при движении в нем тел долгое время находилась в центре всех проблем понимания процессов во Вселенной.

Явление *абберации* (от лат. *aberratio* — уклонение), когда координаты всех звезд в течение года смещаются и описывают эллипсы разной вытянутости в зависимости от углового расстояния до плоскости эклиптики, было открыто английским астрономом Дж.Брадлеем (1728) и объяснялось согласно эмиссионной теории света движением Земли по орбите. С принятием волновой теории требовалось ввести гипотезу о покоящемся эфире, проходящем сквозь движущиеся тела. Френель принял, что меняется не упругость эфира, а его плотность. В 1823 г. на основе закона сохранения энергии и своей гипотезы он объяснил, что движение, параллельное границе раздела, в обеих волнах одинаково, и вывел все формулы физической оптики. При полном отражении света он использовал мнимые величины, что соответствовало изменению фазы в отраженной волне.

Итак, начало современной физической оптике положил Френель, она основана на представлении о свете как о поперечной, электромагнитной волне.

В **электронной теории** Г. Лоренц синтезировал идеи теории поля и атомистики. Он обобщил формулу Френеля для показателя преломления света, выражающегося через отношение скоростей света в средах, для

частично увлеченного телом эфира. Эта скорость в движущемся теле получалась равной $v = v_0 + (1 - 1/n)u$, где v_0 — скорость света в покоем теле, u — скорость движения тела, $1 - 1/n$ — коэффициент увлечения, введенный Френелем в теории абберрации и подтвержденный опытами Физо, Майкельсона и Морли. Проблема увлечения эфира движением, проблема его странных свойств привели к отказу от эфира и созданию специальной теории относительности.

Спектр — это совокупность значений какой-либо величины, характеризующей систему или процесс. В физике используют частотный спектр колебаний — электромагнитных или акустических. Спектр энергий, импульсов или масс также широко распространен. Он может быть дискретным или непрерывным (сплошным). Спектр электромагнитных колебаний сплошной.

Электромагнитные волны длиной от 10 до 100 м зарегистрировал Г. Герц с помощью искрового разряда. Он сконструировал передатчик (так называемый диполь Герца), в котором между шариками проскакивала искра. Но искра — высокочастотный разряд переменного тока, и в промежутке между шариками устанавливалось переменное электрическое поле. Герц исследовал свойства поля — прямолинейность распространения, отражение, преломление возникающих волн, скорость, которая была равна ско-

178
рости света. Эксперименты показали, что волны могут быть и других частот, что определится способом возбуждения колебательного движения электрических зарядов разных частот.

Предположения о связи теплового излучения и света высказывались давно. Юнг отметил, что «тепловые колебания происходят медленнее световых». И.Ламберт показал, что тепловые лучи распространяются тоже прямолинейно. Шведский химик К.Шееле установил, что они проходят через вещество, но отражаются от зеркал. Швейцарский химик А. Питке использовал два вогнутых сферических металлических зеркала. Он помещал в фокусе одного зеркала тело нагретое или охлажденное, а в фокусе другого — термометр, и обнаруживал изменение показаний термометра. Его соотечественник П. Прево построил на этом теории «равновесия огня», считая, что оно достигается при «равновесии обменов, произведенных путем излучения». Рассуждения Прево о дискретной природе «лучистого теплорода» оказались плодотворными в электронной теории металлов, в физической и химической кинетике, в законах теплового излучения. Введенное им понятие *подвижного равновесия* позволило понять многие процессы природы. Так, стало понятно, что лучеиспускание и лучепоглощение протекают одновременно и независимо друг от друга, а температура только отражает связь между этими процессами. Спустя век эти идеи «проросли» в законах теплового излучения Кирхгофа, Стефана — Больцмана, способствовали идее Планка о введении кванта действия.

Инфракрасное излучение открыл У. Гершель, исследуя равномерность распределения теплоты по солнечному спектру (1800). Перемещая термометр вдоль спектра, он обнаружил, что максимум температуры приходится на область далее красного края видимого излучения (отсюда и название). Сравнив солнечное излучение с излучением нагретого, но не светящегося цилиндра, Гершель показал преломление невидимого теплового излучения в линзах. Юнг назвал это открытие Гершеля самым крупным открытием со времен Ньютона. Итальянский экспериментатор М.Меллони установил, что эти невидимые лучи ведут себя так же, как и свет, и приступил к изучению поглощательной и излучательной способностей разных тел. Его работы в этой области продолжил Дж.Тиндаль, обнаружив сильное поглощение тепловых лучей водяным паром, что оказалось важным для метеорологии. С помощью нового прибора — болометра, созданного после работ Меллони, было установлено, что максимум солнечной теплоты приходится скорее на оранжевую область спектра, а не на инфракрасную, что инфракрасное излучение достаточно легко проходит через земную атмосферу и т.д.

Ультрафиолетовое излучение (УФ), преломляемое призмой сильнее фиолетового, открыл немецкий физик И.Риттер. Решив в 1802 г. повторить опыты Гершеля, он исследовал химическое действие разных участков спектра солнечного света. С помощью хлористого серебра он обнаружил, что химическое действие света

179
усиливается при перемещении в область более коротких волн и становится максимальным за сине-фиолетовой областью. Новые открытия способствовали появлению фотографии. Через год после сообщения Дагера о получении им изображений на металле (1839) Дрейпер сфотографировал Луну, а в 1842 г. — фраунгоферовы линии, что дало возможность создать более полную картину о составе земной и солнечной атмосфер.

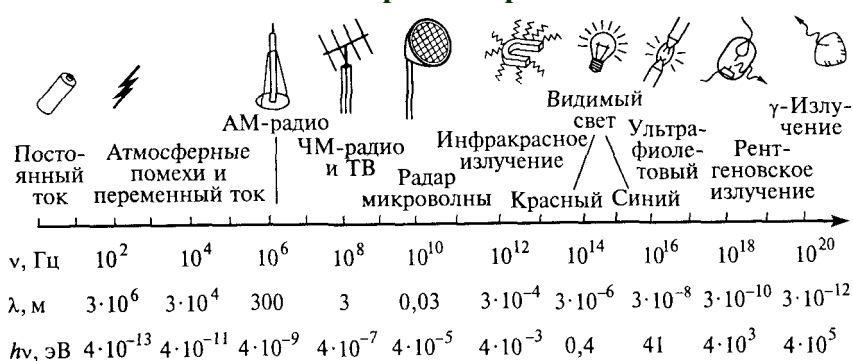
Электромагнитные волны с частотами до 10^{12} Гц получают электронными методами. В диапазоне радиоволн работают радиовещание, телевидение, воздушная и морская связь, любительские радиостанции. Радиолокация использует микроволновый диапазон.

Частоты **рентгеновского излучения** лежат выше УФ-диапазона. В. К. Рентген приступил к изучению катодных лучей, чтобы доказать их волновую природу. Но он заметил, что фотопластинки, находившиеся вблизи разрядной трубки и защищенные черной бумагой, оказались засвеченными. Это не могло быть действием катодных лучей, поскольку они не могли выйти наружу. При замене бумаги черным картоном какое-то излучение все равно проходило, хотя его проникаемость убывала с увеличением толщины защитного материала. «Если держать руку между разрядной трубкой и экраном, то видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний руки», — напишет Рентген в 1895 г. Это было первое в мире рентгеноскопическое исследование.

Новое излучение, которое Рентген назвал X-лучами, не преломлялось, не испытывало отражения, не фокусировалось линзами и распространялось прямолинейно. Как и катодные, X-лучи вызывали флуоресценцию, но не отклонялись магнитным полем; они возникали в точке, куда попадали катодные лучи. Рентген активно распространял информацию об X-лучах; их стали применять в медицине и хирургии, хотя тогда экспозиция занимала почти 20 мин. За свое открытие Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике (1901). В 1899 г. нидерландские физики Г. Хага и К. Х. Винд, обнаружив слабую дифракцию X-лучей при пропускании через узкую щель, оценили длину их волны в 10^{-10} м. Рентгеновское излучение — поперечная волна — доказал, установив поляризацию лучей (1904), английский физик Ч. Баркла. Ученик Планка М.Лауэ решил использовать атомы в кристаллической решетке твердого тела в качестве щели для наблюдения за явлением дифракции. Он рассчитал многие их свойства и поставил эксперимент, в котором определил длину волны излучения. Она была в 1000 раз меньше средней длины видимого света. Опыты по рассеянию рентгеновских лучей на пространственных решетках кристаллов доказали их волновую природу и гипотезу о строении кристаллов французского кристаллографа О. Браве. Русский кристаллограф Г. В. Вульф и У. Брэгг-сын, независимо друг от друга, расшифровав дифракционную картину, дали формулу,

180

Рис. 5.4. Схема спектра электромагнитных волн



связывающую длину волны и период кристаллической решетки (условие Вульфа — Брэгга).

Обычно рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр и возникает при резком соударении пучка быстрых электронов с мишенью. Ч. Баркла открыл характеристическое рентгеновское излучение, возникающее только при очень высоком напряжении и имеющее узкий спектр определенной длины волны, который зависит от вещества мишени (1906). После создания Н. Бором модели атома это излучение стали объяснять квантовыми переходами электронов с внешних оболочек атома на внутренние. Открытие Баркла положило начало рентгеноструктурной спектроскопии.

С переходами атомов из возбужденного состояния связаны все рассмотренные типы волн — от оптического излучения до рентгеновского. Верхний предел, который могут генерировать атомные системы, составляет 10^{20} Гц. Излучение более высоких частот — γ -излучение — испускается атомными ядрами. Различные области спектра электромагнитного излучения исследованы многими методами, имеют неодинаковые названия и источники, но все имеют единую природу, отличаясь только частотами (рис. 5.4).

5.3. Явление дисперсии сред и доказательство материального единства мира

Дисперсией называется зависимость фазовой скорости гармонических волн в среде от частоты их колебаний (от лат. *dispersus* — **рассеянный**, рассыпанный). Все среды обладают дисперсией — зависимостью показателя преломления волн n от частоты ω (кроме абсолютного вакуума). Обычно n растет с увеличением ω , но бывает и наоборот, тогда дисперсию называют **аномальной**. Дисперсия искажает форму сигнала при распространении в среде.

181

Дисперсия света наблюдается в виде разветвления света в спектр, например при прохождении его через призму. Ньютон провел много опытов с призмой, восхищаясь яркими цветами спектра. Он выделил диафрагмой зеленый луч и направил его на другую призму, но луч уже не разложился на составляющие. Такие лучи Ньютон назвал **монохроматическими** (от греч. *monochromatos* — **одноцветный**). Отклонение, вызываемое призмой, зависит от угла между гранями, через которые проходит свет, от направления луча, падающего на первую грань, от показателя преломления призмы. Кроме того, показатель преломления может зависеть от частоты света и сорта стекла.

Наблюдения за затмениями двойных звезд показывают, что межзвездное пространство не обладает дисперсией. Еще Араго при наблюдениях за двойной звездой Альголь — глаз Медузы из созвездия Персея (для земного наблюдателя глаз Медузы моргает) — отметил, что разность между скоростями красных и синих лучей во всяком случае не может превышать 10^{-5} скорости света. Конечно, этот вывод соответствует точности экспериментов. В последнее время наблюдения за пульсарами показали, что современные радиоприемные устройства позволяют обнаружить наличие

дисперсии межзвездного пространства в радиодиапазоне.

Теория поля и атомистические представления необходимы для понимания дисперсии, которая возникает в результате вынужденных колебаний заряженных частиц в веществе под действием переменного поля электромагнитной волны. Расчеты Лоренца были построены на основе классической теории колебаний атомов и молекул вещества. Такая электронная теория годится для объяснения дисперсии в газах, а в более сложных средах приходится учитывать взаимодействия внутри среды, и здесь нужна квантовая механика.

Большой вклад в изучение дисперсии и создание **ахроматических** (от греч. *achromatos* — **бесцветный**) линз внес немецкий физик Й. Фраунгофер — владелец крупнейшей в мире оптической фирмы. Используя для изучения дисперсии света в призмах свечу и лампу, он обнаружил желтую линию в спектре (*D*-линия натрия) и заметил, что она находится всегда в одном и том же месте спектра и потому удобна для измерений показателя преломления. В 1815 г. Фраунгофер обратился к изучению спектра Солнца, которым ранее занимался У. Волластон. Пропуская солнечный свет через щель в камере обскуре и призму, Волластон выделил в спектре Солнца семь линий (которые он посчитал разграничителями областей спектра). У Фраунгофера таких линий оказалось много. Он обозначил их латинскими буквами и обратил внимание на то, что *D*-линия находится в том же положении, что и яркая линия натрия в спектре лампы. Когда Фраунгофер направил свой спектроскоп на Венеру, то обнаружил такие же темные линии, что и на Солнце.

В 1857 г. Г. Кирхгоф и Р. Бунзен, решив выяснить, какая же связь между *D*-линией на Солнце и яркой желтой линией в спектре лампы, обнаружили, что все фраунгоферовы линии поглоще-

182

ния в спектре Солнца совпадают с линиями испускания некоторых газов и паров. Кирхгоф расценил это как доказательство того, что материя и вне Земли представлена теми же элементами.

Для получения спектров Фраунгофер начал изготавливать также дифракционные решетки. Он наносил алмазом параллельные штрихи на стеклянные пластинки или изготовлял их из тончайших близко расположенных нитей, что требовало большого искусства, — их число на 1 мм доходило до 300. Этот результат был превзойден только в 1883 г. Г. Роуландом — 800 штрихов (сейчас — до 1800 штрихов). Если в темной камере на такую пластинку направить тонкий пучок света, то на белом экране образуется спектр.

Спектры стали интенсивно исследовать Д. Брюстер, У. Гершель и У. Тольбот. При этих исследованиях Гершель открыл инфракрасное излучение, а Брюстер — закон поляризации отраженного луча: она максимальна, если отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. Они также сформулировали основные идеи качественного спектрального анализа.

Изобретенная Бунзеном горелка (1855) давала несветящееся высокотемпературное пламя, что позволяло переводить разные химические вещества в парообразное состояние и наблюдать их спектры. Занимаясь спектрами в 1854—1859 гг., Бунзен и Кирхгоф экспериментальным путем получили правило (закон Кирхгофа) о поглощении газами волн точно такой же длины, какой они могут излучать. При исследовании земных источников излучения они открыли два новых металла, названных по характерным для них красной и голубой линиям спектра рубидием и цезием (1861). Затем У. Крукс открыл таллий (1865), Ф. Райх и И. Рихтер — индий.

Кирхгоф объяснил происхождение фраунгоферовых линий как линий поглощения атмосферы. По выражению Гельмгольца, это открытие вызвало восхищение всех людей и возбудило их фантазию в большей мере, чем какое-либо другое, поскольку позволило заглянуть в недоступные ранее миры. Видимая поверхность Солнца ($T = 6000$ К) дает сплошной непрерывный спектр. Над ней расположены менее плотные слои фотосферы ($T = 4000$ К). Атомы газов, расположенные в более холодных областях, создают в сплошном спектре линии поглощения. Во время полного солнечного затмения до наблюдателя на Земле доходит свет, излучаемый только атмосферой Солнца, и сплошной спектр исчезает. В это время остаются только фраунгоферовы линии, при этом они из темных становятся светлыми (закон Кирхгофа).

Каталоги спектральных линий всех элементов (длины волн линий и их относительные интенсивности) были составлены уже после Кирхгофа и Бунзена. Спектры несут в себе информацию не только о качественном составе исследуемого тела, но и об условиях, в которых происходит излучение. Особое значение для развития науки имело обоснование **спектрального анализа**, прове-

183

денного Кирхгофом, которое привело его к открытию закона теплового излучения, связавшего оптику и термодинамику.

Идея о связи спектров со строением атома формировалась в научном сознании постепенно. В 1885 г. И. Бальмер обнаружил закономерности в спектральных линиях водорода, а И. Ридберг предложил формулу, описывающую спектральную линию любого элемента. Ридберг отмечал, что из исследования спектров можно получить информацию о внутренних движениях в атомах. Он ввел понятие **спектральных термов**, которые вместе с его формулой, обобщенной Ритцем в принцип Ридберга—Ритца, стали основой для построения теории атома Бора.

Изменение спектров в разных условиях было детально изучено в электрическом (**эффект Штарка**) и магнитном (**эффект Зеемана**) полях. Оно приводит к расщеплению спектральных линий при разных температурах и давлениях (уширение спектральных линий) и т.д. В спектрах проявляется и эффект Доплера. Во-первых, тепловое движение излучающих частиц приводит к тому, что каждый атом излучает на частоте, смещенной из-за эффекта Доплера. При этом наблюдается уширение спектральных линий. Во-вторых, эффект проявляется при движении всего излучающего тела относительно наблюдателя. Так, во время солнечного

затмения видно, как диск Луны постепенно закрывает Солнце и возникает узкий серп из восточного края диска Солнца. На спектрограмме, полученной из этого края, фраунгоферовы линии смещены к фиолетовому краю спектра. В конце затмения возникает серп от западного края диска, и линии смещены в красную сторону. В обоих случаях параметр смещения $\Delta\lambda/\lambda$ одинаков и равен $6,7 \cdot 10^{-6}$. Это смещение объясняется вращением Солнца. По наблюдениям солнечных пятен установлено, что экваториальный пояс Солнца вращается с периодом 25 суток. Так как радиус Солнца равен $7 \cdot 10^8$ м, скорость его вращения равна примерно $2 \cdot 10^3$ м/с, и ее отношение к параметру смещения линий составляет $3 \cdot 10^8$, т.е. это отношение равно скорости света. Вращение Солнца с запада на восток приводит к тому, что восточный край движется к наблюдателю, а западный — от него. В 1848 г. А.Физо указал на возможность определения лучевых скоростей звезд с помощью эффекта Доплера, и этот метод широко применяется в астрономии. Величайшим открытием XX в. явилось обнаружение красного смещения линий в спектрах далеких галактик, объясняемого расширением Вселенной.

Спектроскопия — наука, основанная на изучении спектров электромагнитного излучения. В зависимости от диапазона длин волн различают радиоспектроскопию, инфракрасную, оптическую, ультрафиолетовую, рентгеновскую и гамма-спектроскопию, в каждой — свои методы. Различают спектроскопию и по источникам излучения — твердого тела, атомная, молекулярная. Спектроскопия — основа спектрального анализа, применяемого в химической и пищевой промышленности, металлургии и других областях техники. Так, в мартеновской печи в расплавленной стали различные примеси выгорают постепенно, содержание их су-

184

щественно для качества металла. По эмиссионному спектру можно непрерывно следить за изменением состава металла. Особое значение имеет спектральный анализ в астрофизике. Так, элемент гелий был открыт сначала на Солнце (поэтому так и назван), а на Земле только через 20 лет. С помощью спектрального анализа установили, что Солнце состоит на 70 % из атомов водорода, на 28 % — из атомов гелия и только на 2 % — из других химических элементов. По спектрам Солнца и звезд определяют не только химический состав, но и многие другие характеристики, которые легли в основу классификации *звезд*.

С появлением лазеров возникли новые возможности спектроскопии. Лазерное излучение монохроматично, ширина линии чрезвычайно мала. Появилась возможность работать под широким доплеровским уширением линии и извлекать уникальную информацию о происходящих в излучающих средах процессах. Лазер концентрирует энергию не только в узкий спектральный интервал, но и по интенсивности. Мощное лазерное излучение способно вызвать в среде нелинейные и многофотонные процессы. Была создана новая наука — нелинейная лазерная спектроскопия, которая дала возможность изучать глубинную структуру материи и процессы тонкими и точнейшими методами, не возмущающими исследуемую среду.

5.4. Законы теплового излучения, кризис классической теории и появление квантовой гипотезы

Тепловое излучение — наиболее распространенный в природе вид электромагнитного излучения. Оно совершается за счет энергии теплового движения молекул в веществе, поэтому понижает температуру тела. Наряду с излучением происходит и поглощение теплоты, в результате температура тела поддерживается постоянной. В этом случае говорят, что тело находится в *тепловом равновесии*. Исследуя тепловое излучение, М. Питке и П. Прево заключили, что оно имеет сплошной спектр, а каждое тело излучает теплоту независимо *от* окружающей среды. При сравнении спектров испускания со спектрами поглощения оказалось, что в спектрах поглощения ослаблены или отсутствуют участки, представленные в спектрах испускания. Классическая теория поля не могла объяснить этого.

Модель абсолютно черного тела, поглощающего все падающее на него излучение не отражая, предложил Г. Кирхгоф (1862). Если, например, в ящике с непроницаемыми нагретыми стенками в результате многократных испусканий и поглощений света установится *равновесное* излучение, то это и есть излучение абсолютно черного тела. Излучение черного тела можно наблюдать через небольшое отверстие. Если тело отражает все падающее на него из-

185

лучение, его называют белым. Все реальные тела называют серыми. К излучению черного тела близки поверхности звезд и сажа, а к белому — свежий снег. Интенсивность излучения любого тела может быть определена исходя из излучения черного тела, если известны поглощение и показатель преломления данного тела (1859). Тем самым проблема свелась к исследованию равновесного излучения, и проблема излучения черного тела стала одной из центральных в физике и привела к созданию квантовой теории излучения.

Закон равновесного теплового излучения установил Кирхгоф: отношение испускательной способности тела к поглощательной не зависит от природы излучающего тела, а является функцией от температуры и частоты — *функция Кирхгофа* $K(\nu, T)$. Эта функция универсальна для всех тел. Для абсолютно черного тела она равна его испускательной способности. Он вывел этот закон из второго начала термодинамики и показал, что состояние равновесия единственно и характеризуется вполне определенным распределением плотности энергии излучения, заключенной в этой полости.

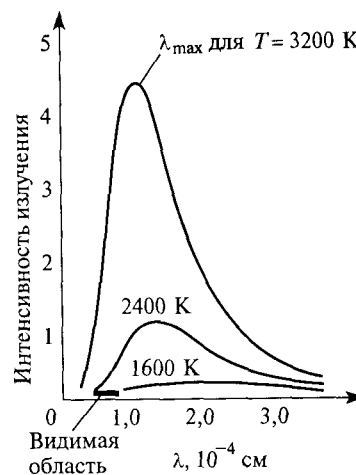
Измерять тепловое излучение нагретых тел начали в конце прошлого века в связи с развитием ламповой промышленности. Лорд Рэлей (У. Стретт) и Дж. Джинс, объясняя явления на основе классической электромагнитной теории, получили, что при распределении энергии излучения по длинам волн на долю длинных волн приходится лишь небольшая часть энергии, но она быстро растет с уменьшением длины волны. Эта зависимость частично совпадала с данными, полученными выдающимися оптиками Луммером и Прингсгеймом, но экспериментальная кривая имела горб, который при повышении температуры поднимался и сдвигался влево. Это означало, что распределение излучаемой энергии имеет максимум на некоторой длине волны, и чем горячее тело, тем дальше максимум сдвигается в видимую область к синему концу спектра.

В 1884 г. Л.Больцман из термодинамического расчета получил, что энергия черного излучения пропорциональна T^4 , а давление — $1/3$ объемной плотности энергии (при оценке на основе классической электродинамики). Так впервые к тепловому излучению применили понятия термодинамики — давление и температуру. Этот расчет подтвердили оценки Дж. Стефана. Закон Стефана—Больцмана говорит о суммарной энергии спектра (рис. 5.5) и имеет вид: $R = \sigma T^4$ где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Проблема распределения энергии в спектрах являлась одной из самых важных задач, стоявших перед наукой. Шаг в ее решении сделал В. Вин, объединив принципы термодинамики и эффект Доплера. В 1893 г. Вин распространил законы и понятия термодинамики (T и S) на тепловое излучение и на следующий год вывел из расчетов для модели абсолютно черного излучения важный закон —

186

Рис. 5.5. Спектры излучения абсолютно черного тела при разных температурах (интенсивность — в относительных единицах)



закон смещения, согласно которому $\lambda = b/T$, где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная Вина.

Максимум излучения должен смещаться в синюю сторону с ростом температуры тела, а по классической теории с уменьшением длины волны энергия должна расти до бесконечности. В 1896 г. Вин из классических представлений получил закон распределения энергии в спектре черного тела, но позже выяснилось, что он справедлив только для коротких длин волн.

Итак, по закону смещения Вина показатель цвета звезды характеризует температуру ее фотосферы. И звезды делят на спектральные классы по цвету (длине волны), чем выделяют диапазоны температур их фотосферы. Так, голубому классу «О» соответствует температура 50 000 — 25 000 К, а желтому — 7000 - 4500 К (см. гл. 9).

Как писал Лауэ, Вин «довел физику непосредственно до ворот квантовой физики, а уже следующий шаг, который предпринял Планк, провел ее через эти ворота». Рэлей считал распределение энергии по степеням свободы системы равномерным, но получил формулу, в которой удельная интенсивность излучения оказалась пропорциональной квадрату частоты и абсолютной температуре (1900). Спектральная плотность росла с частотой, и возникал парадокс — полная плотность энергии черного излучения при всех температурах бесконечна! Для малых частот (инфракрасной области спектра) формула Рэля отвечала эксперименту, но с увеличением частоты она не давала «колоколообразной» зависимости (рис. 5.6).

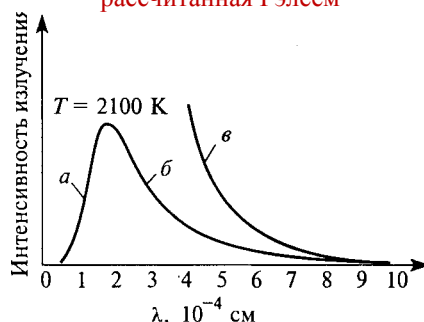
Полная энергия, излучаемая черным телом, получалась у Рэля бесконечной, тогда как закон Стефана—Больцмана показывал пропорциональность четвертой степени температуры. Джинс пытался устранить эти противоречия, используя статистические расчеты для волн в полости, но в 1905 г. вновь пришел к формуле Рэля. Так формула Рэля — Джинса, построенная на фундаменте классической физики, не только оказалась непригодной для всего диапазона длин волн, кроме длинных, она имела катастрофическое значение для всей классической физики.

В то же время при изучении зависимости удельной теплоемкости тел от температуры выяснили, что с понижением температуры уменьшается и удельная теплоемкость, которая не должна за-

187

Рис. 5.6. Ультрафиолетовая катастрофа в теории теплового излучения:

a — экспериментальная зависимость; *б* — зависимость, рассчитанная по закону смещения Вина; *в* — зависимость, рассчитанная Рэлеем



висеть от нее. Эта загадка, связанная с поглощением теплоты, тоже не получала объяснения в рамках классической науки. Многие ученые искали выход из сложившихся противоречий.

Поскольку закон Вина годился только для коротких волн, а формула Рэлея — для длинных, ученик Больцмана М.Планк поставил достаточно скромную цель — получить эмпирическую формулу, которая бы переходила в предельных длинах волн в формулы Рэлея и Вина. Он считал вещество совокупностью электронных осцилляторов, с помощью которых происходит обмен энергией между веществом и излучением. Осциллятор — материальная точка, удерживаемая около своего положения равновесия силой, пропорциональной отклонению от равновесия, а частота его колебаний не зависит от величины амплитуды.

В работе «О поправке к спектральному уравнению Вина» Планк (1900) ввел поправку в теорию Рэлея: интеграл, который становится бесконечным по мере уменьшения длин волн, он заменил суммой элементов, которые сгруппировал так, что сумма оставалась конечной. Он был доволен, что «удачно угадал промежуточную форму». Но, как было выяснено позже, эмпирическая формула Вина противоречит моделям классической физики: в статистической физике есть закон равномерного распределения энергии по степеням свободы — для теплового излучения на каждое независимое электромагнитное колебание внутри черного ящика приходится в среднем энергия kT . Но, может быть, неправильность закона Рэлея возникла из-за того, что при обмене энергией между осцилляторами и излучением высокочастотные осцилляторы играют слишком большую роль, именно из-за этого получается монотонный рост спектральной плотности с увеличением частоты. Для подавления значения осцилляторов с высокой частотой Планк ввел свой знаменитый постулат: вещество не может испускать энергию излучения иначе как конечными порциями, пропорциональными частоте излучения: $E = h\nu$.

Так Планк совершил шаг от формулы Рэлея к эмпирическому закону Вина и огромный скачок в понимании не только микромира, но и всей, в том числе и живой, природы.

Все остальное в работе Планка вполне соответствовало классической физике. Но ему пришлось ввести в расчеты две константы.

188

Одна имела тривиальный смысл, а вторая, названная им квантом действия h , казалась ему «либо фиктивной величиной, и тогда весь вывод закона излучения был в принципе ложным и представлял собой лишь игру в формулы, лишенную смысла», либо h имеет фундаментальный смысл, и закон верен. Но тогда этот закон «означает нечто совершенно новое и неслыханное, что должно произвести переворот в нашем физическом мышлении, основывавшемся со времен Лейбница и Ньютона, открывших дифференциальное исчисление, на гипотезе непрерывности всех причинных соотношений».

Наука XX в. показала, что дело не в объяснении и спасении закона Вина, а энергия при излучении меняется дискретными порциями, скачкообразно. Энергия каждого кванта пропорциональна частоте волны, т.е. цвету излучаемого света: $E = h\nu$. О своем революционном открытии Планк доложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества, его выводы появились в печати под заголовком «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре». Этот день считается днем создания квантовой физики. Поскольку понятие кванта действия послужило в дальнейшем ключом к пониманию всех свойств атомной оболочки и атомного ядра, то этот день можно считать началом всей атомной физики, химии и биологии, началом новой эры в естествознании. Квант выступал, по словам Бройля, как «возмутитель спокойствия», он принуждал к переосмыслению основ науки.

5.5. Открытие электрона и радиоактивности. Рождение представлений о сложном строении атома

Дискретность электрического тока отражена в работах Фарадея по электролизу — один и тот же ток приводит к выделению на электродах разного количества вещества в зависимости от того, какое вещество растворено. При выделении одного моля одновалентного вещества через электролит проходит заряд в 96 500 Кл, а при двухвалентном — заряд удваивается. После определения в конце XIX в. числа Авогадро появилась

возможность оценить величину элементарного электрического заряда. Так как $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов переносят заряд в 96 500 Кл, то на долю одного приходится $1,2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Стало быть, это — мельчайшая порция электричества или «атома электричества». Георг Стоней предложил и назвать этот «атом электричества» электроном.

Как исследования электрических токов в металлах привели к открытию термоэлектричества и закона Ома, в электролитах — к развитию физико-химического атомизма и созданию физической химии, так в газах — к открытию электрона. Работа с токами в газах

189

осложнена трудностями получения разреженной газовой среды. Немецкий механик-стеклодув Г. Гейслер изготавливал для развлечений трубки с разреженным газом, светящимся при пропускании через него электрического тока. В них В. Гиттгофф обнаружил вызывающее флуоресценцию стенок трубки излучение из катода, которое назвали *катодными лучами*. Как установил английский физик У. Крукс, эти лучи распространялись по прямой, отклонялись магнитным полем и оказывали механическое воздействие.

Французский физик Ж. Перрен поместил внутри трубки перед катодом металлический цилиндр с отверстием против катода и обнаружил, что цилиндр заряжается отрицательно. Когда лучи отклонялись магнитным полем и не попадали в цилиндр, он оказывался незаряженным. Через два года Дж. Томсон поместил цилиндр не перед катодом, а сбоку: поднесенный магнит искривлял катодные лучи так, что они попадали в цилиндр и заряжали его отрицательно, но флуоресцирующее пятно на стекле смещалось. Значит, лучи — отрицательно заряженные частицы. Такой измерительный прибор называют электронно-лучевой трубкой высокого вакуума. Под действием силы Лоренца, вызванной магнитным полем, включенным в области конденсатора, светящийся след падения пучка на экране смещается. Так в 1895 г. родилась новая наука — *электроника*.

Действуя одновременно электрическим и магнитным полями и меняя их величину, Томсон подобрал их так, чтобы они компенсировались, катодные лучи не отклонялись, и пятно на стекле не смещалось. Он получил отношение электрического заряда к массе частицы $e/m = 1,3 \cdot 10^{-7}$ Кл/г. Независимо от Томсона это значение измерил для катодных лучей В. Кауфман и получил близкое значение. В 1901 г. он впервые сумел измерить зависимость этой величины от скорости. В более ранних опытах, проведенных им с использованием камеры Вильсона, в которой каждый ион является центром конденсации пара и постепенно становится видимым, было получено значение заряда газообразных ионов $6,5 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. ед. ($1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9$ эл.-ст. ед.). Если принять, что заряд их одинаков, то масса частиц оказывалась очень малой: порядка 10^{-27} г. Томсон назвал эту частицу *корпускулой*, а электроном — только ее заряд, но потом и саму частицу катодных лучей назвали *электроном* (от греч. *elektron* — янтарь).

Открытие электрона, изучение его уникальных свойств стимулировали исследования строения атома. Стали понятны процессы поглощения и испускания энергии веществом; сходства и отличия химических элементов, их химическая активность и инертность; внутренний смысл Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, природа химической связи и механизмы химических реакций; появились совершенно новые приборы, в которых движение электронов играет определяющую роль. Из-

190

менились взгляды на природу материи. С открытия электрона (1897) начался век атомной физики.

Милликен поставил опыт (1909): в пространство между пластинами конденсатора впрыскивалось масло (оно испаряется медленнее воды). Проходя через горлышко пульверизатора, капельки из-за трения наэлектризовывались. В отсутствие электричества они падали медленно и равномерно; сила тяжести уравнивалась силой сопротивления воздуха; если на пластины конденсатора подать разность потенциалов $\Delta\phi$, то $mg = qE = q\Delta\phi/d$, где d — расстояние между пластинами конденсатора. Отсюда и $q = mgd/\Delta\phi$. По этой формуле можно вычислить заряд капельки q из измеренных величин g , d , $\Delta\phi$. Массу капельки определяли по плотности масла и скорости установившегося течения, так как скорость такого течения в вязкой среде зависит от размера тела или капелек. При подаче напряжения движение капелек либо замедлялось, либо ускорялось в зависимости от направления поля. Диаметр капелек измеряли микроскопом. Милликен изучал поведение капелек и при воздействии на них рентгеновскими лучами. Он обнаружил, что заряды на капельках равны целому кратному некоторой основной единицы заряда, т.е. и $q = Ne$, где $N = 1, 2, 3, \dots$. Если существует элементарный электрический заряд, то измеренные величины должны быть равны ему, когда к капле присоединяется один одновалентный ион, или быть в целое число раз больше — при присоединении нескольких ионов. Он измерил величину заряда на капельках масла, глицерина, ртути и получил

$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, что совпадало с полученным значением по исследованию электролиза. Так определили удельный заряд электрона —

$1,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, и значит, $m = 9,107 \cdot 10^{-31}$ кг, т.е. масса электрона в 1840 раз меньше массы атома водорода. Эта единица заряда фундаментальна и равна: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Примерно в это время такие же результаты получил и один из создателей русской физической школы А. Ф. Иоффе. Только вместо заряда, захваченного каплей, он измерял заряд металлической пылинки во внешнем фотоэффекте. Обнаружение электронов в радиоактивном излучении указывало на фундаментальность этих

частиц. Итак, электричество имеет, как и вещество, дискретную структуру, причем во всех явлениях атомы отрицательного электричества имеют одинаковые массу и заряд. Магнитное поле катодных лучей обнаружил и измерил в 1913 г. А. И. Иоффе.

Из многочисленных опытов с пропусканием электронов через вещество Дж. Томсон заключил, что число электронов в атоме связано с величиной атомной массы. Но в нормальном состоянии атом должен быть электрически нейтрален, поскольку нейтрально вещество, состоящее из атомов, и поэтому в каждом атоме количества зарядов разных знаков равны. Поскольку масса электрона составляет примерно 1/2000 массы атома водорода, то масса положи-

191

тельного заряда должна быть в 2000 раз больше массы электрона. Например, у водорода почти вся масса связана с положительным зарядом. С открытием электрона сразу же появились новые проблемы. Атом нейтрален, значит, в нем должны быть другие частицы с положительным зарядом. Они еще не были открыты.

Французский физик А. Беккерель, исследуя люминесценцию, открыл (1896) явление радиоактивности. Его интересовала связь флуоресценции от катодных лучей на стенках трубки и рентгеновские лучи, испускаемые от этой части трубки. Облучая различные вещества, он пытался выяснить, могут ли рентгеновские лучи испускаться фосфоресцирующими телами, облученными солнечным светом. Соли урана (в отличие от других веществ) вызывали почернение фотопластинки и без солнечного облучения. Излучение урана ионизировало воздух, как и рентгеновское. Вскоре им занялись супруги Кюри и открыли более активный элемент, который назвали полонием в честь Польши — родины Марии Кюри. Измеряя величину эффекта, Склодовская-Кюри открыла новый элемент — радий, а сам эффект излучения назвала *радиоактивностью* (от лат. *radio* — испускаю лучи). Интенсивность излучения радия в сотни тысяч раз больше, чем у урана. Затем был открыт третий радиоактивный элемент — актиний. И произошел некий «бум» в изучении радиоактивности.

К концу 1899 г. сотрудник Дж. Томсона Э. Резерфорд заключил: «...опыты показывают, что излучение урана является сложным и состоит по крайней мере из двух различных видов: одно, быстро поглощаемое, назовем его α -излучением; другое, более проникающее, назовем его β -излучением». Через три года П. Вийяр нашел еще одну компоненту излучения, которая не отклонялась магнитным полем, ее называли γ -лучами. Беккерель, супруги Кюри и Кауфман исследовали свойства выделенных излучений. Непрерывное выделение теплоты радиоактивными веществами породило проблему происхождения этой энергии — получалось, что 1 г радия выделяет почти 420 Дж за 1 ч. Остроту проблеме придавали представления классической науки, казавшиеся незыблемыми, — постоянство массы, атомное строение материи, неизменность атомов, сохранение энергии. Радиоактивность быстро находила применение в естествознании и медицине. Но уже в своей Нобелевской речи (1903) Пьер Кюри высказал опасение: «В преступных руках радий может стать весьма опасным, и мы можем задать себе вопрос, выигрывает ли человечество от знания секретов природы, достаточно ли оно созрело, чтобы пользоваться ими, не принесет ли ему вред это знание. Пример открытия Нобеля весьма характерен». Этому опасению уже 100 лет.

Атом переставал считаться неделимым. Идея о строении всех атомов из атомов водорода была высказана еще в 1815 г. английским врачом У. Праутом. Сомнения о неделимости атомов поро-

192

дили открытие спектрального анализа и Периодической системы химических элементов. Получалось, что сам атом — это сложная структура с внутренними движениями составных частей, ответственных за характерные спектры. Стали появляться и модели его строения.

Модель атома — положительный заряд распределен в положительно заряженной достаточно большой области (возможно, сферической формы), а электроны вкраплены в него, как «изюм в пудинг» — в 1902 г. предложил Кельвин. Дж. Томсон развил его идею: атом — капля пудинга положительно заряженной материи, внутри которой распределены электроны, находящиеся в состоянии колебательного процесса. Из-за этих колебаний атомы и излучают электромагнитную энергию; так он смог объяснить дисперсию света, но возникло и много вопросов. Для объяснения Периодической системы химических элементов он исследовал разные конфигурации электронов, предполагая, что устойчивым конфигурациям соответствует устройство неактивных элементов типа благородных газов, а неустойчивым — более активных. По длинам волн испускаемого атомами света Томсон оценил область, занимаемую таким атомом, — около 10^{-10} м. Он делал очень много предположений, увлекшись расчетом характеристик излучения по теории Максвелла, так как считал, что внутри атома действуют только электромагнитные силы. В 1903 г. Томсон получил, что электроны при движении должны излучать эллиптические волны, в 1904 г. — что при числе электронов более 8 они должны располагаться кольцами и число их в каждом кольце уменьшаться с уменьшением радиуса кольца. Число электронов не позволяет быть устойчивыми радиоактивным атомам, они выбрасывают α -частицы, и устанавливается новая структура атома. Эксперимент Э. Резерфорда, одного из учеников Томсона, привел к ядерной модели строения атома.

Открытия конца XIX в. — рентгеновских лучей (1895), естественной радиоактивности (Беккерель, 1896), электрона (Дж. Томсон, 1897), радия (Пьер и Мария Кюри, 1898), квантового характера излучения (Планк, 1900) были началом революции в науке.

5.6. Планетарная модель строения атома. Современная наука и постулаты Бора

Австрийский физик А. Гааз (1910) применил к модели Томсона квантовые идеи Планка: $E = h\nu$. Но из-за неточности используемых в оценках величин получил значение константы Ридберга, большее в 8 раз, чем полученное впоследствии Бором. Его работу, представленную в виде диссертации, посчитали слишком наивной «карнавальной шуткой» и «провалили». Но стало понятно, что число электронов в атоме должно быть

193

пропорционально атомному весу, хотя из данных по рассеянию рентгеновских лучей в легких атомах следовало, что это число в два раза меньше, а по другим опытным данным — вдвое больше. Данные о положительном заряде были не менее противоречивы: испускание α -частиц свидетельствовало о том, что они находятся внутри радиоактивных атомов. Теория модели атома Томсона (он работал над ней почти 15 лет), основанная на классических законах электричества, не устояла перед опытной проверкой и критикой.

Планетарную модель строения атома первым предложил Ж. Перрен, пытаясь объяснить наблюдаемые свойства орбитальным движением электронов. Но В. Вин посчитал ее несостоятельной. Во-первых, электрон при вращении согласно классической электродинамике должен непрерывно излучать энергию и, в конце концов, упасть на ядро. Во-вторых, из-за непрерывной потери энергии излучение атома должно иметь непрерывный спектр, а наблюдается линейчатый спектр.

Опыты по прохождению α -частиц через тонкие пластинки из золота и других металлов провели сотрудники Э.Резерфорда Э.Марсден и Х.Гейгер (1908). Они обнаружили, что почти все частицы проходят через пластинку свободно, и только 1/10 000 из них испытывает сильное отклонение — до 150° . Модель Томсона это не могла объяснить, но Резерфорд, его бывший ассистент, сделал оценки доли отклонений и пришел к планетарной модели: положительный заряд сосредоточен в объеме порядка 10^{-15} со значительной массой.

Считая орбиты электронов в атоме закрепленными, Томсон в 1913 г. тоже пришел к планетарной модели строения атома. Но, решая задачу на устойчивость такого атома с использованием закона Кулона, он нашел устойчивую орбиту лишь для одного электрона. Ни Томсон, ни Резерфорд не могли объяснить испускание ос-частиц при радиоактивном распаде — выходило, что в центре атома должны быть и электроны?! Об этом говорила и М.Склодовская-Кюри. Резерфорд принял это, но ему пришлось приписать электронам функцию склеивания ядер, чтобы кулоновское отталкивание не развалило ядро. Эти модели не позволяли получить количественные результаты, соответствующие опытам. В 1913 г. придали вес модели Резерфорда некоторые опытные данные по радиоактивным явлениям. Его ассистент Г.Мозли измерил частоту спектральных линий ряда атомов Периодической системы и установил, что «атому присуща некая характерная величина, которая регулярно увеличивается при переходе от атома к атому. Это количество не может быть ни чем иным, как только зарядом внутреннего ядра».

Построение теории строения атома на основе планетарной модели наталкивалось на обилие противоречий.

Сначала датский физик Н. Бор пытался применить классическую механику и электродинамику к задаче о торможении заря-

194

женных частиц при движении через вещество, но при заданном значении энергии электрона появлялась возможность приписывать ему произвольные параметры орбиты (или частоты), что приводило к парадоксам. Планетарная модель строения атома Резерфорда оказывалась несовместимой с электродинамикой Максвелла.

В феврале 1913 г. появились статьи по интерпретации спектров звезд Дж. Никольсона. Он, распространяя идею Планка на атомы, предложил квантовать проекции момента электрона. Так появился атом с дискретными орбитами, по которым вращались группы электронов, излучающие электромагнитные волны с частотой, равной частоте обращения. Такая модель годилась для сильно возбужденных атомов, и Никольсон объяснил некоторые особенности в спектрах звезд и туманностей исходя из модели атома Нагаока — представления об электронном кольце, вращающемся вокруг положительно заряженного ядра. Атом характеризовался, в первую очередь, своим спектром излучения. Он связал со спектральными частотами частоты специально постулированных механических колебаний электронов, перпендикулярных плоскости кольца. Но тут возникли проблемы устойчивости атома, так как нужно было вводить специальные ограничения — вращающийся электрон должен двигаться где-то без излучения! (Но Никольсон до этих проблем еще не дошел.)

Теорию строения атома Бор согласовал с проблемой происхождения спектров. Он дополнил модель Резерфорда постулатами, обеспечивающими устойчивость атома и линейчатый спектр его излучения, не свойственными классической науке, в своей работе «О строении атомов и молекул». Бор отказался от представлений классической механики и обратился к квантовой гипотезе Планка: определенное соотношение между кинетической энергией в кольце и периодом обращения — это перенесение соотношения $E = h\nu$, выражающего связь между энергией и частотой осциллятора, для системы, совершающей периодическое движение. Спектральные серии атома водорода даны на рис. 5.7, а, б. Спектральные формулы Бальмера, Ридберга и Ритца позволили сформулировать требования обеспечения устойчивости атома и линейчатого

характера спектра атома водорода:

в атоме существует несколько стационарных состояний (или орбит электронов в планетарной модели), на которых атом не излучает энергии;

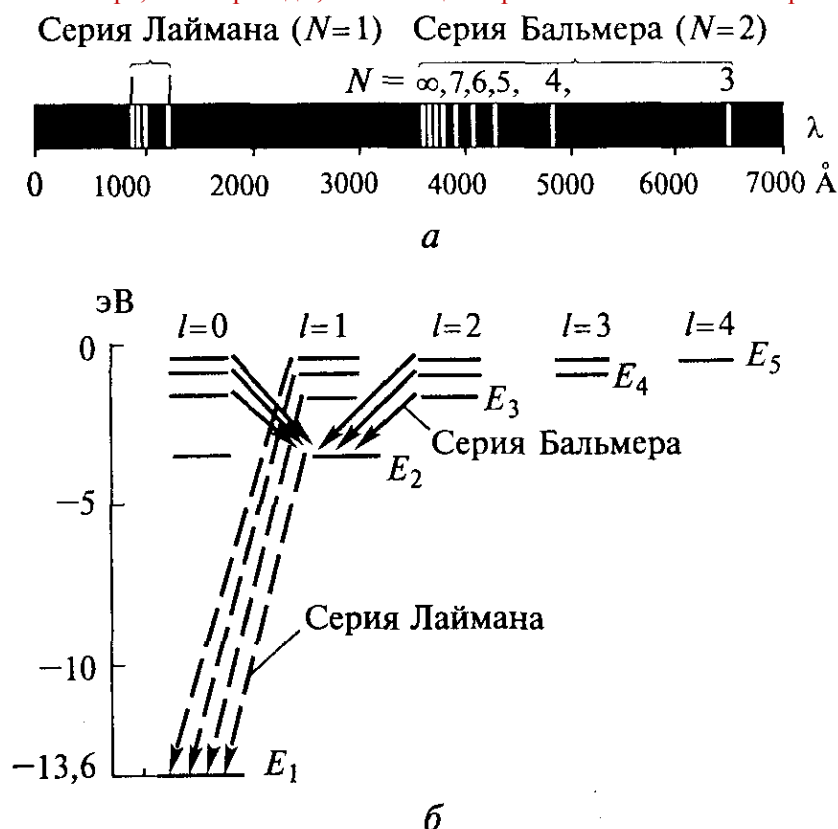
при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую атом излучает или поглощает порцию энергии, пропорциональную частоте, согласующейся с правилом частот Ридберга—Ритца.

Итак, Бор постулировал частоты и существование стационарных состояний. То, что электрон может находиться только на определенных орбитах, сразу объясняло линейчатый спектр атомов — электрон испускает свет только при переходе с одной орбиты на

195

Рис. 5.7. Спектральные серии атома водорода:

a — возможные линии в спектре; *b* — переходы, отвечающие сериям Лаймана и Бальмера



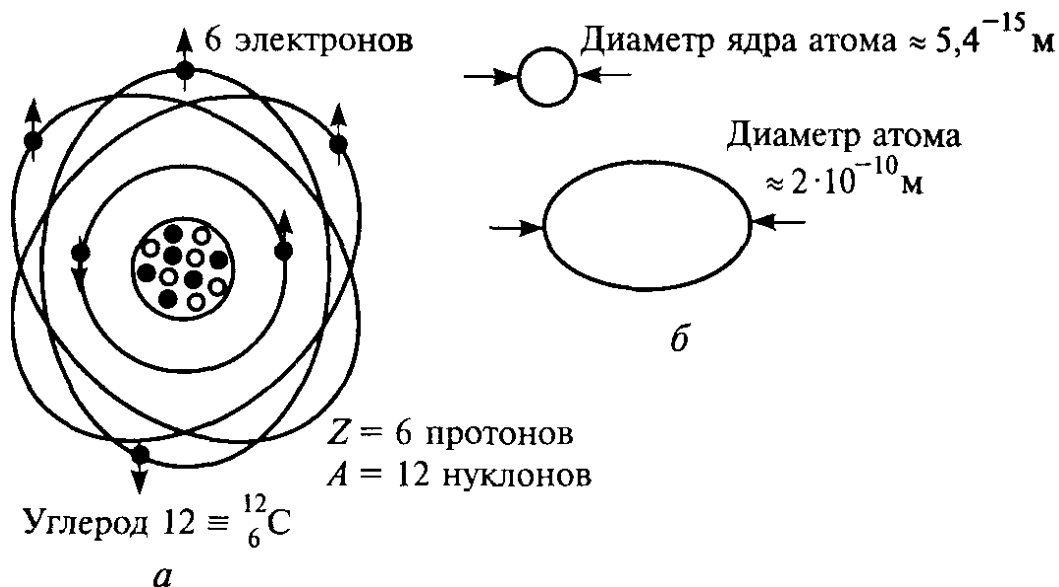
другую, т.е. дискретными порциями, и не излучает, находясь на дозволенной орбите. Правильность предположений Бора могло подтвердить только хорошее согласие с экспериментом. Постулаты Бора были радикальны, и для их восприятия научному сообществу требовалось преодолеть психологический барьер (рис. 5.8).

Применив свою теорию к строению атома водорода, Бор объяснил две (известные тогда) спектральные серии и предсказал еще две, пока не открытые. Он дал рациональное объяснение сериям спектральных линий, определил радиус атома и подсчитал значение постоянной Ридберга, входившей в комбинационный принцип Ридберга — Ритца. Это было огромным успехом. Но при переходе к более сложным атомам Бор столкнулся с трудностями: для атома гелия — только математическими, а при нескольких электронах задача оказалась сложнее, чем задача многих тел в теории Ньютона. И Бор стал строить водородоподобные модели. Теорию усовершенствовал немецкий физик А. Зоммерфельд. Из его расчетов получалось, что орбита — прецессирующий эллипс. Но такое искусственное соединение классических и квантовых представлений вело к неточным результатам для сложных атомов, не объясняло разную интенсивность линий в спектрах и т.д., хотя данные по спектрам водорода уже в 1914 г. были подтверждены.

Измерить орбиты электронов пытались в том же 1913 г. Дж. Франк и Г. Герц. Электроны вылетали из источника (электронной пушки) с энергией, определяемой ускоряющим напряжением, приложенным к двум проволочкам, проходили через газ из паров натрия, сталкиваясь с ними и искажая свои орбиты, точно так же, как звезда, проходящая вблизи планеты, искажала бы ее ор-

196

Рис. 5.8. Схема строения атома углерода: планетарная модель (а) и относительные размеры ядра и атома (б)



биту. По закону сохранения энергии это воздействие должно было бы изменить скорости электронов в выходящем из газовой камеры пучке. Оказалось, что скорость электронов в пучке почти не менялась, если их начальная энергия была меньше некоторой минимальной величины (большей в 1000 раз тепловой энергии при обычной температуре), т.е. энергию электрона нельзя изменить на произвольную величину, чего не может быть при воздействии на планетную систему.

Получалось, что атому водорода можно сообщить только 10; 12; 12,5; 12,9... эВ энергии, тогда как атому натрия — 2,1; 3,18; 3,6; 3,75... эВ и т.д.* Каждая величина энергии соответствует определенному состоянию движения электронов, а каждая линия — состоянию, которое могут принимать (такие состояния называли *разрешенными* квантовыми состояниями, а остальные — *запрещенными*). Состояние с наименьшей энергией определили как основное состояние, а остальные разрешенные — как возбужденные. Пороговая, энергия равна разности между первым возбужденным и основным состояниями. Так возникло представление о *квантах энергии*. Ряд разрешенных значений энергии атома обычно называют его спектром. Даже из приведенных выше значений разрешенных порций энергии для атомов видно, что с ростом энергии возбуждения квантовые состояния становятся столь близкими, что почти сливаются, и квантовые эффекты исчезают. Дж. Франк и Г. Герц определили независимым образом постоянную Планка и доказали дискретность уровней энергии атомов, т. е. и модель Бора.

* В атомной физике из-за малости величин и объектов используется единица энергии электронвольт (эВ): $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Эту энергию приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 В.

197

Если воспользоваться сравнением энергии с банковским счетом, предложенным В.Вайскопфом, известным физиком и популяризатором, то можно сказать, что «банк разрешает вносить вклады на счет и снимать с него только некоторые определенные суммы, чтобы держать величину вклада на одном из заранее предписанных уровней... Но странные правила, регулирующие банковский счет, не применяются к большим вкладам, потому что размеры дозволенных операций по вкладам становятся тем меньше, чем больше счет».

Модель Резерфорда — Бора — первая квантовая модель строения атома. Объединив в себе результаты, полученные при исследованиях радиоактивности, оптических и электромагнитных явлений, она положила начало новой эпохе в развитии теории атома и сразу же обнаружила свою плодотворность в спектроскопии и теории химической связи. Предсказание спектра атома водорода — выдающееся достижение теории и величайший триумф физики. Впоследствии установили, что электрон не может рассматриваться как материальная точка, он обладает волновыми свойствами, имеет структуру, зависящую от его состояния, а стационарных орбит не существует. Из-за волновой природы электроны и их заряды как бы размазаны по пространству атома, причем так, что электронная плотность неоднородна и имеет максимумы в определенных местах. Описание поведения электронного облака, данное в квантовой механике, становилось все более далеким от наглядности. Специфика квантово-полевых представлений заключается в вероятностной форме законов.

При очень больших значениях энергии, сообщенной атомам, они теряют свои свойства, образуя четвертое агрегатное состояние — *плазму*. В плазме исчезают почти все упорядочения, отличающие один атом от другого, там царит хаос. Плазма газообразного неона (на атом — 10 электронов) имеет те же свойства, что и плазма газообразного натрия с 11 электронами. Хаос таких высоких температур наблюдаем только в лаборатории, а для космоса — обычное явление. Бор показал, что для больших длин волн к формуле Бальмера

можно прийти по классической электродинамике (в этой области спектра справедлива формула Рэлея—Джинса). Это положение, названное *«принципом соответствия»*, стало методологическим основанием первоначального развития квантовой механики. В пределе, когда стационарные состояния оказываются близкими и мало отличимыми, можно пользоваться классическими представлениями. Но для развития теории этот принцип не оказал конструктивной помощи. Ван-дер-Варден назвал весь период с 1919 по 1925 г. периодом «систематического угадывания» на основе принципа соответствия. С.И.Вавилов считал, что неудача с расчетами атома гелия лишила Бора мощного орудия исследования — использования классических представлений для «почти интуитивного угадывания истинных отношений».

198

5.7. Корпускулярные свойства света. Фотоны Эйнштейна и доказательство их реальности

Когда утвердилась теория электромагнитного поля Максвелла, обнаружились световые явления, которые не могли быть объяснены с ее помощью. Трудности, возникшие в распределении энергии по спектру теплового излучения и получившие название «ультрафиолетовой катастрофы», были устранены только введением дискретности излучаемой энергии: $E = hv$, гипотезы квантов света. Для объяснения законов фотоэффекта пришлось расширить гипотезу Планка.

Явление фотоэффекта впервые наблюдал Г. Герц (1887) и исследовали А.Г.Столетов, В.Галльвакс и Ф.Ленард. В 1902 г. был обнаружен нижний предел частоты света, до которого ток не появляется и начиная с которого возрастала с увеличением частоты энергия освобожденных электронов. Законы фотоэффекта, полученные из опытов, показывали, что между пластинами возникает электрический ток, который сначала быстро растет, затем переходит к насыщению, причем фототок насыщения зависит только от мощности светового потока, падающего на пластину. Энергия испускаемых электронов определялась частотой падающего света и природой вещества, а не зависела от интенсивности поглощаемого излучения (от нее зависело лишь полное число электронов). Эти законы не соответствовали представлениям волновой теории света — волна не может выбивать электроны из катода. А. Эйнштейн приспособил идею Планка к объяснению этих законов.

Фотоэффект указывает на **дискретное строение света**, связанное с существованием квантов, — решил Эйнштейн. Назвав кванты электромагнитного излучения *фотонами*, он стал рассматривать световой поток как поток квантов с энергией $E = hv$, падающих на пластинку. Энергия порции света затрачивается на совершение работы по вырыванию электрона и сообщению ему кинетической энергии. Если величина $E = hv$ меньше, чем работа выхода A , эффект не наступает; значит, со стороны больших волн существует предел, зависящий от облучаемого тела. Если же величина $E = hv$ больше этого предела, то энергия освобожденного электрона равна энергии кванта, уменьшенной на работу выхода. При этом скорость фотоэлектронов увеличивается с частотой падающего излучения и не зависит от его плотности. Красная граница фотоэффекта — определенная длина волны излучения, начиная с которой наблюдается ток, — связана с разной работой выхода фотоэлектрона из разных металлов. Частицы света в отличие от частиц электричества — электронов не одинаковы, а отличаются энергией, равной hv . Они рождаются при испускании света и исчезают при поглощении, т.е. в отличие от корпускул Ньютона обладают материальной сущностью.

199

Эйнштейн распространил дискретность не только на испускание и поглощение, но и на само излучение: «Мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии... «световых квантов», т.е. небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со скоростью света». Правоту выводов подтвердил Милликен, определив постоянную Планка h (1916).

В 1912 г. Эйнштейн, исходя из тех же соображений, установил **основной фотохимический закон**, согласно которому при всякой фотохимической реакции происходит сначала поглощение одного кванта света, а затем вызванное им превращение (возбуждение или ионизация с испусканием электрона) в одном атоме или молекуле.

Наблюдается явление, обратное явлению фотоэффекта, — возникает излучение из-за захвата электрона атомом или молекулой. Захват происходит в одном акте, появляется фотон, энергия которого равна кинетической энергии электрона (сложенной с работой выхода). В трубке Рентгена торможение электронов происходит на антикатоде во многих элементарных актах. Но наибольшая возможная частота всегда соответствует кинетической энергии электронов. Это утверждается в законе Дюане и Гунта (1915).

Эйнштейн, анализируя статистические закономерности излучения, кроме энергии фотона $E = hv$, упоминал *импульс фотона* $p = hv/c$ и подчеркивал, что он важен, несмотря на свою малую величину. В 1923 г. американский физик А. Комптон показал, что при рассеянии легкими элементами жестких рентгеновских лучей в рассеянном излучении появляются лучи с измененной длиной волны, которая зависит от угла рассеяния (рис. 5.9). Этот эффект (разница частот излучения) не мог быть объяснен в классической теории и легко объяснялся в квантовой, построенной независимо П. Дебаем и А.Комптоном. Она является по существу применением законов сохранения энергии и импульса к взаимодействию между квантом света и свободным

электроном. После удара часть энергии и импульса кванта переходит к электрону, а квант летит дальше с другой частотой (уменьшенной энергией) и в другом направлении. Эти представления подтвердились опытами.

Закон сохранения энергии $h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + m_0c^2/(1 - \beta^2)^{(1/2)}$;

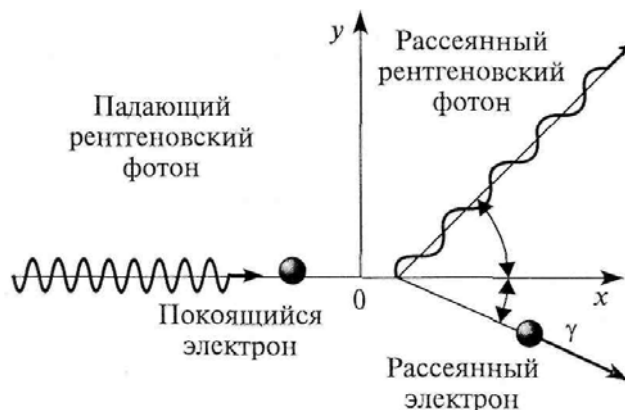
закон сохранения импульса $h\nu_0/c = h\nu/c + mv$, где ν_0 — частота падающих рентгеновских лучей, m_0c^2 — энергия покоящегося электрона, ν — частота рассеянных рентгеновских лучей, $\beta = v/c$ — отношение скорости электрона после соударения с квантом рентгеновского излучения к скорости света c .

Из этих уравнений можно определить $\nu - \nu_0 = 2h/(mc)\sin^2(\phi/2)$. Угол ϕ есть угол между направлениями первоначального и рассеянного рентгеновского излучений. Эффект Комптона являлся прямым подтверждением гипотезы световых квантов.

Из трех констант h , m , c можно составить комбинацию, имеющую размерность длины $h/(mc)$, называемую комптоновской длиной волны,

200

Рис. 5.9. Схема эффекта Комптона



которая равна $2,42 \cdot 10^{-12}$ м. Зависимость изменения длины волны фотона от угла рассеяния можно записать так: $\Delta\lambda = h/(mc)(1 - \cos \phi)$.

Итак, квантовые свойства фотона проявляются в фотоэффекте, основном фотохимическом законе, в эффекте Комптона (в первых главную роль играет энергия фотона, в третьем — его импульс). Комптон и Дебай независимо указали, что основные особенности этих явлений объяснены, если рассматривать взаимодействие между электроном и электромагнитной волной как соударение электрона с фотоном. Тем самым была доказана справедливость квантовой теории света.

Открытие **комбинационного рассеяния света** (в жидкостях и кристаллах) подтвердило гипотезу световых квантов. Суть явления состоит в следующем. Кванты оптического диапазона поглощаются молекулами вещества и вызывают их возбуждение. Возбужденная молекула излучает квант с меньшей энергией, и вторичное излучение оказывается смещенным в красную сторону спектра. Но при поглощении фотона молекулой, которая в этот момент уже находится в возбужденном состоянии, вторичное излучение может иметь и большую энергию, т.е. будет смещено в фиолетовую сторону спектра. Комбинационное излучение объясняет многие природные явления и широко используется для изучения строения молекул, межмолекулярных взаимодействий, протекания химических реакций, поверхностных явлений, фазовых переходов.

В последние 30 лет в качестве источников света стали широко применять лазеры, и были получены просто фантастические по точности результаты. Если раньше нужно было подбирать случаи, когда линия комбинационного рассеяния приходилась на край полосы электронного поглощения, что удавалось редко, то с использованием лазерных источников, перестраиваемых по частоте, можно получить узкую спектральную линию в разных облас-

201

тах спектра: можно изучать резонансное рассеяние, ранее недоступную колебательно-вращательную тонкую структуру линий, которая весьма информативна.

5.8. Поглощение и испускание квантов света. Спонтанное и вынужденное излучения

Рассматривая поглощение и испускание фотонов, находящихся под непрерывным воздействием излучения, Эйнштейн нашел, что равновесное взаимодействие между веществом и излучением не может состоять только из актов передачи энергии от излучения веществу (*поглощения*) или обратной передачи от вещества к излучению (*спонтанного испускания*). Тогда не понятен постулат Планка о равномерном распределении энергии в спектре равновесного излучения (инфракрасное излучение, например, Солнца, несет много энергии — потому

греет, а более коротковолновое — меньше — от него мы загораем, но не согреваемся). Необходимо ввести еще одно излучение — *вынужденное*, или индуцированное внешним полем и когерентное с ним. Тогда Эйнштейн и не подозревал, что появится возможность усиления этого введенного им излучения и тем самым произойдет настоящая революция в оптике, связанная с открытием и созданием мазеров и лазеров. Эйнштейн применил к модели атома Бора методы статистики и вывел формулу Планка для равновесного излучения. Так он стал разрабатывать *статистическую квантовую теорию* испускания и поглощения света отдельным атомом. Самое важное — введение вероятности для описания микрообъектов. Кроме вероятностей спонтанного и индуцированного излучений, он предположил и случайное направление вылета кванта из молекулы, которое нельзя предсказать.

Вероятность спонтанного испускания впервые ввел Резерфорд для уравнения радиоактивного распада (1900). Эйнштейн считал такой подход связанным с недостаточностью знаний о системе. Этому посвящены его споры с Бором, известные под названием: «Играл ли Бог в кости при сотворении мира?» Научное сообщество не воспринимало вероятностный подход и теорию световых квантов, что, как отметил академик А. Б. Мигдал, отразилось в формулировке Нобелевского комитета, присудившего Эйнштейну премию по физике (1922): «за вклад в теоретическую физику и особенно за открытие законов фотоэффекта», но об открытии квантов электромагнитного поля, как и о теории относительности, не было ни слова. Восприятие новых идей происходило постепенно.

Используя в своей работе (1926) термин «фотон», Дж. Льюис рассматривал квант света как неделимый атом. В 1927 г. состоялся

202

очередной Сольвеевский конгресс, в программе которого уже стояли вопросы об электронах и фотонах. Постепенно фотон был признан элементарной частицей с массой покоя, равной нулю, и со спином, равным единице.

Итак, атом может претерпеть переход с верхнего уровня на нижний благодаря спонтанному испусканию. Вероятность такого перехода в единицу времени не зависит от интенсивности поля излучения, а определяется только параметрами уровней m и n , участвующих в переходе, и характеризуется коэффициентом A_{mn} . Вероятность вынужденного процесса в единицу времени пропорциональна плотности энергии поля излучения на резонансной частоте, которая соответствует двум атомным состояниям, участвующим в переходе. Скорость такого вынужденного испускания равна $N_m B_{mn} \rho_\tau(\nu_{mn})$, где индекс, относящийся к плотности излучения, указывает, что здесь рассматривается случай термодинамического равновесия.

Атом в нижнем состоянии может поглощать энергию, переходя на более высокий уровень, и этот процесс аналогичен предыдущему. Скорость поглощения может быть записана в виде $N_n B_{nm} \rho_\tau(\nu_{nm})$. Поскольку равновесие есть стационарное состояние, то между процессами, обуславливающими заселение и опустошение различных энергетических уровней, должно существовать детальное равновесие:

$$N_m A_{mn} + N_m B_{mn} \rho_\tau(\nu_{mn}) = N_n B_{nm} \rho_\tau(\nu_{nm}).$$

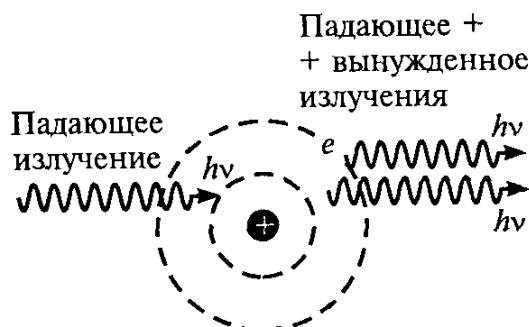
Используя распределение Больцмана для определения отношения заселенности уровней и формулу Планка, можно получить объяснение распределений при тепловом равновесии. Если уровень m выше уровня n , то число атомов на уровне m много меньше, чем на уровне n .

Вынужденное испускание должно иметь место при совпадении частоты падающего излучения с одной из возможных частот атомов данного сорта, — заметил в 1927 г. Дирак. В результате такого взаимодействия возбужденного атома с фотоном получаются два совершенно одинаковых фотона. Особенности вынужденного излучения — *монохроматичность* и *когерентность*.

В 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант указал, что за счет неравновесных процессов можно сделать отношение числа частиц на возбужденном уровне к числу частиц на невозбужденном больше единицы. Такая среда, называемая инверсно-заселенной, вместо поглощения будет усиливать свет. В 1951 г. он вместе с Ф. А. Бутаевой и М. М. Вудынским получил авторское свидетельство на изобретение принципиально нового способа усиления электромагнитного излучения за счет вынужденного излучения. Система атомов (или молекул) с инверсной заселенностью уровней при наличии в системе обратной связи способна не только усиливать, но и генерировать когерентное излучение. Вскоре этот способ был реализован (сначала в диапазоне СВЧ).

Когерентность сантиметровых волн установил А. М. Прохоров в том же, 1951 г. при разработке молекулярных стандартов частоты и времени. В 1952 г. он вместе с Н. Г. Басовым сообщили на научной конференции о возможности создания усилителя и генератора излучений в СВЧ-ди-

203

Рис. 5.10. Схема получения вынужденного излучения

апазоне на пучке молекул аммиака в качестве активной среды. Они назвали его «молекулярным генератором». С аналогичным предложением выступил и американский физик Ч.Таунс.

Первый квантовый генератор на пучке молекул аммиака был создан в 1954 г. Н.Г.Басов, А.М.Прохоров и американский физик Ч.Таунс в одно время предложили и осуществили обратную связь, поместив активную среду в резонатор с двумя параллельными зеркалами. Он работал на длине волны $1,25 \cdot 10^{-6}$ м. Квантовые усилители радиодиапазона стали называть *мазерами*, оптического — *лазерами* (англ. Microwave (Light) Amplification by Stimulated Emission of Radiation) — усиление микроволнового (светового) излучения путем стимулированного или индуцированного излучения (рис. 5.10). Трехуровневый метод создания неравновесных квантовых систем, широко используемый в квантовой электронике, предложил в 1955 г. Н.Г.Басов. Принципы работы лазера разработал Ч. Таунс в 1958 г. вместе с А. Шавловым. Они использовали в дальнейшем лазеры для проверки тонких эффектов теории относительности и в приложениях к биологии и медицине. В 1969 г. Таунс открыл *космический лазер*.

Н.Г.Басову принадлежат перспективные идеи по разработке и созданию полупроводниковых лазеров, лазерного термоядерного синтеза, химических лазеров и т.д.

Первый лазер был создан американским физиком Т. Мейменом в 1960 г. на кристалле рубина. В том же году был создан лазер в электрическом разряде на смеси гелия и неона (А.Джован, В. Беннетт, Д.Элриот), который получил наибольшее распространение. В 1966 г. К. Пателр представил CO_2 — лазер с большой выходной мощностью.

В настоящее время лазеры созданы на кристаллах, газах, пучках электронов и жидкостях. Они концентрируют излучение по направлению испускания, энергии, углу расходимости и спектральному интервалу. Фактически под любую задачу можно подобрать источник излучения с нужными свойствами.

5.9. Корпускулярно-волновые свойства вещества и значение их открытия

Синтез корпускулярных и волновых представлений предложил в 1924 г. молодой французский физик Луи Виктор де Бройль, приписав любой частице некий внутренний периодический процесс и рас-

204

смотрев единым образом частицы вещества и света. Он развил представления Эйнштейна о двойственной природе света, распространив их на вещество. Для этого он объединил формулу Планка $E = h\nu$ и формулу Эйнштейна $E = mc^2$ и получил соотношение, показывающее, что любой частице при определенных массе и скорости соответствует своя длина волны. Сама волна не несет энергию, а только отображает «распределение фаз» некоего периодического процесса в пространстве. Эту фиктивную волну де Бройль назвал «*фазовой волной*», форма лучей которой определяется принципом наименьшего времени распространения, выдвинутого еще Ферма.

Вслед за Гамильтоном де Бройль сравнил принцип Ферма в оптике с принципом наименьшего действия в классической механике и пришел к выводу, что объединение этих экстремальных принципов должно стать основой объединения волновых и корпускулярных представлений, синтеза волн и квантов. Гамильтон подчеркивал, что дело не в том, чтобы представить себе свет как поток частиц или как волну, а в том, чтобы создать теорию, согласующуюся с опытом. Установив математическую тождественность проблем геометрической оптики и механики, он вообще игнорировал вопрос о природе света, но его оптико-механическая аналогия была началом сопоставления прерывности и непрерывности, «частицы» и «волны».

Бройль пошел дальше не только Гамильтона, но и Планка, и Эйнштейна. Соотношения Эйнштейна для световых квантов в объяснении фотоэффекта ($E = h\nu$, $p = h/c$) требуют сохранения понятия частоты, поэтому сохраняются и волновые свойства света как колебательного процесса, т.е. в свойствах света присутствует двойственность. Бройль в своей гипотезе исходил из аналогий, но они были основаны на идее единства природы. Эйнштейн сразу понял, что здесь речь идет не просто об аналогии света и вещества. Если эта идея справедлива, то можно ожидать волнового явления и для частиц вещества, например, *дифракции электронов*.

Идея де Бройля была неожиданна и открывала новые свойства вещества, о которых и не подозревали. Через оптико-механическую аналогию Бройль хотел вскрыть таинственный смысл квантовых условий,

введенных в элементарной теории атома Бором, Вильсоном и Зоммерфельдом. Конкретный смысл связи между величинами, характеризующими частицу и волну, сопоставляемую с частицей, связан с квантованием энергии тела, определяемой по формуле Эйнштейна $E = mc^2$ и преобразованиями теории относительности.

Длину волны микрочастицы де Бройль определил по аналогии с длиной волны фотона. Поскольку импульс фотона $p = h\nu/c = h/\lambda$, то длина его волны $\lambda = h/p$. По определению, импульс есть произведение массы на скорость, поэтому можно ввести длину волны де Бройля $\lambda_B = h/(mv)$. Если электрон есть волна — частица, то

стационарная орбита в атоме Бора будет определяться тем, что на ней должно укладываться целое число длин волн электрона. Это означает, что $2\pi R = n\lambda_B$ или через длину волны де Бройля можно записать: $2\pi R = (h/mv)n$. Это и есть первый постулат теории атома Бора.

Оценим длину волны электрона с энергией 10 эВ. Так как $E = mv^2/2$, $p = mv$, имеем: $p = \sqrt{2mE}$ и $\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE} = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} / \sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10 \text{ эВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} = 3,88 \times 10^{-10} \text{ м} = 0,388 \text{ нм}$.

Полученное значение длины волны сравнимо с размером атома.

В 1921 г. американский физик К. Дж. Дэвиссон обнаружил, что электроны, отражаясь от никелевой пластинки, рассеиваются под определенным углом. Тогда он не сумел найти подходящего объяснения этому явлению. Но после появления работ Луи де Бройля он провел дополнительное исследование и в 1927 г. вместе с американским физиком Л. Джермером получил четкую картину рассеяния электронов, соответствующую теории де Бройля.

Явление дифракции электронов совершенно независимо открыл примерно в это же время Дж. П. Томсон, сын Дж. Дж. Томсона, при рассеянии быстрых электронов через металлическую фольгу. По дифракционным картинам он вычислил длину волны для электронов (аналогичный опыт по дифракции медленных электронов провел в 1932 г. П. С. Тартаковский). Так был экспериментально подтвержден корпускулярно-волновой дуализм электронов.

После успешного обнаружения волновых свойств у электронов были проведены сложнейшие опыты по их обнаружению у атомов и молекул (Германия). Так как длина волны Бройля равна $h/(mv)$, то у больших частиц она существенно меньше, но Штерн ее измерил. Впоследствии дифракционные, а значит, и волновые свойства были обнаружены у атомных и молекулярных пучков.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Охарактеризуйте развитие представлений о свете. Как и кем было показано, что свет есть электромагнитная волна? В каких явлениях проявляются волновые свойства света?
2. Охарактеризуйте дискретность и непрерывность материи. В каких явлениях проявляются корпускулярные свойства света?
3. Опишите спектр электромагнитного излучения. Как были открыты и изучены инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, рентгеновские лучи?
4. Как законы фотоэффекта показали противоречия и кризис классической науки? Как определяется фотон? Какое давление создает излучение с длиной волны $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, если на каждый квадратный сантиметр поверхности, полностью его поглощающей, падает $3 \cdot 10^{18}$ фотонов за 1 с?
5. Каково значение открытия электрона? Какие модели строения атомов появились в начале XX в.? В какой степени атом похож на Солнечную систему? Дайте представление об энергетических уровнях и переходах.
6. Что такое равновесное излучение, как оно моделируется, каковы его законы? Какие проблемы теории теплового излучения привели к «ультрафиолетовой катастрофе», предвещающей крушение «классической» физики? Какой выход был найден?
7. Поясните суть гипотезы Луи де Бройля. Как она была экспериментально подтверждена, какое значение для естествознания имеет использование корпускулярно-волновых свойств вещества? Что узнали о живой материи с помощью электронного микроскопа; на каких принципах он работает?
8. Поясните смысл гипотезы о дискретном характере испускания и поглощения света. Дайте представление о появлении вероятностных законов вынужденного и спонтанного испускания света.
9. Поясните смысл понятия «фотон». Какие явления и каким образом были объяснены с помощью квантовой теории света? Чем такое объяснение противоречит классическому описанию?
10. Как определяют температуру звезд? Чем было доказано материальное единство мира?

Глава 6. КОНЦЕПЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СТРУКТУР В МИКРОМИРЕ

6.1. Описание движения микрочастиц. Принципы дополнительности и причинности

Микромир — невидимый мир микрообъектов: атомов, электронов, нейтронов, протонов и пр. Он не может быть описан понятиями и принципами классической физики, которые в некоторой мере соответствуют наглядным представлениям (как в гл. 5). Классическая физика признает наличие материи как в виде вещества, так и поля. Но она не допускает объектов, обладающих свойствами и поля, и вещества. Подчеркивая кажущуюся противоречивость свойств микрообъектов, у которых эти свойства дополняют друг друга, Н.Бор выдвинул принцип дополнительности (1927).

При одном описании или наблюдении за поведением микрочастицы удобнее представлять ее волной, а при другом — частицей. Единая картина синтезирует эти описания. После доказательства волновых свойств электрона и «полного успеха» корпускулярно-волнового дуализма вещества необходимо было подвести теорию к объяснению явлений. Идея о волновых свойствах электронов оказалась очень плодотворной. Для создания механики микрочастиц нужно было сформулировать ее основной закон (в классической науке таков закон динамики Ньютона). Для макрообъектов длина волны де Бройля, равная h/mv мала, и их движения можно описать законами классической механики как волновые процессы, характеризующиеся волновой функцией Ψ . Но когда длиной волны де Бройля нельзя пренебречь, закон движения микрообъектов должен быть аналогичен волновому уравнению в оптике: $\Delta\Psi + (\omega^2/v^2)\Psi = 0$. Австрийский физик Э. Шредингер, опираясь на аналогию оптико-лучевого и оптико-волнового описаний, обобщил гипотезу де Бройля для случая, когда электрон движется не в свободном пространстве, а во внешнем поле. Английский математик У. Гамильтон, ранее выразивший идею об оптико-механической аналогии, показал, что задачу классической механики можно формально записать как задачу геометрической оптики. Тогда в приведенном выше уравнении для фазы вместо ω надо поставить циклическую частоту волн де Бройля ($2\pi E/h$), а вместо скорости v — скорость распространения поверхности равного действия $E/[2m(E-U)]^{1/2}$. Тогда уравнение для частицы примет вид: $\Delta\Psi + (8\pi^2m/h^2)(E-U)\Psi = 0$.

208

Здесь введен $\Delta\Psi = \partial^2\Psi/\partial x^2 + \partial^2\Psi/\partial y^2 + \partial^2\Psi/\partial z^2$ — оператор Лапласа; $(E-U)$ — функция координат и времени, которая характеризует силовое поле, в котором движется микрочастица.

Волновая механика

Волновая механика — вариант механики микромира, разработанный Шредингером. Уравнение Шредингера в микромире играет такую же роль, как уравнения Ньютона в классической механике. Его решение в отсутствие внешнего поля дает волны де Бройля. Уравнение Шредингера для волновой функции не может быть выведено из других соотношений, т. е. это — исходное предположение, справедливость которого доказывается тем, что вытекающие из него следствия согласуются с экспериментальными данными.

Дифференциальные уравнения с частными производными второго порядка имеют бесконечное множество решений. Необходимое частное решение находят при определенных условиях, соответствующих данной конкретной задаче. Шредингер решил уравнение для простейших квантовых систем — осциллятора, ротатора и т.п. При движении свободного электрона уравнение не накладывало никаких ограничений на его энергию — она может принимать любые значения, не квантуется. Шредингер трактовал Ψ -функцию как величину, описывающую плотность частиц в реальном пространстве, и считал, что она отражает только волновые свойства частиц.

Для атома водорода Шредингер получил ряд *дискретных значений энергии*, что и соответствовало теории Бора. Он определил вид волновых функций и возможные значения энергии, сумев уйти от постулатов Бора в строении атома водорода. Целочисленность значений энергии получилась сама собой, как получается целое число узлов при рассмотрении колебаний струны. Из условия стремления к нулю Ψ -функции на больших расстояниях (быстрое ослабление удерживающего поля) можно найти решения уравнения Шредингера для связанных состояний. Для кулоновского потенциала атома водорода решение получается не для всех энергий, а для определенных дискретных значений, совпадающих с теми, что давала теория Бора. Тем самым проявился *смысл правил квантования Бора — Зоммерфельда*: допустимые значения энергии соответствуют требованию, чтобы в области движения частицы уложилось целое число волн де Бройля.

Хотя смысл Ψ -функции был еще не понятен, волновой формализм теории Шредингера приняли, поскольку он позволял решать сложные задачи разработанными методами математической физики, основанными на

непрерывных функциях. Интересно высказывание Планка по поводу уравнения Шредингера и введения Ψ -функции: «уравнению придает основополагающее значение... новая методика, позволяющая с помощью математики преодолеть трудную квантово-теоретическую проблему Это первый случай, когда квант действия, который до сих пор не поддавался

209

никаким попыткам подойти к нему с точки зрения физики непрерывного, удалось включить в дифференциальные уравнения». Смысл Ψ -функции был осознан лишь в 1926 г. М. Борном, и «волны материи» получили вероятностную интерпретацию. Об этом чуть ниже.

Но свойства Ψ -функции не сводились только к «волновым пакетам», что экспериментально доказали советские ученые Л.М.Биберман, Н.Г. Сушков и В. А. Фабрикант (1948). Пропуская пучок электронов чрезвычайно малой интенсивности через кристалл (фактически по одному), они получили на фотопластинке за кристаллом отдельные пятнышки, плотность распределения которых соответствовала распределению интенсивностей в дифракционной картине, которая была бы при большой плотности пучка электронов. Эти «пятнышки» демонстрировали дискретность электронов, а их распределение свидетельствовало о подчиненности их статистическим законам.

М.Борн с 1922 г. начал работать над теорией строения атома Бора, собрав в Геттингене одаренных молодых физиков-теоретиков из разных стран и воодушевив их на разработку новой, квантовой физики. По воспоминаниям Гейзенберга, благодаря Борну Геттинген, славившийся своей математической школой (традиции Гаусса, Римана, Вебера продолжали Клейн и Гильберт), стал центром атомной физики. Борн в книге «Физика в жизни моего поколения» писал: «Развитие квантовой механики показывает, что совокупность наблюдений и измерений медленно создает абстрактные формулы для их сжатого описания и что понимание их значения приходит впоследствии».

Матричная механика

Матричная механика — другой вариант механики микромира, созданный В.Гейзенбергом, М.Борном, П.Дираком и П.Иорданом. В своей первой работе Гейзенберг пытался выработать основы атомной механики, построенной на связях между принципиально наблюдаемыми величинами без привлечения моделей. Он считал, что теория явлений микромира должна устанавливать соотношения между величинами, которые *непосредственно наблюдаются* в эксперименте (частота спектральных линий, поляризация и др.), а «*ненаблюдаемые*» (скорость, масса, ускорение, положение частицы) не должны быть в ней. Гейзенберг отказался от «представлений об электронных орбитах с определенными радиусами и периодами обращения, потому что эти величины не могли быть наблюдаемы».

Это достижение Гейзенберга и стало основой матричного варианта квантовой механики, для которой Борн разработал математический аппарат. Гейзенберг представил физические величины как совокупность всех возможных амплитуд перехода из одного квантового состояния в другие, так как при изучении спектральных закономерностей атом представлялся совокупностью вир-

210

туальных гармонических осцилляторов. Сама вероятность перехода пропорциональна квадрату модуля амплитуды, наблюдаемому в экспериментах. Тогда каждая величина должна иметь два индекса, соответствующих верхнему и нижнему состояниям. Эти величины называются *матрицами*. Гейзенберг получил и уравнения для наблюдаемых величин, но в первоначальном виде они были сложными. В 1926 г. он сумел объяснить отличие двух систем термов для пара- и ортогогелия как соответствующих симметричным и антисимметричным решениям его уравнения.

Квантовая механика

Квантовая механика — теория движений в микромире, основанная на единстве матричной и волновой механики. Шредингер вскоре доказал их математическую эквивалентность. В квантовой механике нет разницы между описаниями частицы с помощью волновых и корпускулярных представлений. Вращающийся вокруг ядра электрон можно представлять в виде волны, длина которой определяется его скоростью. И там, где укладывается целое число длин волн электрона, они складываются, образуя разрешенную орбиту в планетарной модели строения атома Бора. Если же в орбиту не укладывается целое число волн, гребни их станут компенсировать впадины, такая орбита не будет разрешена. Уравнение Шредингера позволяет однозначно определить волновую функцию в любой момент времени, если известно ее значение в данный момент. Поэтому само уравнение вполне динамично. Но оно было написано еще до того, как стал понятен смысл этой функции.

Верную трактовку смысла волновой функции дал М.Борн в 1926 г. Обратившись к работам Эйнштейна по теории фотонов и проанализировав задачу о рассеянии частиц, он подошел к созданию формализма квантовой механики с позиции статистических методов. Он показал, что *интенсивность Ψ -волн есть мера вероятности положения частицы в определенном месте*.

Квадрат модуля Ψ -функции определяет вероятность dW того, что частица будет обнаружена в объеме dV : $dW = |\Psi|^2 dV = \Psi_1^* \Psi_1 dV$ [dV : $dW = |\Psi|^2 dV = \Psi_1^* \Psi_1 dV$], при этом полная вероятность обнаружения частицы во всем объеме, определяемая

интегралом по объему, должна равняться (как достоверного события) единице: $\int_V dW = 1$. Значит, квантовая механика носит статистический характер. Она позволяет найти лишь вероятность того, что координаты лежат внутри определенного интервала. Ψ -функция позволяет только предсказать вероятность обнаружения частицы в различных точках пространства. Как выразился Р.Фейнман, «приходится признать, что мы изменили нашим прежним идеалам понимания природы. Может быть, это шаг назад, но никто не научил нас, как избежать его».

Итак, микропроцессам свойственны не динамические, а статистические закономерности, тем самым в области микромира

211

причинность реализуется через *многообразие случайностей* и характер причинной связи в микромире отличается от детерминизма классической науки. Классическая наука, стремясь к объективности законов, фактически игнорировала случайность. В ней фигурировали только средние данные, но в реальных процессах всегда происходят случайные флуктуации (отклонения от средних), которыми можно пренебречь лишь в некоторых ситуациях. Динамические теории не могут описывать явления с большими флуктуациями, связь со случайностью сглажена, огрублена. Поэтому статистические законы глубже, чем динамические, а вероятностная причинность оказывается глубже, чем динамическая.

Положение о *первичности статистических законов* выдвинули создатели квантовой механики. Сначала многие связывали его с индетерминизмом, поскольку детерминизм в привычном понимании в микромире оказался недостижим. Большая часть ученых воспринимала статистические законы как недостаточность наших знаний о микрообъектах, т.е. как промежуточный этап развития знаний. Но когда оказалось, что вероятностная теория подтверждается многими экспериментами, стали говорить о равенстве динамических и статистических закономерностей в микромире. Эти законы дополняют друг друга и в то же время не могут быть сведены друг к другу. Статистические закономерности — объективные законы природы, отражающие реальные связи в микромире. В макромире поведение индивидуальных объектов подчинено динамическим законам, а совокупности объектов — статистическим. В микромире и объекты, и их совокупности описываются как динамическими, так и статистическими законами. История науки показывает, что динамические законы постепенно сменяются законами статистическими, представляющими более глубокий уровень понимания. Поднимаясь на него, получаем более глубокое понимание сущности и более широкий охват явлений природы. Статистические закономерности приводят к более хорошему согласию с экспериментом. Ее результаты при определенных условиях согласуются с результатами динамических теорий, что и предполагает принцип соответствия Бора.

До создания квантовой механики Борн вместе с учениками получил выдающиеся результаты по объяснению явлений в твердых телах и кристаллах, используя понятие кристаллической решетки и применяя теорию групп. Поэтому он сразу же применил этот подход к различным проблемам строения атома, физики твердого тела и молекулярной физики. В 1926 г. Борн предложил способ расчета электронных оболочек атома и методы решений для задач столкновения частиц по теории возмущений, которые известны как борновское приближение, и вместе с Н. Винером ввел в квантовую механику понятие *оператора*. В отличие от ситуации в классической механике некоторые величины (момент импульса, энергия при движении в замкнутой области пространства и др.)

212

могут принимать лишь дискретный ряд значений. Возможные значения физических величин являются собственными значениями операторов, сопоставляемых в квантовой механике с каждой физической величиной. Эта величина может принимать определенные значения с вероятностью, равной единице, только в случае, если система находится в состоянии, изображаемом собственной функцией этого оператора. Тогда вероятность превращается в достоверность.

Зная Ψ -функцию, можно вычислить среднее значение любой физической величины и ее отклонение от среднего значения — дисперсию. В отличие от классической механики поведение отдельной частицы имеет статистический характер, т.е. это уже не связано с наличием очень большого числа частиц. Но при формулировке квантовой механики пришлось ввести еще один принцип — фундаментальный принцип неотличимости или тождественности частиц. В классической механике частицы можно отличить по их состояниям, в этом смысле они не теряют индивидуальности. В квантовой механике это невозможно, так как микрочастица не имеет траектории. Если волновые функции двух частиц перекрываются, то в области перекрытия нет возможности отличить одну частицу от другой. Поэтому получается, что тождественными оказываются и свойства частиц, и их состояния. В природе реализуются лишь те состояния совокупности одинаковых частиц, которые не меняются при обмене местами одинаковых частиц. Поэтому и состояния описываются лишь симметричными или антисимметричными волновыми функциями, а характер симметрии определяется собственным моментом импульса частицы (ее спином). Сформулированный на этой основе принцип Паули позволил сформировать статистические правила для частиц с целым и полуцелым спином и понять построение Периодической системы химических элементов.

В 1927 г. Борн разработал, при участии американского физика Р. Оппенгеймера, теорию строения двухатомных молекул. Квантовая механика явилась *теоретической основой химии*. С ее помощью удалось построить теорию твердого тела, многих его свойств в различных полях. На ней базируются квантовые статистика, электродинамика, теория излучения и др. Она легла в основу теории радиоактивного распада и стала базой атомной и ядерной физики.

6.2. Принципы соответствия и неопределенности. Роль прибора и процесса измерения в квантовой механике

Границы применимости существуют у каждой теории. Так, классическая механика описывает движение макроскопических тел при скоростях, существенно меньших скорости света. Эти границы выяснились только после создания СТО — релятивистская меха-

213

ника расширила классическую на случай больших скоростей. Ценность механики Ньютона при этом не уменьшилась — для малых скоростей тел (по сравнению со скоростью света) поправки малы. При создании квантовой механики было важно строить новую теорию так, чтобы соотношения между величинами были аналогичны классическим, т.е. каждой классической величине нужно было поставить в соответствие квантовую, а потом найти соотношение между квантовыми величинами, пользуясь классическими законами. Такие соответствия можно было найти только из операций измерения.

Принцип соответствия — новая теория не может быть справедливой, если не будет содержать в качестве предельного случая старую теорию, относящуюся к тем же явлениям, если она уже подтверждена опытом в этой области. Этот принцип построения новых теорий в других областях, сформулированный Н. Бором (1923), отражает диалектику соотношения абсолютной и относительной истин. Смена теорий (относительных истин) есть шаг на пути приближения к абсолютной истине, тем самым принцип соответствия отражает объективную ценность физических теорий — новые теории не отрицают старых именно потому, что старые теории с определенной степенью приближения отражают объективные закономерности природы.

В 1927 г. В. Гейзенберг при поддержке Бора и его школы предложил устранить противоречие «волна — частица», которое он понимал как аналогию. Он шел от наглядных феноменологических моделей. Считая, что «совокупность атомных явлений невозможно непосредственно выразить нашим языком», он предложил отказаться от представления о материальной точке, точно локализованной во времени и пространстве. Либо точное положение в пространстве при полной неопределенности во времени, либо наоборот — таковое требование квантовых скачков.

Принцип неопределенности Гейзенберга — это фундаментальное положение квантовой теории, отражающее ограничение информации о микрообъектах самими средствами наблюдения.

Пусть в какой-то момент нам нужно узнать положение и скорость электрона. Самый точный метод — осветить электрон пучком фотонов. Электрон столкнется с фотоном, и его положение будет определено с точностью до длины волны фотона. Для большей точности нужно использовать фотоны наименьшей длины (или большей частоты, или обладающие большими энергией E и импульсом $h\nu/c$). Но чем больше импульс фотона, тем сильнее он исказит импульс электрона. Для точного знания положения электрона нужно использовать фотоны бесконечной частоты, но тогда и импульс его будет бесконечным, совершенно неопределенным. И, наоборот, желая определить точно импульс электрона,

214

из аналогичных рассуждений придем к неопределенности положения. Выразив ее как Δq , а неопределенность импульса как Δp , получим $\Delta q \Delta p \geq h$. Для других сопряженных величин — энергии E и времени t — квантово-механическое соотношение неопределенности будет $\Delta t \Delta E \geq h$.

Значит, чем точнее фиксирован импульс, тем большая неопределенность в значении координаты. Аналогично связаны энергия и время — точность измерения энергии пропорциональна длительности процесса измерения. И это не неточность определения величин, которая может быть улучшена более точным прибором, это принципиальная неточность определения физических величин в атомной физике. Причина этого — взаимодействие с макроскопическим прибором. Принцип дает ограничения, которые нельзя устранить никакими усовершенствованиями прибора. В классической науке приборы и наблюдения тоже искажали измерения, но эти искажения можно было уменьшать. Разница в том, что соприкасаются и взаимодействуют объекты разных миров: для изучения микромира используются приборы и наблюдатели из макромира. Они-то и вносят искажения в состояния микрообъектов, которые не устранимы. Поэтому будущее состояние микрочастицы не может быть достоверно и точно предсказано. Повышение точности знания одного параметра увеличивает неточность в знании сопряженного ему параметра. Отсюда — дискуссии о непредсказуемости явлений микромира, о «свободе воли» электрона, о победе случайности над детерминизмом, нарушении принципа причинности в микромире и др. Принцип неопределенности иногда называют следствием принципа дополнительности, что до сих пор вызывает дискуссии.

Основа интерпретации квантовой механики — принцип Гейзенберга — устанавливает границы применимости классической физики и считается общепризнанным.

Применим соотношения Гейзенберга, например, к электрону в атоме. Так как скорость электронов при движении вокруг ядра порядка 10^6 м/с, то максимально допустимая неопределенность скорости не должна превышать самой скорости. Пусть они равны, тогда из соотношения неопределенностей для координат и импульсов $\Delta p \Delta x \geq h$, $\lambda = h/(mv)$. Или в числах: $\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с / $(9,1 \cdot 10^{-31}$ кг $\times 10^6$ м/с) = $7 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. неопределенность в координате порядка размеров самого атома. Отсюда вывод: электрон размазан по всему объему атома в виде пульсирующего облачка, и его боровская орбита — геометрическое место точек, в которых корпускулярные свойства электрона наиболее выражены.

Понятие вероятности становится первичным, и вокруг него строится наука XX в., формируя новую, неклассическую стратегию познания. Опыты дают набор возможных значений величин с распределением их вероятности, и это может быть предвычислено-

215

но! Исследуя специфику взаимодействия микрообъекта с классическим средством наблюдения, Гейзенберг в работе «О наглядном содержании квантовой кинематики и механики» (1927) рассмотрел основные положения квантовой механики, ориентируясь на возможности измерения величин, характеризующих состояние микрообъекта. Он заключил, что в микромире «чем точнее определяется местоположение, тем менее точными становятся сведения об импульсе». Или, в отличие от «лапласовского детерминизма», поскольку мы не можем знать настоящего во всех деталях, то не можем достоверно предсказать будущее. Природа накладывает на понятия координаты и импульса принципиальные ограничения, которых не было в классической науке, возможно, из-за малой величины h .

«Бог не играет в кости» — считал Эйнштейн. Связь принципа неопределенности с принципом дополнительности Бора — основа так называемый «копенгагенской» трактовки квантовой механики. Эйнштейн долгое время оппонировал Бору. Он писал: «Существует нечто вроде «реального» состояния физической системы, существующего объективно, независимо от какого-то ни было наблюдения или измерения». Споры Бора с Эйнштейном проясняют многое в истолковании смысла квантовой механики, фактически они отражают продолжавшуюся более двух десятилетий борьбу двух мировоззрений, двух теорий познания. Вероятностное толкование волновой функции было подготовлено работами Бора, который применял идею вероятности к переходам электронов, но еще раньше Эйнштейн ввел понятие вероятностей для спонтанного и индуцированного излучений. От них вероятностные представления вошли в науку XX в.

Дирак отмечал: «Бор считал, что высшая мудрость должна быть выражена обязательно такими словами, смысл которых не может быть определен однозначно. Следовательно, истинность высшей мудрости является не абсолютной, а только относительной в соответствии с одним из значений двухзначных слов: поэтому противоположное высказывание также правомерно и мудро». Принцип дополнительности как вершину диалектики Бора относят к копенгагенской школе.

К Бору постепенно примкнули Гейзенберг, Борн, Иордан, Паули, а в некоторых вопросах и Дирак. Паули даже предложил (1932) назвать квантовую механику «теорией дополнительности». Иордан в книге «Наглядная квантовая теория» (1937) тоже свел все существо квантовой механики к идее дополнительности и утверждал, что «представление об объективной картине процессов теряет свою справедливость». Представители копенгагенской школы не признавали реальности микрообъектов и микропроцессов, отрицая причинность в элементарных процессах. Эти вопросы обсуждались на Сольвеевских конгрессах, где «копенгагенцам» рез-

216

ко возражали Лоренц, Эйнштейн, Ланжевен, Планк, Лауэ и др. Ланжевен, например, писал: «Я уверен, что, отказываясь от детерминизма, мы лишим науку ее основного движущего начала — того, что до сих пор составляло ее силу и залог ее успеха: веры в конечную познаваемость Вселенной. Ничто в переживаемых нами трудностях не оправдывает и не требует изменения наших установок, что, *по* моему глубокому убеждению, было бы равносильно отречению». Они были «детерминистами», а новый, неклассический образ природы завоевывал молодые умы.

Мысленный эксперимент А.Эйнштейна, Б.Подольского и Н.Розена был задуман для доказательства ошибочности толкования квантовой механики. Они задались вопросом, что случится, если состоящая из двух протонов частица распадется так, что протоны разлетятся в противоположных направлениях. По квантовой механике при отсутствии наблюдателя свойства протонов остаются неопределенными и могут быть представлены как суперпозиция всех возможных состояний. Означает ли это, что каждый протон движется во всех возможных направлениях? Из-за общности происхождения их свойства связаны (коррелируют) друг с другом. Так, по закону сохранения импульса, если один протон полетит вверх, то второй — обязательно вниз. Поэтому, измерив импульс одного, мы узнаем импульс и второго даже в том случае, если он уже улетел на другой конец Вселенной. Эйнштейн назвал это «действием призраков на расстоянии», которое нельзя сопоставить ни с какой реалистической моделью из обыденного опыта: все свойства каждого из протонов должны быть зафиксированы с того момента, когда они только начали свой разлет.

Допустим, неопределенность в поведении электрона зависит не только от импульса, координаты и спина, но и от каких-то других скрытых параметров, которые нам удалось познать. Можно ли в этом случае достичь полного описания, как в классической механике? Это можно осуществить для единичного измерения, но оно

так ограничит область значений скрытых параметров, что уже ко второму измерению их будет недостаточно для согласия с квантовой механикой. Гейзенберг и Бор проанализировали возможности одновременного измерения двух сопряженных величин (E, t и q, p) и провели мысленные эксперименты, подтверждающие принцип неопределенности. Получалось, что микрообъект при использовании одних приборов представляется локализованной во времени (t) и в пространстве (x) материальной точкой, не обладающей определенными импульсом (p) и энергией (E), а при использовании других приборов — как нечто, обладающее E и p , но не локализованное по x и t . Бор и его «копенгагенская школа» обобщили принцип Гейзенберга, утверждая, что в естественных науках можно пользоваться только теми величинами, для измерения которых существует опре-

217

деленная измерительная процедура и созданы соответствующие приборы. Но результат измерения получается всегда в классических величинах и понятиях, поэтому все объекты уже не существуют сами по себе, как в классической науке, а связаны с экспериментальной установкой вместе с наблюдателем и как бы теряют свою самостоятельную реальность. Впоследствии известный советский физик-теоретик В.А.Фок назвал это свойство «относительностью к средствам наблюдения».

Г. Гейзенберг активно участвовал в обсуждении философских проблем, связанных с квантовой физикой и теорией познания. Вместе с П.Дираком он выдвинул идею обменного взаимодействия, позволившую (независимо от Я.И.Френкеля) разработать первую квантово-механическую теорию ферромагнетизма, основанную на обменном взаимодействии. В начале 30-х гг. они создали *теорию дырок Дирака* и постулировали *эффект поляризации вакуума*.

В 50-е гг. Хью Эверетт предложил гипотезу «множественности миров», в которой считается, что каждое проведение измерения заставляет частицу сделать выбор, например пойти в правую или левую щель. При каждом таком выборе вся Вселенная как бы расщепляется на две. Но есть и иное мнение. Возможно, квантовая теория требует большей перестройки нашего мышления, нашей логики. Булева логика, основанная на двоичности мышления, на утверждениях типа «или—или» не дает нам возможности понять свойств частицы, проходящей через две щели, и квантовая теория может изменить наши представления о мире в большей степени, чем изменились наши понятия пространства и времени с появлением теории относительности.

6.3. Строение химических элементов и понимание Периодической таблицы Менделеева

В своей Нобелевской речи Бор отметил, что его теория объясняет молекулярные спектры, неплохо согласуясь с опытом. При переходе к объяснению строения химических элементов он предположил, что замкнутые конфигурации энергетически более выгодны и после заполнения одной оболочки начинают заполняться следующие. Это предположение помогло Паули прийти (1925—1926) к своему принципу запрета, согласно которому в каждом квантовом состоянии может находиться только один электрон. После создания Бором квантовой теории атома водорода и успехов квантовых представлений в других областях науки активно развивалась спектроскопия, которая явилась ключом в мир внутриатомных явлений.

Еще в 1896 г. П.Зееман осуществил опыт, который не успел провести Фарадей. Пламя горелки он поместил между полюсами электромагнита и наблюдал спектр. При наблюдении поперек поля кроме основной ли-

218

нии с частотой колебаний, которая была бы без поля, были две линии, смещенные в разные стороны от основной. Все три линии линейно поляризованы. При наблюдении вдоль поля несмещенной компоненты нет, а смещенные — поляризованы по кругу в противоположных направлениях. Х.Лоренц объяснил эффект Зеемана вращением электронов по круговой орбите с циклической частотой, определяемой силой Лоренца. Дж.Лармор учел прецессию электронов вокруг силовых линий магнитного поля с этой частотой. Теория Лармора — Лоренца — выдающееся достижение электронной теории, и ее авторы были удостоены Нобелевской премии за открытие и объяснение эффекта Зеемана (1902). Но квантовая теория, развиваемая А.Зоммерфельдом, не могла ничего сказать о поляризации и интенсивности линий, их определили в нормальном эффекте Зеемана с помощью принципа соответствия Бора. На практике чаще наблюдается расщепление на несколько компонентов (линий). Как указывал в 1919 г. Д.С.Рожественский, эта проблема тесно связана с магнитными свойствами атома.

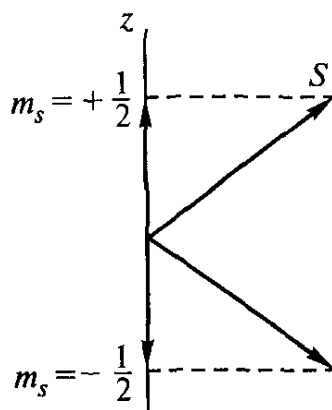
Но не был интерпретирован аномальный эффект Зеемана, когда возникало отличное от триплета расщепление линии в магнитном поле. Паули, работая у Бора два года над этой проблемой, выдвинул гипотезу *ядерного спина* для объяснения сверхтонкой структуры спектральных линий. Он считал, что необъясненные явления «возникают вследствие двузначности свойств электрона, которую нельзя описать классически» (1924). Фактически это и была гипотеза существования спина электрона, которую робко высказывал еще Комптон (1921). В 1925 г. американские физики Дж. Гаудсмит и С.Уленбек по представлению физика-теоретика П.Эренфеста опубликовали статью с предложением гипотезы *спина электрона*, ссылаясь на работу Паули, а после обсуждения с Бором, Эйнштейном и Эренфестом — большую статью в «Nature», где понятие спина объясняло многие явления в спектре.

Идея опыта состояла в использовании известного факта притяжения большим магнитом маленьких, у которых на северный и южный полюсы действуют разные силы из-за неоднородности большого магнита. В однородном поле они просто повернулись бы в направлении поля. По классической теории на экране пучок должен дать размытое изображение — магнитный момент атома может принимать любые значения. По квантовой теории следовало ожидать, что пучок или не расщепится (как должно быть у водорода), или расщепится не менее чем на три пучка (при наличии магнитного момента). Но получалось, что пучок атомов водорода, серебра, натрия, калия и других одновалентных атомов расщепляется на два пучка. Поэтому и возникла гипотеза о собственном механическом и магнитном моменте электрона.

С позиции классической теории наличие таких моментов может быть обусловлено вращением электрона вокруг собственной оси. Тогда он как вращающаяся масса будет обладать моментом импульса. А вращающийся заряд есть совокупность круговых токов, т. е. появляется и магнитный момент.

219

Рис. 6.1. К пояснению понятия спина электрона



Спин электрона имеет размерность вращательного момента-импульса, умноженного на расстояние, т. е. постоянной Планка \hbar . Вращательный момент L кратен \hbar , является целым, и ему отвечают $(2L + 1)$ различных состояний с различными значениями проекций на данную ось. Спин электрона в единицах \hbar может иметь два значения: $+(1/2)$ и $-(1/2)$, соответствующие двум значениям проекции на эту ось (рис. 6.1). Говорят, что его состояния — «вверх» и «вниз». В магнитном поле он направлен по полю или против него. В том же 1924 г. Паули сформулировал принцип: на одной орбите не могут одновременно находиться более двух тождественных частиц с полуцелыми спинами. Спин электрона описывает асимметрию электрона, неизотропность его свойств.

Паули руководствовался при написании работы аналогией спина электрона и поляризации фотона, так как для введения спина в волновую механику предложил приписать Ψ -функции две компоненты, имеющие смысл двух взаимно перпендикулярных компонент вектора, как для света. Формализм, введенный Паули, вскоре усовершенствовал Дирак, но интересны соображения Паули о введении спина в волновую механику.

Принцип Паули отражает антисимметрию волновых функций электронов, наличие у них полуцелого спина. Согласно принципу, в силу неотличимости микрочастиц исключается вероятность того, что внутри одного атома одинаковые орбиты могут быть заняты одинаковыми электронами. Или: в одном атоме не может быть двух электронов, находящихся в одинаковом состоянии по всем четырем квантовым числам, характеризующим состояние (например, электронов только с противоположными спинами). Этот принцип позволил объяснить химические свойства элементов, определяемые электронами внешних незаполненных оболочек, что, в свою очередь, дало фундаментальное физическое обоснование Периодической таблице элементов.

Запрет Паули привел к новым открытиям, к пониманию тепло- и электропроводности металлов и полупроводников. К 1927 г. Паули сумел объяснить парамагнетизм электронного газа в металле и структуру электронных оболочек в атоме.

Электронные оболочки атомов строились с помощью принципа Паули. Так была понята Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева. Каждый слой представлялся совокупностью стационарных орбит. По Бору, электроны только после заполнения оболочки начинают занимать более высокие орбиты. Методы нахождения допустимых орбит определялись **правилами квантования Бора — Зоммерфельда**, позволившими продвинуть модель Бора от водорода к другим атомам. Оказалось, что электроны

220

движутся не по окружностям, а по эллипсам, значит, находящиеся на одном эллипсе электроны должны отличаться ориентацией, а эллипсы одного слоя — эксцентриситетом. Тогда электроны, находящиеся в одном слое, отличаются энергетическим состоянием. На основании квантово-механического рассмотрения микрообъектов стало ясно, что их состояние описывается с помощью **квантовых чисел** — целых или полуцелых чисел, которые определяют возможные дискретные значения физических величин или параметров, описывающих состояние микрообъекта. Например, состояние электронов описывается четырьмя квантовыми числами.

Значения энергии, которые может принимать движущаяся частица, определяются главным квантовым числом (n): $n = 1, 2, 3, \dots$. Электронные слои обозначают большими буквами латинского алфавита K, L, M, N, O и т.д. Наибольшее количество электронов в слое равно $2n^2$, поэтому в самом близком к ядру слое K ($n = 1$) может находиться не более двух электронов, в слое L ($n = 2$) — не более восьми и т.д. Чем больше заряд ядра или порядковый номер в таблице, тем сильнее притягиваются электроны, особенно внутренних слоев, поэтому диаметры слоев с ростом номера элемента уменьшаются, и все атомы имеют почти одинаковые размеры порядка 10^{-10} м. Атомы, относящиеся к одной группе элементов таблицы Менделеева, имеют одинаковую валентность, обуславливающую их сходные химические свойства. На внешних оболочках они имеют одинаковое число электронов, которые называются валентными.

Возможные значения орбитального момента импульса в силовом поле определяются азимутальным (орбитальным) квантовым числом (l): $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Этим числом характеризуют движение электронов в атомах и молекулах, а также нуклонов в ядрах атомов. Состояния с различными значениями l отличаются величиной момента импульса, им присвоили специальные обозначения: для электрона в состоянии $l = 0$ — s -состояние, $l = 1$ — p -состояние или называют его p -электроном; далее с ростом квантового числа — d -электрон или f -электрон. Поскольку орбитальное число всегда меньше главного, то существуют состояния электрона $1s; 2s, 2p; 3s, 3p, 3d; \dots$. Состояние $1s$ является основным состоянием водорода. Ему соответствует минимум потенциальной энергии, оно самое устойчивое. Возбуждению соответствует переход на более высокое состояние, обладающее большей энергией. Поэтому для возбуждения необходимо затратить энергию. Если это энергия теплового движения, переданная при соударении, то имеем тепловое излучение — обратный переход из возбужденного состояния в основное.

Величина проекции момента импульса на выделенное направление определяется **магнитным квантовым числом** (m) по формулам квантования: $m = -l, \dots, -1, 0, +1, \dots, +l$. Выделенное направление обычно выбирают по направлению внешнего поля. Чаще всего это поле магнитное, отсюда и название квантового числа.

С собственным моментом импульса электрона, не зависящим от движения электрона в пространстве, связано спиновое квантовое

221

число (m_s): $m_s = +1/2; -1/2$. Спином обладают все элементарные частицы (кроме мезонов), это внутреннее свойство микрочастицы. Значения спинового квантового числа определяются принципом Паули.

Так принцип Паули позволил объяснить насыщение уровней. В соответствии со свойствами симметрии Ψ -функции при перестановке двух частиц для электронов возможны только антисимметричные состояния. В дальнейшем принцип Паули сыграл решающую роль при построении статистики Ферми—Дирака для частиц с полуцелым спином — **фермионов**. Для частиц с целым спином (в единицах $\hbar/2\pi$) — **бозонов** — была построена статистика Бозе — Эйнштейна. Принцип Паули не имеет аналога в классической физике, и физические причины существования этого запрета не полностью еще понятны. Паули предложил сначала простое правило, автоматически объясняющее наличие групп из 2, 8, 18 и 32 элементов. Он постулировал, что одну электронную орбиталь (или стоячую волну) могут занимать не более двух электронов. Вскоре было обнаружено наличие спина у электрона, и получилось, что принцип Паули имеет основание.

Если идти по системе химических элементов в направлении увеличения их номера, то оказывается, что электронами сначала заполняются наинизшие уровни энергии. Так, атом висмута выглядит так же, как и атом свинца, но с одним отличием — у висмута на $6p$ -оболочке на один электрон больше. Существует еще одно правило заполнения оболочек — **правило Хунда**, согласно которому, при заполнении s, p, d и т.д. уровней их сначала занимают электроны с одинаковой ориентацией спина и только потом — с противоположной. Так можно построить модели 92 стабильных атомов Периодической системы химических элементов.

Так, атом азота имеет 7 электронов; из них по два (с «правым» и «левым» спином) располагаются на уровнях $1s$ и $2s$, а остальные три — на уровне $2p$, который может вместить только 6 электронов. По правилу Хунда последние три электрона азота имеют одинаковую ориентацию спина. В волновой модели каждому из p -электронов соответствует волновая функция из двух симметричных «яйцевидных» половинок; три из них могут быть ориентированы вдоль любой из трех осей прямоугольной системы координат, в результате атом выглядит сферически симметричным. Следующий атом — кислород — должен содержать в одном из этих « p -пространств» еще один электрон с противоположно направленным спином. Это можно представить так: две полностью конгруэнтные p -орбитали проникают друг в друга, совершенно не влияя одна на другую. Периодическая система элементов теряет свою загадочность.

Само понятие спина не вытекало из теории того времени. Казалось, что при вращении электрон имел скорость, превышающую скорость света c , что противоречило СТО. Так, в тяжелых атомах скорости электронов получались порядка $0,6 c$. Непротиво-

222

речивую теорию с учетом требований СТО построил П. Дирак (1928). Из его релятивистского волнового уравнения автоматически следовало наличие собственного магнитного момента электрона. Кроме того, оно оказалось симметричным относительно знака электрического заряда. Тем самым Дирак предсказал существование антиэлектрона — **позитрона**. Позитрон был обнаружен действительно в космических лучах К. Андерсоном в 1932 г. Квантовую механику, которая согласуется с теорией относительности, называют **релятивистской**. Так началось проникновение в дискретный мир микрочастиц.

Как известно, природные химические элементы занимают в Периодической таблице места до № 92, т.е. до урана. Более тяжелых элементов нет ни на Земле, ни в метеоритах, приходящих из Космоса. Это и понятно — в ядрах атомов этих элементов больше протонов, значит, ядра таких элементов неустойчивы, а атомы —

радиоактивны. Для получения **трансурановых** элементов были созданы специальные установки, названные циклотронами, в которых создаются мощные пучки α -частиц и более тяжелых частиц для бомбардировки ими урана. Первые циклотроны были созданы в США, где были получены сначала плутоний и нептуний, а затем — вплоть до элемента № 101, который был назван менделеевием. В 1958 г. В.А.Карнаухов (СССР) оценил границы стабильности ядер (до $Z = 70$) по отношению к протонной радиоактивности и предсказал возможные протонно-активные ядра (Sc-39, Fs-63, Sb-106), в 1959 г. В. И. Гольданский предсказал возможность двухпротонной радиоактивности — одновременного испускания ядром двух протонов, а П. Е. Спивак с сотрудниками определил период полураспада свободного нейтрона.

В нашей стране получением трансурановых элементов занялась группа ученых во главе с Г. Н. Флеровым. В подмосковном городе Дубна был введен в строй более совершенный циклотрон, в котором разгонялись ядра атомов легких элементов. В начале 60-х гг. шведы, а затем американцы сообщили о получении элемента № 102 с атомной массой 254, названного нобелием. Но в 1963 г. группа Флерова получила элемент № 102 с атомной массой 256, а многочисленные трехлетние исследования показали, что изотопа с массой 254 у этого элемента нет, т.е. сообщение шведов и американцев — фальсификация, и элемент № 102 стал первым элементом, полученным в СССР. Исследовать его свойства было очень трудно, так как его атомы распадаются за несколько секунд, и изучить свойства нужно всего по нескольким атомам. Но с помощью сверхчувствительного метода газовой радиохимии, разработанного в Дубне, эта задача была блестяще решена. Новый элемент обладал химическими свойствами, соответствующими актинидам (3-я группа Периодической таблицы), и советские ученые предложили назвать его в честь Фредерика Жолио-Кюри. Затем появилось сообщение об открытии элемента № 103 в США, который был назван в честь создателя циклотрона американского физика Лоуренса.

223

В это время в Дубне был получен и исследован элемент № 104, названный в честь академика И. В. Курчатова — курчатовий. О трудности этих работ говорит тот факт, что атом этого элемента существует всего лишь 0,3 с, а этот один атом получается в течение часа работы циклотрона. В 1967 г. Г.Н.Флеров высказал идею, что перспективным методом синтеза новых элементов может явиться деление сверхтяжелых составных ядер. В 1974— 1975 гг. группа советских ученых во главе с Ю. Ц. Оганесяном осуществили синтез элементов № 106 и 107.

Новые частицы образовывались и в специальных устройствах — ускорителях. Если до середины века казалось, что существуют жесткие ограничения на передаваемую атомам энергию, связанные с увеличением массы разгоняемой частицы при скоростях, сравнимых со скоростью света (как в циклотронах), то благодаря работам советских физиков появились новые типы ускорителей. Академик В. И. Векслер предложил в 1944 г. принцип «автофазировки» ускоряемых частиц, что открыло новые возможности перед ядерной физикой и физикой элементарных частиц. На этом принципе в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне были созданы фазотроны (с изменением частоты электрического поля), синхротроны (с изменением напряженности магнитного поля) и синхрофазотроны (комбинация обоих методов). В этих новых типах ускорителей поток заряженных частиц направляется на неподвижную мишень, и часть энергии расходуется на ускорение частиц мишени, что удорожает эксперименты. Академик Г. И. Будкер предложил создать ускоритель на встречных пучках, т. е. встречный пучок и играет роль мишени. Такой ускоритель был создан в Институте ядерной физики в Новосибирске.

6.4. Радиоактивные элементы и возможности превращения элементов

Закон спонтанного распада радиоактивных атомов связывает радиоактивные превращения с уже известными видами естественной радиоактивности — α -, β - и γ -лучами. Возникающие при радиоактивном распаде новые элементы исследовали Ф. Содди с Э.Резерфордом (1902). Они пришли к выводу, что «радиоактивность — атомное явление, сопровождающееся химическими изменениями, в котором порождаются новые вещества. Эти изменения должны происходить внутри атома, а радиоактивные элементы являются, должно быть, спонтанными превращениями атомов». В 1903 г. Содди доказал, что в радиации через несколько месяцев появляется гелий. Резерфорд догадался, что гелий образуется α -частицами, испускаемыми радием. Но только с использованием счетчика α -частиц (счетчик Гейгера) стало понятно, что α -частицы — это ионы гелия (1908). Содди строил «генеалогические» схемы радиоактивных

224

веществ. Основной закон радиоактивного распада — закон убывания активности эманации со временем по экспоненте, причем каждому веществу соответствовал свой период полураспада — установили Содди и Резерфорд. И по содержанию урана, свинца и гелия, присутствующих в урановой руде, стало возможно определить возраст Земли. Итак, среднее время жизни элемента — это точно определенная константа для каждого элемента (см. рис. 2.5). Особенность этого закона в том, что он — **статистический**: проявляется яснее, если число распадающихся атомов больше. Но он отличался от статистических законов классической физики, которые могут рассматриваться суммой

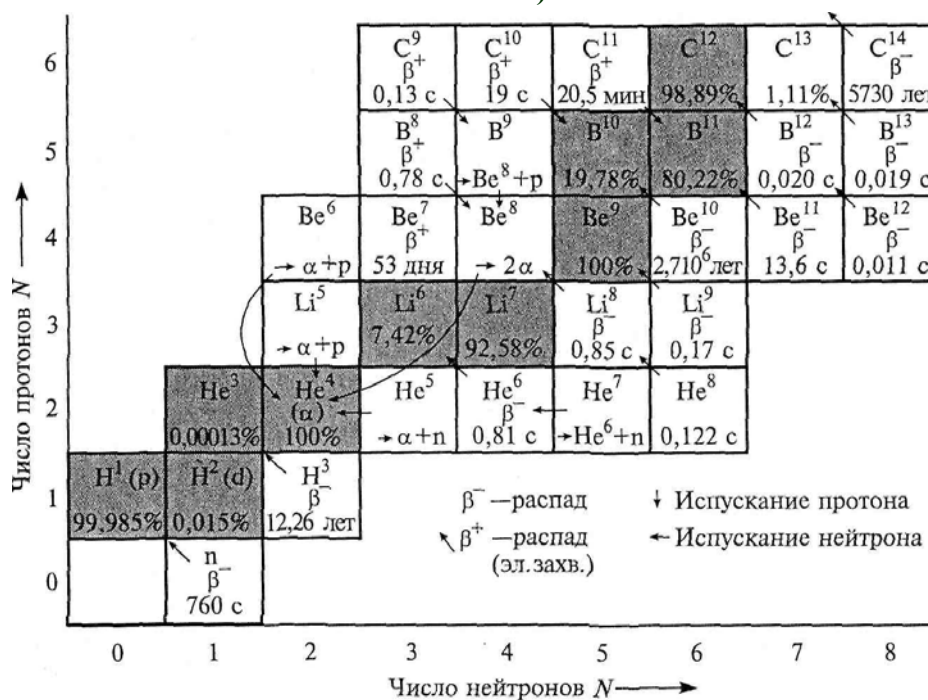
частных динамических законов, вызываемых внешними причинами. Причины превращений нужно искать в самом атоме, и любая теория строения атома должна удовлетворять требованиям недопущения «старения» вещества, как выразилась М.Кюри. Возникла новая концепция закона, данного безотносительно к поведению индивидуальных объектов, составляющих совокупность. Менялась общая направленность вопросов: вместо того, чтобы интересоваться, почему один атом распадается через сутки, а другой — через 1000 лет, стали определять количество атомов для данного элемента, распадающихся за 1 с. Эйнштейн использовал идею этого закона при получении одного из основных квантовых статистических законов излучения (1916). И как каждый радиоактивный атом взрывается в результате случайного процесса в некий непредвиденный момент без видимой на то причины, так и переход в атоме должен происходить по статистическим законам. Затем он пересмотрел на этой основе теорию броуновского движения, получил формулу Планка для излучения абсолютно черного тела и показал, что при каждом элементарном акте излучения должен испускаться фотон с импульсом в совершенно случайном направлении. Хотя данные работы по квантовой теории излучения статистичны, Эйнштейн оставался детерминистом — он считал точный момент перехода электрона, определяемым по законам причинности, которые зависят от структуры возбужденного атома. И статистический метод он использовал как бы от незнания этих законов.

Весной 1913 г. Содди сформулировал правило: испускание α -частиц уменьшает атомную массу элемента на 4 и смещает его на два места влево по Периодической таблице, а испускание β -частицы смещает элемент вправо на одно место, почти не меняя атомной массы (рис. 6.2). Значит, химические свойства элементов (по крайней мере, радиоактивных) связаны не с атомной массой, как это утверждала классическая химия, а с внутриатомным электрическим зарядом.

Самопроизвольный распад и образование новых элементов изучали с начала XX в. Так, при обработке драгоценных камней на Цейлоне был

225

Рис. 6.2. Диаграмма, иллюстрирующая правила смещений атомов при радиоактивных превращениях (по оси ординат — массы атомов, по оси абсцисс — порядковый номер элемента)



открыт новый минерал — торинит, который в Англии исследовали У.Рамзай и О.Ган. Они получили вещество, соответствующее торию, но с большей радиоактивностью, и назвали его радиоторием. Среднее время его жизни оказалось 2 года. Значит, им можно было бы заменить дорогостоящий радий в лабораторных опытах, но они не смогли выделить радиоторий никакими химическими методами. В 1907 — 1910 гг. подобные проблемы возникали при выделении некоторых других радиоактивных элементов. После открытия нейтрона опыты по бомбардировке α -частицами продолжались, меняя представления об элементах и показывая возможность превращения одних элементов в другие.

Содди, как и другие, не мог отделить ионий от тория никакими химическими способами. Это было странно, поскольку большинство радиоактивных элементов расположено в Периодической таблице вблизи инертных газов, а свойства элементов в этой части таблицы легко предсказываются, поэтому они и должны

легко отделяться. Кроме того, в этой части таблицы нет свободных клеток. Расчеты по модели атома Томсона показывали, что число электронов в атоме пропорционально атомному весу. Так Содди пришел к выводу и показал (1913), что в одной клетке таблицы могут быть элементы с разной атомной массой, но обладающие одним зарядом ядра и одинаковыми свойствами. Содди

226

назвал их **изотонами** (от греч. *iso* — **одинаковый** + *tope* — **место**). Впоследствии установили, что в состав ядра помимо протонов входят нейтроны, которые и изменяют атомные массы.

Английский физик Ф.Астон еще в 1913 г. разделял изотопы методом газовой диффузии. Он предложил электромагнитный метод: ионизованные атомы отклоняются электрическим или магнитным полем, а величина отклонения зависит от массы. В 1919 г. Астон сконструировал первый масс-спектрограф, который свел проблему к простой лабораторной операции, и произвел революцию в исследовании изотопов. Астон выяснил почти все об изотопах. Он открыл и изучал большое число стабильных изотопов. Все опытные факты, полученные в лаборатории Резерфорда, относились к радиоактивным элементам, поэтому необходимо было получить подтверждение, что и нормальные атомы устроены аналогично.

Первое искусственное расщепление ядра атома было осуществлено в лаборатории Резерфорда в Кембридже. Он изучал столкновение α -частиц с легкими атомами. От таких ударов частицы ускорялись: ядро водорода, например, увеличивало свою скорость в 1,6 раза, на что оно отбирало у частицы 64 % ее энергии. Такие ускоренные ядра наблюдал в 1914 г. Марсден. Первая мировая война затормозила эти исследования, и лишь в 1919 г. Резерфорд стал облучать азот α -частицами, наблюдая появление однозарядных ионов водорода, названных Марсденом **протонами**. Их получалось очень мало: на миллион α -частиц — 20 протонов. Кроме протонов Резерфорд получил и изотоп кислорода с массой 17.

Первую **ядерную реакцию** с искусственным превращением элементов осуществили в 1921 г. Резерфорд и Дж.Челвик из ядер азота получили ядра изотопа кислорода при бомбардировке α -частицами. В 1932 г. И. и Ф.Жолио-Кюри сфотографировали следы протонов в камере Вильсона, выбиваемых из парафина бериллиевым излучением. Вновь возникла проблема источника энергии — появление протонов требовало рождения в бериллии фотонов с энергией 50 МэВ. Чедвик показал, что эти трудности снимаются, если предположить, что излучение бериллия состоит из частиц с массой, примерно равной массе протонов, и нулевым зарядом. Результаты исследований этих реакций Чедвик опубликовал в 1932 г., назвав эти частицы **нейтронами** (от лат. *neutrum* — **ни то, ни другое**). Существование нейтронов вскоре было подтверждено: они испускались ядрами аргона, натрия и алюминия при облучении их α -частицами. Свободный нейтрон нестабилен, он распадается на протон, электрон и нейтрино с периодом полураспада 11,7 мин.

Расщепления атомов кислорода под действием нейтронов добились в том же 1932 г. Л.Майтнер и К.Филипп. Впоследствии были получены расщепления и других атомов. «Большая эффективность нейтронов в получении ядерных реакций, —

227

говорил Чедвик, — легко объясняется. При столкновении заряженной частицы с ядром вероятность ее проникновения в ядро ограничена кулоновской силой. И это определяет то минимальное расстояние, на которое может приблизиться частица и которое возрастает с увеличением атомного номера ядра и становится столь большим, что вероятность проникновения в ядро становится малой. В случае соударения с ядром нейтрона ограничения такого типа не возникает. Сила взаимодействия нейтрона с ядром очень мала, только на малых расстояниях она начинает быстро расти и носит характер притяжения. Вместо потенциального барьера, как в случае заряженных частиц, нейтрон встречает «потенциальную яму». Поэтому даже нейтроны слабых энергий могут проникать в ядро».

В 1928 г. молодой советский физик Г. А. Гамов и независимо от него Р.Гарни и Э.Кондон создали квантово-механическую **теорию α -распада**. Было непонятно, как α -частица могла преодолеть потенциальный барьер и выйти из ядра. Гамов использовал аналогию с частичным проникновением света во вторую среду при падении на границу раздела двух сред под углом, большим угла полного внутреннего отражения, и объяснил явление с помощью волновой механики.

После открытия нейтронов стала актуальной **проблема состава ядра**. В 1930 г. В.А.Амбарцумян и Д.Д.Иваненко и независимо от них П.Дирак высказали идею, что электронов в ядре вообще нет. Но научное сообщество отнеслось к этой идее весьма скептически. После открытия нейтронов Иваненко предположил, что ядра состоят только из протонов и нейтронов (1932). Гипотеза Иваненко, привлекательная своей простотой, была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений, быстро распространилась и стала использоваться. Протоны и нейтроны как основу строения ядра стали называть **нуклонами**. Проблема ядерных сил до сих пор не решена, хотя эта гипотеза лежит в основе современной теории строения ядра.

Теорию β -распада в 1936 г. выдвинули Паули и итальянский физик Энрико Ферми. Они предположили, что в ядре происходит превращение нейтрона в протон с одновременным испусканием электрона и нейтрино (нейтральной частички, обладающей ничтожной массой и собственным моментом вращения, или спином, равным 1/2). Испускание электрона происходит примерно так же, как фотон испускается атомом. Впоследствии, опираясь на теорию β -распада, Ферми построил цикл термоядерных реакций (протон-

протонный), который лежит в основе происхождения энергии Солнца и звезд. Доказать справедливость теории можно лишь обнаружением конечных продуктов этих реакций — нейтрино.

Фотографии протона, вылетающего при столкновении α -частицы с атомом азота, получил в камере Вильсона ученик

228

Резерфорда П. Блэккет (1925). Но это явление, т.е. *расщепление ядра*, происходило очень редко: на 23 000 фотографий с 460 000 траекторий частиц только в восьми случаях наблюдался вылет протона. Значит, α -частицы неэффективны для получения расщепления. Теория Гамова показывала путь ее повышения — нужно придать частице энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера. Для маленьких частиц вероятность проникновения больше, поэтому, разогнав протоны до большой скорости, можно добиться с ними большей эффективности, чем у α -частиц.

Для сравнения произведем оценку возможности теории Гамова. В атомной физике $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж (1 эВ) соответствует энергии, приобретаемой частицей с зарядом e при прохождении разности потенциалов 1 В. Энергия наиболее быстрых α -частиц, испускаемых радиоактивными веществами, равна $12,8 \cdot 10^{-13}$ Дж (8 МэВ). В 1925 г. для получения рентгеновских лучей использовались мощные индукционные катушки с разностью потенциалов порядка 100 кВ. Значит, ускоренный в таком поле электрон (или протон) мог приобрести энергию $0,16 \cdot 10^{-13}$ Дж (0,1 МэВ). Но теория Гамова предсказывала, что протоны с энергией $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж (1 МэВ) будут по эффективности равны α -частицам с энергией $51,2 \cdot 10^{-13}$ Дж (32 МэВ). Идея была привлекательной, и начали строить все более мощные установки с огромными напряжениями. Возникла современная алхимия, как выразился Резерфорд.

Космические лучи, открытые еще в 1904 г., привлекали и астрономов, и геофизиков. Лучи вызывали первичную ионизацию воздуха, возрастающую с высотой. После первой мировой войны их изучение возобновилось не только на высотах, но и в глубинах водоемов. Космическое излучение считалось состоящим из γ -квантов, вызывавших в атмосфере β -излучение. Д. В. Скобельцын, основатель советской школы физики атомного ядра и космических лучей, впервые исследовал эти лучи с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, и установил, что ионизация воздуха создается не γ -квантами, а быстрыми β -лучами при энергии $3,2 \cdot 10^{-13}$ Дж (200 МэВ). Дальнейшие исследования показали, что первичные космические лучи, состоящие в основном из протонов, действительно рожают быстрые β -лучи.

Американский физик К. Андерсон продолжил исследования лучей по методу Скобельцына и обнаружил (1932) на фотоснимках треков (следов) в камере положительные электроны, которые назвал *позитронами* (одновременно их открыли в Англии Блэккет и Оккиалини). Тут и вспомнили о релятивистском уравнении для электрона, полученном Дираком еще в 1928 г., где предсказывалось существование положительно заряженных электронов. Велись активные поиски позитрона в самых разных процессах. При облучении ядер тяжелых элементов жесткими γ -квантами зафиксировали рождение пар электрон — позитрон — так материя γ -кванта перешла

229

в материю электрона и позитрона. В 1933 г. Ф. Жолио продемонстрировал фотографию в камере Вильсона, где было зарегистрировано рождение пары электрон — позитрон. Затем было открыто превращение пары электрон — позитрон в два γ -кванта — этот процесс назвали *аннигиляцией*. Образование позитрона было обнаружено и при взаимодействии с ядрами α -частиц и нейтронов. Так в очень короткий срок стало известно о существовании *античастиц*.

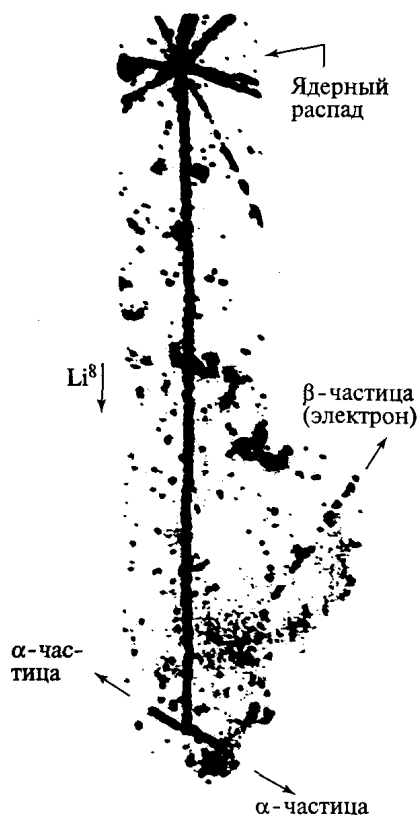
Искусственные радиоактивные элементы открыли И. Кюри, дочь П. и М. Кюри, и ее муж, Ф. Жолио (1934). Годом раньше они установили, что при бомбардировке α -частицами некоторых легких элементов возникают позитроны, испускающиеся и после реакции. Из энергетических соображений сначала α -частица захватывается ядром алюминия с мгновенным испусканием нейтрона и образованием радиоактивного атома (изотопа фосфора с атомной массой 30), затем этот нестабильный атом (названный радиофосфором) распадается с испусканием позитрона и превращается в уже устойчивый изотоп кремния. Этот новый вид радиоактивности, помимо α -, β -, γ -лучей, сопровождался испусканием античастиц — позитронов. Так им «удалось впервые с помощью внешнего воздействия вызвать у некоторых ядер радиоактивность, которая сохраняется в течение измеримого времени в отсутствие вынуждающей причины». Появились новые изотопы, которые до этого в природе не наблюдались. Открытие искусственной радиоактивности имело большое значение для науки и нашло огромное применение в биологии и практической медицине. К настоящему времени из 2000 радиоактивных изотопов только 300 имеют естественное происхождение.

Опыты по **бомбардировке нейтронами ядер тяжелых элементов** проводил Ферми. За одно лето 1934 г. он облучил 60 элементов и получил 40 радиоактивных продуктов. Выяснилось, что при захвате ядрами медленных нейтронов могут образовываться радиоактивные изотопы тех же или последующих элементов. Так, при облучении урана найдены изотопы нескольких веществ с периодами полураспада 10 с, 40 с, 13 мин и 100 мин. Ферми отметил, что последние два не являются изотопами элементов между номерами 82 и 92. Так были открыты трансурановые элементы. К 1939 г. было получено около 400 новых радиоактивных веществ. Кроме того, Ферми отметил, что эффективнее действуют «замедленные» (или тепловые) нейтроны, предварительно прошедшие через воду или парафин. Эту кажущуюся парадоксальной ситуацию Ферми

объяснил с позиций волновой механики. Ферми собрал группу своих учеников, и они облучили нейтронами 63 элемента, из которых для 37 было установлено явление искусственной радиоактивности.

Возникла идея, что нейтроны (в отличие от α -частиц) могут расколоть ядро на большие осколки. В 1938 г. О. Ган и Ф. Штрасс-
230

Рис. 6.3. Схема ядерного распада



сман обнаружили барий после бомбардировки нейтронами урана. При этом выделялась энергия порядка 200 МэВ, что соответствовало энергии, связанной с *дефектом массы* при образовании бария и криптона. Работавшая с ними до прихода нацизма Л. Майтнер, ее племянник О.Фриш, вынужденные бежать в Копенгаген к Бору, и Ф.Жолио поняли реакцию и употребили первыми термин «деление». 26 января 1939 г. Бор сообщил об открытии деления урана на конференции в Вашингтоне, 30 января в Парижской Академии наук об этом же сообщил Ф.Жолио, а 20 февраля он продемонстрировал эффект «взрыва», заснятого в камере Вильсона (рис. 6.3).

Исследования конца 30-х гг. стимулировали развитие представлений о структуре ядра, которое тогда рассматривали как твердое тело, склеенное из α -частиц и нуклонов. Поэтому столкновение могло упруго выбить лишь их. Бор объяснил деление резонансными явлениями при захвате нейтрона ядром «редкого изотопа урана 235» (в природном уране его только 0,711 %). В 1939 г. ленинградский физик-теоретик Я. И. Френкель дал объяснение этому на основе модели ядра в виде *жидкой капли*: ядро должно обладать огромным поверхностным натяжением (порядка 10^{16} Н/м). Капельная модель позволила определить границы устойчивости ядер, попадание нейтрона приводит к электрокапиллярным колебаниям капли, что и вызывает ее деление почти пополам. Впоследствии эту теорию разрабатывали Н. Бор и Дж. Уилер (1940). В том же году были проведены опыты по самопроизвольному делению ядер урана (Г. Н. Флеров, К.А.Петржак), которые доказали наличие этого механизма деления.

Вскоре было обнаружено, что при делении урана появляются *свободные нейтроны*, которые, попадая в ядро урана, могут вызвать новый процесс деления. Появились и теоретические работы, в которых формулировались конкретные условия для получения ядерной взрывной реакции деления. Наиболее значительных результатов в этом направлении достигли физики-теоретики
231

Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон (ученики Н.Н.Семенова), впервые осуществившие расчет цепной реакции деления урана.

Они выделили условия, необходимые для замедления процесса высвобождения ядерной энергии, и писали: «Для осуществления условий цепного взрыва урана необходимо для замедления нейтронов применять тяжелый водород или, может быть, тяжелую воду, или какое-нибудь другое вещество, обеспечивающее достаточно малое сечение захвата. Значительное по сравнению с водородом сечение рассеяния и несколько меньшая эффективность обмена энергией могут компенсироваться ничтожно малым сечением захвата

нейтронов и связанной с этим возможностью чрезвычайного разбавления урана... Другая возможность заключается в обогащении урана изотопом ^{235}U . Так они показали, что при небольшом увеличении доли более легкого изотопа урана и воды, замедляющей нейтроны, можно в массе урана, большей, чем «критическая», получить постепенное высвобождение огромного количества энергии. Реакцию делают управляемой, замедляя нейтроны с помощью графитовых стержней. Открытие деления урана ознаменовало начало эры ядерной физики. После того как удалось расщепить ядра урана и плутония, сумели добиться быстрого и интенсивного высвобождения энергии, необходимой для взрыва атомной бомбы.

В 1942 г. под руководством итальянского физика Э.Ферми был запущен первый атомный реактор в США и уже через 4 года в СССР под руководством И. В. Курчатова. Советский атомный реактор стал первым в Европе (1946), он производил искусственное ядерное горючее — плутоний. Потом появились и заводы по обогащению урана легким изотопом ^{235}U . Во время второй мировой войны в Германии и странах антигитлеровской коалиции велись интенсивные работы по созданию атомного оружия. Казалось, овладение таким оружием сможет сразу прекратить войну. Первые атомные бомбы были сброшены американскими летчиками на японские города Хиросиму и Нагасаки в августе 1945 г., продемонстрировав всему миру мощь США. В июне 1946 г. в комиссии ООН по атомной энергии советская делегация внесла проект Международной конвенции «О запрещении производства и применения оружия, основанного на использовании атомной энергии, в целях массового уничтожения».

В декабре 1946 г. в СССР была впервые в Европе осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция в экспериментальном реакторе на тепловых нейтронах, а через полтора года — пущен первый промышленный реактор для наработки оружейного плутония. Тепловыми (медленными) называют нейтроны, обладающие малыми значениями энергии (до 45 МэВ). Медленные нейтроны поглощаются $^{238}_{92}\text{U}$, не выдавая деления, и превращают его в ядро радиоактивного изотопа $^{239}_{93}\text{U}$ с периодом полураспада 23 мин; после этого получается ядро трансуранового элемента нептуния $^{239}_{93}\text{Np}$, который имеет период полураспада 2,3 сут. Затем получается $^{239}_{94}\text{Pu}$ с периодом полураспада 24 100 лет, поэтому его можно накапливать в больших количествах. И несмотря на тяжелые послевоенные годы в СССР в апреле 1949 г. был запущен опытный реактор на тяжелой воде мощностью 500 кВт и началось получение обогащенного ^{235}U . В августе того же года на Семипалатинском полигоне были проведены

232

успешные испытания атомной (плутониевой) бомбы в нашей стране, и монополия США была разрушена. Сборка самой бомбы осуществлялась в 60 км южнее города Арзамас, в лаборатории Арзамас-16 (аналог американской в Лос-Аламосе), которую возглавлял Ю.Б.Харитон. В 1951 г. была взорвана советская атомная бомба, изготовленная из урана-235, и вступил в строй реактор для получения трития — основного изотопа, применяемого при термоядерных реакциях. Годом ранее советские физики предложили изолировать горячую плазму от стенок установки с помощью магнитного поля и сделали необходимые расчеты. Но в СССР не только добились создания атомного оружия — в том же 1951 г. в стране начался серийный выпуск радиоизотопной аппаратуры на изотопе кобальт-60 для нужд промышленности, строительства и медицины.

Для решения научных задач, связанных с созданием водородной бомбы, инициатива создания которой принадлежала Э.Теллеру, в нашей стране была создана группа во главе с академиком И.Е.Таммом, где наиболее активным и результативным сотрудником оказался А.Д.Сахаров, только что защитивший кандидатскую диссертацию по теории атомного ядра. Хотя общее руководство проектом осуществлялось И.В.Курчатовым, а руководителем работ и главным конструктором был Ю.Б.Харитон, в конструкции бомбы реализованы основополагающие идеи А.Д.Сахарова, и его по праву называют «отцом водородной бомбы». В 1953 г. в Семипалатинске прошли первые в мире испытания водородной бомбы, а затем заработала и первая в мире атомная станция в городе Обнинске мощностью 500 кВт (1954). Хотя при работе реактора используется энергия деления ядер, а не атомов, в популярной литературе сложилась терминология «атомная энергетика», АЭС вместо «ядерная энергетика».

В ядерном топливе заключена огромная концентрация энергии; для сравнения — для обеспечения работы ТЭЦ мощностью 1 млн кВт необходимо расходовать около 4 — 5 млн т угля в год, а для запуска АЭС с реактором ВВЭР-1000 при той же мощности нужно загрузить в реактор примерно 70 г ядерного топлива, меняя в год около 23 г. Хотя мощность этой первой в мире атомной станции была невелика, она явилась хорошей школой для подготовки специалистов по атомной энергетике, а опыт ее безаварийной работы позволил развернуть широкое строительство мощных атомных станций с различными типами реакторов. Так теоретические исследования были воплощены в технологии, укрепили политическое положение страны, обеспечили энергетику. С использованием атомной энергии стали работать и разнообразные транспортные средства.

В 1956 г. на судовой верфи адмиралтейского завода в Ленинграде был заложен атомный ледокол «Ленин» с ядерной энергетической установкой, который начал навигацию весной 1960 г. Впоследствии атомные энергетические установки были с успехом использованы на ледоколах «Арктика»,

233

«Сибирь», контейнеровозе «Севморпуть» и других, а затем и на атомных подводных лодках, составлявших гордость советских ВМС. В 1958 г. был объявлен первый советский односторонний мораторий на испытание

атомного оружия, начала работу экспериментальная термоядерная установка «Огра». В 70-е годы был запущен первый в мире термоэмиссионный реактор-преобразователь «Топаз-1». А разработанные изотопные генераторы и плазменные двигатели успешно работали на космических аппаратах «Кос-мос-34», «Космос-90», «Зонд-2», «Луноход-1», «Луноход-2» и др. В 1975 г. была проведена первая в мире операция по вживлению в организм радиоизотопного кардиостимулятора. Была запущена импульсная термоядерная установка «Ангара» (1983) и термоядерная установка «Токамак» (1988).

6.5. Представления о строении атомного ядра

В экспериментально установленном Резерфордом (1911) ядерном строении атома были две частицы — ядро и электрон. Появилась гипотеза строения атома из этих двух частиц. Ядро характеризовалось зарядом и массой. Заряд ядра равен $+Ze$, где Z — атомный номер, совпадающий с номером в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева; $+e$ — элементарный заряд ядра; масса ядра примерно равна A , где A — массовое число; m_p — масса протона, равная 938,28 МэВ, а масса электрона — 0,511 МэВ. Протон имеет спин, равный $1/2$, и собственный магнитный момент $\mu_p = +2,79\mu_y$, где $\mu_y = eh/(4\pi m_p) = 5,05 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл — единица магнитного момента, называемая *ядерным магнетоном*. Казалось бы, модель ядра построить нетрудно при заданных A и Z , в нем A протонов и $A-Z$ электронов. Но она противоречива. Так, например, для азота ($A = 14$, $Z = 7$) в ядре должно быть 14 протонов и 7 электронов, т.е. из 21 частицы с полуцелым спином $s = 1/2$. Но эксперимент дает $5=1$ (спин ядра азота равен единице).

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Масса нейтрона $m_n = 939,57$ МэВ, т.е. близка к массе протона ($m_n - m_p = 1,3$ МэВ), что соответствует $2,5 m_e$. Заряд нейтрона равен нулю, а спин $s = (1/2)$, нейтрон обладает и собственным магнитным моментом $-\mu_n = -1,91 \mu_y$. Здесь знак «-» означает, что направления собственного магнитного и механического моментов у нейтрона противоположны. В свободном состоянии нейтрон оказался нестабильным — он самопроизвольно распадается (с периодом полураспада 12 мин), превращаясь в протон и электрон, испуская еще одну частицу — антинейтрино: $p + e^- + \bar{\nu}$. Масса нейтрино чрезвычайно мала, она много меньше даже массы электрона. Масса нейтрона превышает массу протона на $2,5 m_e$, поэтому можно сказать, исходя из закона сохранения массы при этом превращении нейтрона, что она больше, чем масса протона, электрона и нейтрино на $1,5$ масс электрона, или на 0,77 МэВ. Эта энергия и выделяется при распаде нейтрона в виде кинетической энергии образующихся частиц.

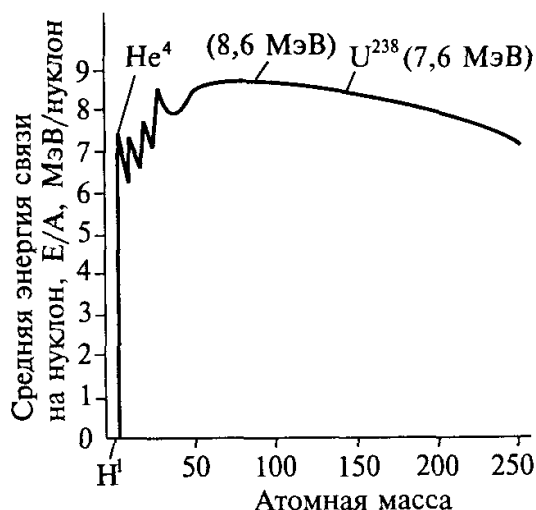
234

Таким образом, в протонно-нейтронной модели ядра оно характеризуется своим зарядовым числом Z , равным числу протонов в ядре, при этом число нейтронов $N = A - Z$. Поэтому ядра (элемента X) и обозначают символом вида ${}_Z^AX$. Ядра с одинаковым зарядовым числом (или порядковым номером в Периодической системе) и разными A называют *изотопами*. Например, у кислорода есть три стабильных изотопа: $A = 16, 17, 18$; у водорода тоже три: $A = 1, 2, 3$. Все изотопы водорода имеют одинаковые свойства, отличаясь только массами. У более тяжелых элементов, например урана-235, в ядре 92 протона и 143 нейтрона. В природной смеси на долю урана-235 приходится всего $1/144$ от урана-238. Безусловно, относительная разница в массе невелика, и проблема отделения одного изотопа от другого усложняется. Но большинство элементов в природе встречается именно в смеси изотопов. Размеры ядер $r = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{(1/3)}$ м = $1,3 A^{(1/3)}$ Ф, где Ф (ферми) — единица длины, используемая в ядерной физике, равная 10^{-15} м. Спин ядра определяется сложением из спинов нуклонов, каждый из которых равен $(1/2)$, поэтому он зависит от числа нуклонов в ядре. Когда в 1932 г. выяснилось, что ядро фактически состоит из протонов и нейтронов, вопрос о природе ядерных сил приобрел важное значение. Действие ядерных сил не наблюдается в макроскопических масштабах, приходится предполагать существование сил, в сотни раз превышающих действие электрических сил и вызывающих притяжение нуклонов друг к другу. Эти мощные силы действуют на очень коротких расстояниях, так что далее 10^{-14} м их действие не ощущается. Но ядра прочны и стабильны, и существуют опыты по рассеянию нуклонов. Неустойчивы только ядра элементов, расположенных в конце Периодической системы элементов. Теория ядерных сил должна дать объяснения этому. Но когда стало известно, что ядра могут делиться и превращаться в другие ядра, еще острее встал вопрос о том, что же удерживает их вместе.

Масса ядра оказалась меньше суммы масс входящих в него частиц. Это связано с тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия их связи друг с другом. Как известно из СТО, энергия покоя частицы связана с ее массой соотношением: $E = mc^2$. Это означает, что энергия покоящегося ядра меньше суммарной энергии невзаимодействующих нуклонов. Эта разница составляет величину: $E_{CB} = c^2[(Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{я}]$. Она называется энергией связи в ядре и равна работе, которую нужно совершить для того, чтобы разделить нуклоны в ядре и разнести их на расстояния, где они бы не взаимодействовали. Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, E_{CB}/A называется *удельной энергией связи* в ядре, величина $\Delta = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{я}$ — *дефектом массы* ядра. Дефект массы связан с энергией соотношением $\Delta = E_{CB}/c^2$. Приведем оценки атома гелия. В состав ядра входят 2 протона и 2 нейт-

235

Рис. 6.4. Зависимость удельной энергии связи от атомной массы



рона, масса атома равна 3728,0 МэВ; масса атома водорода — 938,7 МэВ, а нейтрона — 939,57 МэВ. Подставив эти значения в формулу для энергии связи, получим: $E_{\text{св}} = (2 \cdot 938,7 + 2 \cdot 939,5) - 3728,0 = 28,4$ МэВ. Если это значение разделить на число нуклонов, получим 7,1 МэВ, тогда как энергия связи валентных электронов порядка 10 эВ, т.е. в миллион раз меньше. Если найти значения удельной энергии связи для других элементов, то она в зависимости от массового числа будет иметь вид, изображенный на рис. 6.4. График имеет отдельные пики и провалы для определенных изотопов. Энергия связи на один нуклон в общем растет с увеличением атомного номера, но для определенных комбинаций получаются исключения, которые можно как-то объяснить, считая, что при контактном взаимодействии достигается большая связь между нуклонами, т.е. нуклоны на поверхности ядра меньше связаны, чем внутри него. При числе нуклонов более пятидесяти, по-видимому, начинает проявляться и кулоновское отталкивание, так что полная энергия связи на нуклон уменьшается.

При расщеплении ядер с большими номерами можно получить ядра с меньшими номерами и выделить при этом энергию. Например, разделяя ядро ^{235}U на два меньших, на что тоже нужна энергия (энергия связи на нуклон примерно равна 7,6 МэВ у ^{235}U , а у ядер средних размеров — 8,6 МэВ, т.е. разница на один нуклон составляет 1 МэВ), на каждое ядро урана получим 200 МэВ при расщеплении его на два меньших, например барий и криптон. Но самопроизвольно этот процесс не начинается, он должен быть запущен. В случае с ^{235}U таким спусковым крючком служит захват ядром нейтрона, а далее реакция идет сама по типу цепной реакции деления. Ядра с несбалансированным числом протонов и нейтронов могут (при определенных условиях) превращаться в другие ядра, испуская ядро атома гелия (α -частицу) или электрон (+ или -, так называемый процесс распада), или остаться после испускания частицы в возбужденном состоянии, а потом испустить γ -квант. Тяжелые радиоактивные элементы распадаются поочередно этими способами, образуя ветви или радиоактивные семейства. Спадение кривой для тяжелых элементов связано с ростом кулоновского отталкивания между протонами. Наличие систематического хода кривой с максимумом при A порядка 50 — 60 (в середи-

236

не Периодической системы элементов Д. И. Менделеева: от криптона до цинка) показывает, что эти элементы обладают наибольшей связью и наиболее устойчивы. Их энергия связи достигает 8,6 МэВ/нуклон, тогда как у урана — 7,5 МэВ/нуклон. Такая зависимость делает возможными два процесса: деление тяжелых ядер на несколько легких и синтез легких ядер в одно ядро. Оба эти процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, деление ядра с массовым числом $A = 240$ (с удельной энергией связи 7,5 МэВ) на два пополам с $A = 120$ (удельная энергия связи равна 8,5 МэВ) привело бы к высвобождению энергии в 240 МэВ. Реакция синтеза двух ядер тяжелого водорода с $A = 2$ в ядро гелия привела бы к выделению энергии в 24 МэВ. Для сравнения, сгорание угля до CO_2 (соединение углерода с двумя атомами кислорода) дает всего 5 эВ.

Особая устойчивость ядер в середине Периодической системы химических элементов объяснима. Для расщепления тяжелого ядра атома на части необходимо пройти ряд промежуточных стадий, для чего требуется дополнительная энергия — *энергия активации*. Она может быть сообщена тяжелому ядру захваченным им дополнительным нейтроном. Такой процесс при захвате нейтрона ядром урана или плутония лежит в основе реакции деления в ядерных реакторах или атомной бомбы. В обычных условиях атомы не распадаются, им неоткуда получить дополнительную энергию. Для того чтобы произошло слияние легких ядер, они должны подойти на расстояние порядка 10^{-15} м, но такому сближению препятствует кулоновское отталкивание между ними. Чтобы преодолеть его, ядра должны двигаться с огромными скоростями, соответствующими температурам в сотни миллионов кельвин. Поэтому реакции синтеза и называют

термоядерными, такие реакции происходят в недрах Солнца и звезд, в водородных бомбах.

Согласно **капельной модели ядра**, малый радиус действия ядерных сил (как у межмолекулярных сил жидкости) и примерное постоянство средней энергии связи на нуклон были использованы Я.И.Френкелем в модели ядер с большим числом нуклонов. Из-за заряда протонов «капля» стала наэлектризованной. Так как энергия связи уменьшается с увеличением номера элемента, а начиная со значения $Z = 83$ ядра вообще теряют устойчивость, ядерные силы должны быть очень близкодествующими и подчиняться принципу Паули (если пара протонов с противоположно направленными спинами находится в каком-то определенном состоянии, то следующий протон должен занять место с большей энергией), и рост ядра ограничивается. Как только энергия возрастает, устойчивость ядра уменьшается. Квантовая теория строго ограничивает энергетические процессы в ядрах.

Поскольку взаимодействие между заряженными частицами переносится через электромагнитное поле, которое можно предста-

237

вить и совокупностью фотонов, то говорят, что это взаимодействие осуществляется через обмен фотонами. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Но это модельное описание не следует понимать буквально, происходит обмен не реальными фотонами, а воображаемыми, виртуальными. В силу принципа неопределенности $\Delta E \Delta t > \hbar$ этот испущенный фотон будет вскоре поглощен, иначе нарушится закон сохранения энергии. В самом деле, энергия электрона и испущенного виртуального фотона $\varepsilon = \hbar \nu$ больше энергии покоящегося электрона, но это нарушение кажущееся — длительность такого нарушения Δt не должна превышать величину \hbar/ε . Тогда это нарушение не будет обнаружено, т. е. оно виртуально. Реальный фотон может быть испущен лишь при поступлении дополнительной энергии. Можно оценить расстояние, на которое этот виртуальный фотон успеет передать взаимодействие за это время: $L = c \Delta t = \hbar c / \varepsilon$. Поскольку энергия фотона может быть сколь угодно мала (зависит от частоты), радиус действия электромагнитных сил неограничен. Если бы частицы, осуществляющие обмен (взаимодействие), имели массу покоя, то радиус действия их был бы ограничен: $L = c \Delta t = \hbar c / mc^2 = \hbar / mc$. Это — так называемая комптоновская длина волны. Для электрона она составляет $3,86 \cdot 10^{-13}$ м, что в 100 раз превышает радиус действия ядерных сил.

Сначала (1934) в качестве виртуальных частиц, переносящих взаимодействия в ядре, И.Е.Тамм предложил электрон. Но величина их оказалась недостаточна для сохранения ядер. В качестве ядерного клея японский физик Хидэки Юкава предложил в 1935 г. гипотетическую частичку **мезон**, массу которой он оценил (200... 300) m_e . Через два года американские физики Андерсон и Неддермейер обнаружили в космических лучах реальные частицы с массой 207 m_e , промежуточной между массами протона и электрона. Но оказалось, что это не те частицы, которые предложил Юкава (ему требовались другие свойства), и такие частицы (их называют **π -мезонами**, или **пионами**) были обнаружены только в 1947 г. Они имеют массу 273 m_e . Именно на эти частицы — пионы, предсказанные гениальной интуицией, падает функция поддержания взаимодействия в ядре. Протон превращается в нейтрон, периодически испуская пион, поэтому его можно представить наглядно имеющим нейтронное ядро и мезонную оболочку.

Теория пришла в согласие с данными наблюдений. Она получила название теории Тамма—Юкавы. Исследования природы ядерных взаимодействий продолжаются более полувека. Многие их свойства можно описать с помощью моделей, использующих разного вида потенциальные ямы, при этом непрерывно вносятся уточнения в связи с появлением новых экспериментальных данных. Во многих атомных явлениях ядро можно представить массивной заряженной частицей, не имеющей внутреннего строения.

238

Сферическую оболочечную модель атомного ядра предложили в 1949 г. Мария Гепперт-Майер и Йоханнес Йенсен. Их идея состояла в том, чтобы применить для анализа движения нуклонов в ядре те же принципы квантовой механики, что и к вращающимся электронам в атоме. Так как существует принцип Паули, ядро строится путем последовательного заполнения оболочек нейтронами и протонами, причем заполнение начинается с состояний с наименьшей энергией. В атомах заполнение электронных оболочек приводит к появлению инертных газов. Похожая ситуация и в ядрах — при определенных числах протонов или нейтронов возникает ядро с «жесткой» сферической формой. Эти числа — 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126, 184 — называли магическими. Ядра, имеющие два магических числа, особенно устойчивы, пример тому кислород-16: 8 протонов и 8 нейтронов.

Коллективная модель ядерной деформации, в которой рассматриваются форма и структура атомного ядра, была предложена в 1952 г. О. Бором и Б. Маттельсоном. Она сходна с моделью жидкой капли. Квантово-механические расчеты определяют форму капли и области минимумов энергии, что связывается с устойчивостью и неустойчивостью ядер. Изучение таких коллективных движений в ядрах привело к гипотезе о существовании внутри ядер неких кластеров, из которых вылет каких-либо частиц вероятен.

Итак, четыре силы в природе ответственны за все известные взаимодействия частиц. Перечисленные типы взаимодействий имеют, видимо, разную природу. К настоящему времени неясно, исчерпываются ли ими все взаимодействия в природе. Самым сильным является короткодествующее взаимодействие, электромагнитное слабее его на два порядка, слабое — на 14 порядков, а гравитационное — самое слабое, оно меньше сильного

на 39 порядков. В соответствии с величиной силы взаимодействия они происходят за разное время. Сильные ядерные взаимодействия происходят при столкновении частиц с околосветовыми скоростями, и время реакций, определяемое делением радиуса действия сил на скорость света, дает величину порядка 10^{-23} с. При слабом взаимодействии процессы происходят медленней — за 10^{-9} с. Характерное время для гравитационного взаимодействия — порядка 10^{16} с, или 300 млн лет.

6.6. Элементарные частицы и проблема поиска «первичных объектов»

Элементарными называют частицы, входящие в состав прежде «неделимого» атома. Первыми были обнаружены электрон, протон, нейтрон и фотон — квант электромагнитного поля. Из пер-

239

вых трех строили вещество, а фотон осуществлял взаимодействие между ними. Считали, что они ни на что далее не могут быть разложены и потому являются «первичными кирпичиками» мироздания. Потом оказалось, что эти элементарные частицы имеют внутреннюю структуру и могут друг в друга превращаться. После второй мировой войны благодаря мощной технике было открыто еще много частиц, претендующих на «элементарность». У каждой частицы, кроме фотона, оказалась еще и античастица. Сейчас элементарных частиц уже более трехсот. К ним относят и те частицы, которые получают на мощных циклотронах, синхротронах и других ускорителях. Есть элементарные частицы, возникающие при прохождении через атмосферу космических лучей, они существуют несколько миллионных долей секунды, потом распадаются, видоизменяются, превращаясь в другие элементарные частицы, или испускают энергию в форме излучения.

Современная наука выявила единство на самом глубоком уровне: наблюдаемое вещество состоит из фотонов, лептонов (электроны, мюоны, нейтрино) и кварков. Помимо переносимых фотонами электромагнитных взаимодействий существуют сильные ядерные взаимодействия, связывающие кварки в барионы (протоны, нейтроны и пр.) и мезоны. Слабые ядерные взаимодействия ответственны за распад нейтронов, например. Все они описываются единой нелинейной теорией, обобщающей уравнения Максвелла. Такое обобщение было сделано в 1954 г. Ч.Янгом и Р. Миллсом, и другие обобщения называются также теорией Янга — Миллса. Ранее подобные теории выдвигали Г.Ми и М.Борн, А.Эйнштейн и Я.И.Френкель. Хотя проблема элементарных частиц связана с самими основами науки, их изучение ведется в некотором отрыве от других областей физики.

Основными характеристиками элементарных частиц являются масса, электрический заряд, спин, среднее время жизни, магнитный момент, пространственная четность, барионный заряд и квантовые числа.

Масса элементарных частиц — это масса покоя, поскольку она не зависит от состояния движения. Ее определяют по отношению к массе покоя электрона m_e , самой маленькой из масс покоя. Нейтрон и протон тяжелее электрона почти в 2000 раз. Но есть и очень тяжелые частицы, например Z-частицы, получаемые на ускорителях, с массой покоя 2 000 000 m_e . Фотоны вообще не имеют массы покоя. По массе частицы делят на лептоны (электрон и нейтрино); мезоны (с массой от 1 до 1000 m_e); барионы (с массой более 1000 m_e). В состав барионов входят протоны, нейтроны, гипероны и др.

Электрический заряд меняется от нуля до «+» или «-». Каждой частице, кроме фотона, нейтрино и двух мезонов, соответствует частица с противоположным зарядом, или античастица. В 1963 г.

240

была высказана гипотеза о существовании частиц с дробным зарядом — кварков.

Спин — одна из важнейших характеристик элементарных частиц. Она определяется собственным моментом импульса частицы. Спин фотона равен 1; это означает, что частица примет тот же вид после полного оборота на 360° . Частица со спином — $1/2$ примет прежний вид при обороте, в 2 раза большем, т.е. в 720° . Спин протона, нейтрона и электрона — $1/2$. Существуют частицы со спином $3/2$, $5/2$ и т.д. Частица со спином, равным нулю, одинаково выглядит при любом угле поворота. В зависимости от значения спина все частицы делят на две группы:

фермионы (название дано в честь Энрико Ферми) — с полуцелыми ($1/2$, $3/2$, ...) спинами. Фермионы составляют вещество и, в свою очередь, делятся на два класса — лептоны (от греч. *leptos* — легкий) и кварки. Кварки входят в состав протонов, нейтронов и других подобных им частиц, называемых в совокупности адронами (от греч. *adros* — сильный). Заряженные лептоны могут так же, как и электроны, вращаться вокруг ядер, образуя атомы. Лептоны, не имеющие заряда, могут, как и нейтрино, проходить сквозь всю Землю, ни с чем не взаимодействуя. У каждой частицы есть и античастица, отличающаяся только зарядом;

бозоны (названные в честь индийского ученого Шатъендраната Бозе, одного из создателей квантовой статистики) — это частицы с целыми спинами (0, 1, 2), бозоны переносят взаимодействие.

Между частицами существуют четыре типа взаимодействий, каждое из которых переносится своим типом бозонов: фотон, квант света — электромагнитные взаимодействия, гравитон — силы тяготения, действующие между любыми телами, имеющими массу. Восемь глюонов переносят сильные ядерные взаимодействия, связывающие кварки. Промежуточные векторные бозоны переносят слабые взаимодействия, ответственные за некоторые распады частиц. Считается, что к этим четырём взаимодействиям сводятся все силы в природе. Одним из самых ярких достижений нашего века стало доказательство того, что при очень высоких

температурах (или энергиях) все четыре взаимодействия сливаются в одно.

При энергии 100 ГэВ (10^9 эВ) объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Такая энергия соответствует температуре Вселенной через 10^{-10} с после Большого Взрыва, и в 4 триллиона раз выше комнатной. Это открытие позволило предположить, что при энергии порядка 10^{15} ГэВ можно достичь объединения с ними сильных взаимодействий, как это утверждается в Теориях Великого Объединения (ТВО), а при энергии 10^{19} ГэВ к взаимодействиям ТВО присоединится и гравитационное взаимодействие, «образуя» ТВС (Теорию Всего Сущего).

Ускорителей, на которых можно получить такие энергии и проверить эти теории, пока нет и не предвидится, поэтому обра-

241

щаются к Вселенной, чтобы найти в ней возможные ограничения для огромного числа элементарных частиц. В последние тридцать лет между физикой элементарных частиц и космологией существует тесная связь. Совокупность астрофизических данных можно рассматривать как «экспериментальный материал», накопленный в результате работы Вселенной — гигантского ускорителя частиц. Мы можем иметь дело только с косвенными следствиями происходивших и происходящих процессов, с усредненным по всей Вселенной результатом их влияния на эволюцию материи.

Среди *лептонов* наиболее известен электрон, вероятно, он не состоит из других частиц, т.е. элементарен. Другой лептон — *нейтрино*. Это самый распространенный лептон во Вселенной и в то же время самый неуловимый. Нейтрино не участвует ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях. После предсказания нейтрино было обнаружено только через 30 лет на ускорителях. Нейтрино бывает трех видов — электронное, мюонное и тау-нейтрино. *Мюон* — тоже широко распространенный в природе лептон. Он был обнаружен в космических лучах в 1936 г.; это нестабильная частица, а в остальном он похож на электрон. За две миллионные доли секунды он распадается на электрон и два нейтрино. Фоновое космическое излучение в большей части состоит из мюонов. В конце 70-х гг. был обнаружен третий заряженный лептон (кроме электрона и мюона) — *тау-лептон*. Он ведет себя очень похоже на своих собратьев, но тяжелее электрона в 3500 раз. У каждого лептона есть и античастица, т.е. всего их 12.

Адронов существует очень много, их сотни. Поэтому часто их считают не элементарными частицами, а составленными из других. Они бывают электрически заряженными и нейтральными. Все адроны участвуют в сильном, слабом и гравитационном взаимодействиях. Среди них самые известные — *протон* и *нейтрон*. Остальные живут очень мало, распадаясь за 10^{-6} с за счет слабого взаимодействия или за 10^{-23} с — за счет сильного. Адроны рассортировали по массе, заряду и спину. В этом помогла гипотеза кварков, или частиц, составляющих адроны.

Кварки могут соединяться для этого тройками, составляя барионы, либо парами: кварк—антикварк, составляя мезоны (промежуточные частицы). Кварки имеют заряд $1/3$ или $2/3$ заряда электрона. Тогда в комбинации они дадут 0 или 1. Все кварки имеют спин, равный $1/2$, т.е. они относятся к фермионам. Считают, что они сцепляются сильным взаимодействием, но участвуют и в слабом. Особенности сильного взаимодействия характеризуют типами («ароматами») — «верхний», «нижний», «странный». Но слабое взаимодействие может поменять «аромат» кварка. Например, при распаде нейтрона один из «нижних» кварков становится «верхним», а избыток заряда уносит рождающийся электрон. Так что сильное взаимодействие не может менять «аромат», а без изменения «аромата» кварка невозможен распад адрона.

Новый адрон, названный *ψ-частицей*, был обнаружен на ускорителях (1974). Поэтому в соответствии с теорией кварков ввели еще одну характеристику, четвертый «аромат», так появился «очарованный» кварк. Так что ψ-частица — это предположительно мезон, состоящий из с-кварка и с-антикварка. Сейчас обнаружено уже много «очарованных» частиц, и все

242

они тяжелые. А в 1977 г. появился υ-мезон, и вся история повторилась, пятый аромат получил название «прелестный». Так развивается ныне атомистика. Сейчас считают, что существуют 12 кварков — фундаментальных частиц и столько же античастиц. Шесть частиц — это кварки с экзотическими именами «верхний», «нижний», «очарованный», «странный», «истинный», «прелестный». Они являются порождением теории, стремящейся к упорядоченности и красоте, и открыты все, за исключением «истинного». Остальные шесть — лептоны: электрон, мюон, τ-частица и соответствующие им нейтрино (электронное, мюонное, τ-нейтрино).

Эти 12 частиц, или две по шесть, группируют в три поколения, каждое из которых состоит из четырех членов. В первом поколении — «верхний» и «нижний» кварки, электрон и электронное нейтрино, во втором — «очарованный» и «странный» кварки, мюон и мюонное нейтрино, в третьем — «истинный» и «прелестный» кварки и τ-частица со своим нейтрино. Все обычное вещество состоит из частиц первого поколения. Протон, например, состоит из двух «верхних» кварков и одного «нижнего», нейтрон — из двух «нижних» и одного «верхнего». Каждый атом состоит из тяжелого ядра (сильно связанных протонов и нейтронов), окруженного электронным облаком.

Но почему существуют другие поколения частиц и сколько их еще может быть? По мнению японских физиков М.Кобаяси и Т. Маскава, асимметрия между веществом и антивеществом требует наличия трех

поколений. Если же число поколений не ограничено, являются ли кварки и лептоны основными «кирпичиками природы» и насколько они фундаментальны? Последние данные, полученные на разных ускорителях, позволяют считать, что число поколений не может быть более пяти, так как полное число нейтрино не превышает этого числа. Ответы на эти вопросы ищут в современной космологии, в моделях первичного нуклеосинтеза, породившего те или иные частицы, часть которых может быть установлена по распространенности того или другого элемента во Вселенной. Эти исследования дают человеку возможность прикоснуться к тайне мироздания, найти те «кирпичики», из которых построено все в мире, а за ними стоят и новые технологии.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Какие частицы составляют ядро атома, каковы его размеры? Как это было установлено?
 2. Поясните понятие элементарной частицы, как классифицируются элементарные частицы и как они исследуются. Что такое «античастицы»? В чем состоит гипотеза кварков? Какие проблемы стоят в теории элементарных частиц?
 3. В чем заключается единство дискретности и непрерывности? Охарактеризуйте проблему поиска «первичных объектов» и концепцию атомизма. Что такое «квaziчастицы»?
- 243
4. Какова специфика микромира по сравнению с изучением мега- и макромира. Поясните принципы соответствия и дополнительности.
 5. Поясните принцип неопределенности, понятия детерминизма и индетерминизма. Как изменились представления о случайном и закономерном? Поясните роль прибора в квантовой механике.
 6. Как развились представления о причинности в квантовой механике? Почему ограничение воздействия на микроуровне имеет смысл фундаментального закона природы?
 7. Какими параметрами описывается состояние микрочастицы? Как при этом осуществляется синтез волновых и корпускулярных свойств? Каково отличие в описании состояния в классической и квантовой механике?
 8. Какое уравнение описывает движение в микромире и соответствует второму закону Ньютона? Какой смысл имеют входящие в него величины?
 9. Какие модели описывают строение и свойства атомных ядер? Почему тяжелые элементы не распадаются самопроизвольно на легкие? Какие реакции деления возможны и какие для этого необходимы условия?
 10. Поясните, чем определяется устойчивость атомных ядер. Что такое «дефект массы» и как происходят реакции в недрах звезд?

Глава 7. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА (ОТ МИКРОМИРА К МАКРОМИРУ)

7.1. Представление о строении молекул

Представления о веществе как о предмете изучения естественных наук (в первую очередь химии и физики) менялись в соответствии с уровнем развития знаний и использования веществ.

В Древней Греции появилась гениальная догадка — тела образованы различными комбинациями атомов (неделимых). Такое объяснение — сведение сложного к простому (редукции) не отражало многообразия сложного мира, но дало науке многое. Тенденция к поиску «элементарных кирпичиков» мироздания, порожденная атомистической концепцией, оказалась плодотворной в объяснении свойств тел. Но она не позволяет понять макроскопические свойства тел, ведь применительно к отдельному атому нельзя говорить ни о давлении, ни о температуре, ни о плотности. И «целое» не является суммой «частей», оно обладает более сложными свойствами. Это приводит к размышлениям о сущности редукционизма и методов познания. Ученые установили, что все вещества построены из молекул, которые, в свою очередь, состоят из устойчивых групп соединенных друг с другом атомов.

Молекула — наименьшая устойчивая частица вещества, сохраняющая его свойства. Понятие молекулы появилось в кинетической теории газов (см. гл. 4), и на основании развитой физической теории удалось путем исследования макроскопического поведения газов оценить размеры молекул. В жидкостях или твердых телах, где молекулы расположены достаточно плотно, их размеры можно оценить по плотности веществ. Прямое доказательство существования молекул было получено при изучении броуновского движения Ж. Перреном.

Установление связи между структурой и свойствами на молекулярном уровне строения веществ — одна из основных задач исследования. Молекула состоит из ядер атомов и электронной оболочки, образованной их внешними электронами. В зависимости от строения и состава молекулы обладают разной степенью устойчивости по отношению к внешним воздействиям, что определяет многие их свойства. Исследование устойчивости молекул раскрывает их природу и реакционную способность. Такими физическими методами, как спектроскопия, ядерный или парамагнитный резонанс и др., изучают разнообразные и сложные химические

245

процессы. Относительное расположение атомных ядер в молекулах может быть измерено методами рентгеноструктурного анализа, электронографии или нейтронографии и др. В основном свойства и строение молекул определяются при исследовании макроскопических образцов веществ.

Химия изучает процессы превращения молекул при взаимодействиях и при воздействии на них внешних факторов (теплоты, света, электрического тока, магнитного поля), во время которых образуются новые химические связи. Взаимодействие электронных оболочек атомов порождает химические связи, создающие определенные конфигурации атомов, отличающие один тип молекулы от другого. Если атомные конфигурации подходят друг к другу, возникает структура, несколько большая, чем до этого была совокупность из атомов по отдельности. Получается насыщенная молекула, присоединить к ней еще какой-то атом почти невозможно. Насыщаемость молекул определяет их постоянный состав для данного вещества и связана с *валентностью* — способностью атома образовывать химические связи. Инертные газы с трудом образуют химические соединения, так как имеют устойчивую электронную оболочку. Внешняя оболочка атома, которая содержит орбитали самых высоких энергий атома, называется валентной.

Понятие валентности, введенное в науку для описания свойства одного изолированного атома, постепенно стало отражать свойства связанного атома, т.е. атома, находящегося в молекуле и изменившего свои свойства под влиянием других атомов. Его впервые использовал (1853) английский химик Э.Франкленд. Тогда валентность элемента выражалась числом атомов водорода, которое может присоединить или которым можно заменить один атом рассматриваемого элемента. Вместе с немецким химиком А. Кольбе он установил трехвалентность азота, фосфора, мышьяка и четырехвалентность углерода. Они отметили, что валентность зависит как от состояния атомов рассматриваемого элемента, так и от химической природы другого реагента: углерод в соединении с кислородом может образовывать и CO, и CO₂. Значит, валентность позволяет оценить формулу химического соединения. Так пришли к понятию *стехиометрической валентности*.

Немецкий химик Кекуле заключил (1857), что одни элементы могут замещать в ряде соединений три атома водорода, а другие — только один или два. Он ввел понятие *химического сродства*, означающее число атомов водорода, которое может заменить данный элемент. Число единиц сродства и есть *валентность*. Под валентностью понимали целочисленную величину, отражающую количество единиц сродства свободного атома любого элемента. Считалось, что атом водорода имеет одну единицу сродства, атом кислорода — две и

т.д. Поэтому говорили, что атом углерода при образовании диоксида связывает все четыре единицы сродства, а при образовании оксида — только две: $O=C=O$ и $=C=O$. Шотландский химик А. Купер предложил обозначать химические связи между атомами в соединениях с помощью черточек (1858). Теории Ке-

246

куле и Купера объясняли строение и сложных радикалов, и органических соединений — молекула представлялась целостным образованием, которое складывается из атомов за счет полного взаимного насыщения единиц сродства. Они практически одновременно обнаружили способность атомов углерода соединяться друг с другом в длинные молекулы-цепочки, это свойство углерода и породило огромное разнообразие его соединений. Простота и наглядность объяснений вели к аддитивному мышлению.

Современные представления о химической связи основаны на современной теории валентности. Термин «связь» оказался очень точен. Случайных связей не бывает — существуют правила их возникновения. При образовании связи атомы приближаются к достижению наиболее устойчивой электронной конфигурации, т. е. имеющей более низкую энергию. Они могут терять (приобретать) электроны или обобществлять их до достижения такой же конфигурации, как у благородного газа этого же периода, т.е. до значения 2 или 8. Существуют и взаимодействия между атомами, когда электронная оболочка не локализована в отдельных связях — сопряженные.

Ионная связь, основанная на переносе валентных электронов от одного атома к другому и электростатическом притяжении этих образовавшихся ионов, — самый распространенный вид связи. Молекула представляется электрическим диполем, а центры ионов в нем расположены на определенном расстоянии друг от друга, называемом *длиной связи*. Простейшая кристаллическая структура молекулы NaCl показана на рис. 7.1, а схема ее ионной связи NaCl — на рис. 7.2, а. Для хлорида калия, например, длина связи равна $1,3 \cdot 10^{-10}$ м.

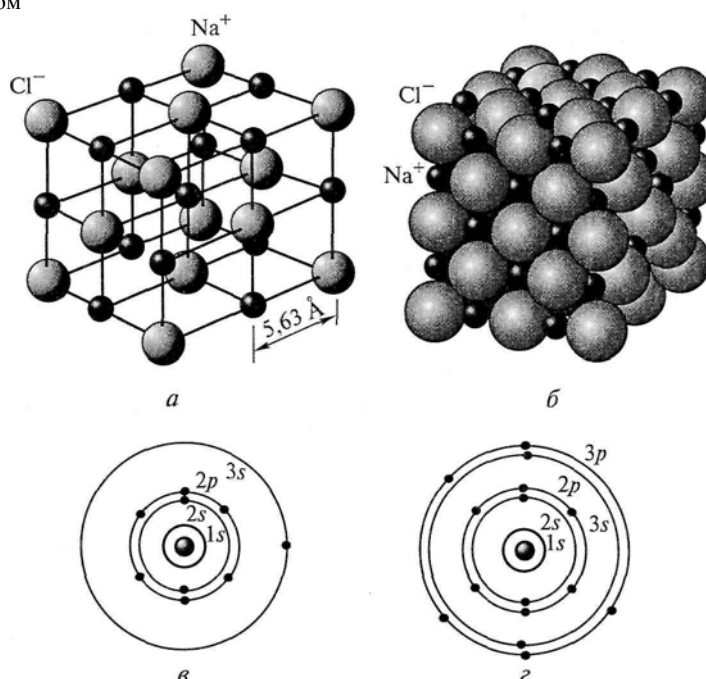
При ковалентной связи прочное соединение нейтральных атомов достигается за счет более глубокого взаимодействия между ними (рис. 7.2, б), например связь атомов углерода в кристалле алмаза или в молекуле H_2 . Прочность такой связи обусловлена *обменным резонансом* — атомы колеблются с одинаковой собственной частотой, и при связывании их суммарная энергия становится меньше, чем в изолированном состоянии. Электрон 1 притягивается ядром 2, и электрон 2 притягивается ядром 1. Электроны должны иметь противоположно направленные спины, тогда (по принципу Паули) они находятся в наинизшем состоянии и орбиты отдельных атомов сливаются в одну орбиталь, охватывающую пространство обоих атомов водорода и имеющую почти эллиптическую форму. Говорят, что происходит «перекрывание» собственных функций обоих электронов, это становится энергетически выгодно — системы удерживаются вместе.

В молекулах газов сохраняется 5 %-я вероятность того, что электрон несколько смещен к одному из атомов. Молекулы щелочно-галогидных соединений имеют небольшой дипольный момент, их

247

Рис. 7.1. Ионная связь на примере структуры молекулы NaCl:

а — кристаллическая решетка (ионы Na^+ и Cl^- , правильно чередуясь, располагаются в узлах кристаллической решетки); б — молекула NaCl; в — нейтральный атом Na с одним электроном во внешней оболочке; г — нейтральный атом Cl с внешней оболочкой, не достроенной одним электроном



центры тяжести расположены на некотором расстоянии. В молекуле воды две однократно занятые р-орбитали атома кислорода частично сливаются с р-орбиталью атома водорода, но из-за электростатического

отталкивания между обоими ядрами водорода валентный угол не 90° , а 105° . Форма молекул с ковалентными связями определяется формой электронных орбиталей. Большинство органических соединений существуют благодаря ковалентной связи.

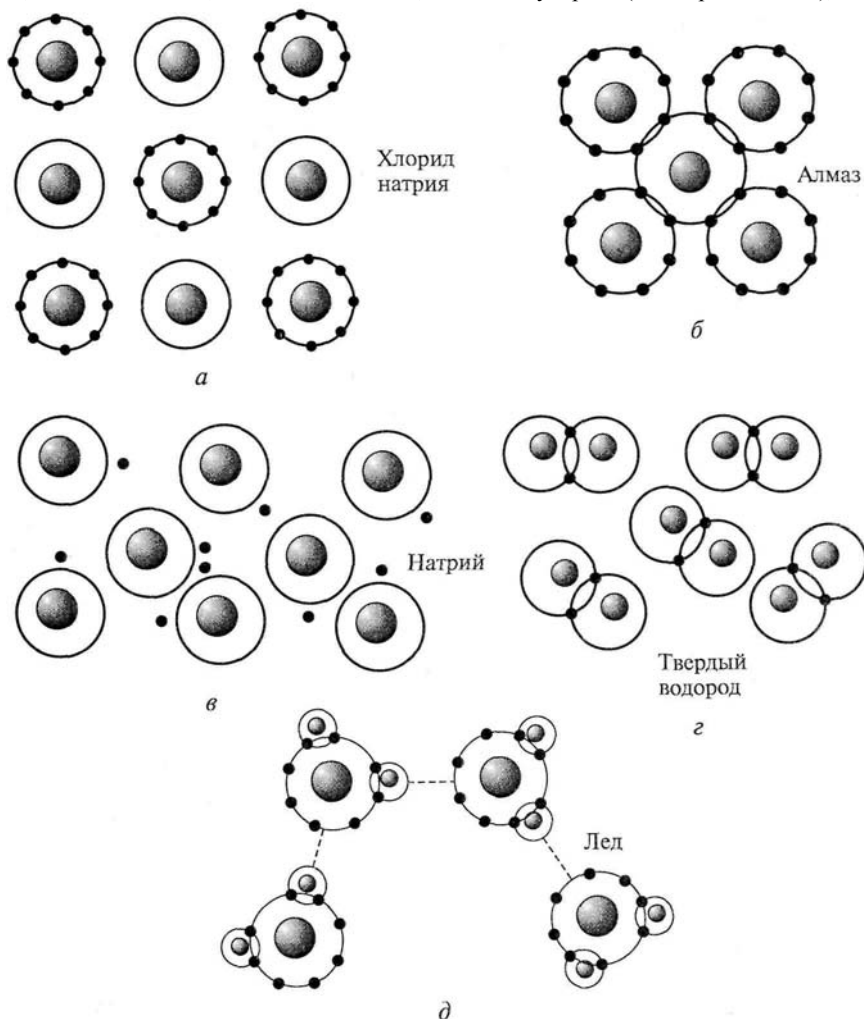
Металлическая связь проявляется, когда атомы металла обобществляют валентные электроны, слабо связанные с атомными остовами. Эти электроны образуют электронный газ, перемещающийся по кристаллической решетке (рис. 7.2, в).

Молекулярная связь отражает слабое взаимодействие между соседними атомами, например взаимодействие между атомами водорода в твердом H_2 (рис. 7.2, г). Силы электростатического притяжения могут возникнуть и между нейтральными атомами: при сближении их возникает отталкивание из-за отрицательно заряженных электронных оболочек, но при этом смещается центр

248

Рис. 7.2. Примеры химических связей:

а — ионная; *б* — ковалентная; *в* — металлическая; *г* — молекулярная (ван-дер-ваальсова); *д* — водородная



тяжести отрицательных зарядов относительно положительных. И каждый из атомов индуцирует в другой электрический диполь, что ведет к взаимному притяжению. Это притяжение связывают с действием сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса), которые на порядок меньше по величине, но имеют радиус действия, превосходящий размеры молекул.

Водородная связь слабее ковалентной или ионной связи в 15 — 20 раз. Она возникает, если атом водорода помещен между

249

двумя электроотрицательными атомами (рис. 7.2, д). Водородная связь определяет ассоциацию молекул типа димеров воды — $(H_2O)_2$. На слабой водородной связи «держатся» полимеры, входящие в состав биомолекул, т.е. и жизнь.

Ионная и ковалентная связи — это предельные случаи химических связей. Чаще всего встречаются молекулы с промежуточными типами связей. Более полное представление о типах связей дают карты электронных плотностей, получаемые из расчетов на ЭВМ. Так квантовая механика атома объяснила проблемы химической связи молекул с позиции физики.

Существуют и очень короткие связи — одинарные, двойные, тройные и даже четверные (в них участвуют сразу 8 электронов), которые обнаруживают между атомами рения, молибдена или хрома. Расстояния между

атомами в молекулах очень малы — порядка $(1 — 4) \cdot 10^{-10}$ м. Так, молекула H_2 состоит из двух связанных между собой атомов, расстояние между ядрами которых, или длина связи, составляет $7,5 \cdot 10^{-11}$ м. У молекулы кислорода, также состоящей из двух атомов, длина связи равна $1,2 \cdot 10^{-10}$ м. Молекулы различаются и размерами: молекула O_2 с 16 электронами больше молекулы H_2 с двумя. Более сложные молекулы имеют и более сложные форму и строение. При образовании молекулы перекрытие электронных облаков ведет к возникновению между ядрами некоторого отрицательного заряда, которое цементирует молекулу и стягивает ядра к области перекрытия. Энергия этого взаимодействия — порядка 1000 кДж/моль (у N_2 — 940 кДж/моль, Cs — 42 кДж/моль). Для сравнения: энергия межмолекулярного взаимодействия составляет порядка 100 кДж/моль, так что отличить их по энергии трудно. Важно выделить главную черту химической связи — обобществление валентных электронов и перенос заряда, если связь образуется между разными атомами.

Опыт У.Никольсона и А. Карлейна (1800) по разложению воды с помощью электрического тока впервые показал связь химических и электрических взаимодействий, но только через столетие появилась теория, описывающая природу химической связи. Теория Й.Берцелиуса (1819), основанная на электростатическом взаимодействии зарядов, не могла объяснить образование молекул из двух одинаковых атомов и фактически касалась лишь ионной связи, поскольку электрическая природа других видов химической связи не столь очевидна. Сокрушительный удар по теории Берцелиуса нанесла неведомая ему тогда наука — органическая химия.

Химические связи можно рассматривать с точки зрения превращения энергии: если при создании молекулы ее энергия меньше, чем сумма энергий составляющих ее изолированных атомов, то она может существовать, т. е. ее связь устойчива. Для измерения энергии связи одной молекулы используют энергию, отнесенную к одному молю (числу граммов, равному относительной

250

молекулярной массе) и деленную на число Авогадро N . Эта величина для O_2 равна 487,2 кДж/моль, а для H_2 — 432,6 кДж/моль, т. е. меняется незначительно.

Устойчивым считается состояние, в котором потенциальная энергия минимальна, поэтому при образовании молекулы атомы находятся в потенциальной яме, совершая небольшие тепловые колебания около положения равновесия. Расстояние от вертикальной оси до дна ямы соответствует равновесию — на этом расстоянии находились бы атомы, если бы прекратилось тепловое движение. Точки левее дна соответствуют отталкиванию, правее — притяжению. Крутизна кривой тоже информативна: чем круче кривая, тем больше сила взаимодействия между атомами. Для разных пар атомов различны не только расстояния от вертикальной оси до дна ямы, но и глубина ям. Это просто объяснить: ведь для того чтобы выбраться из ямы, нужна энергия, равная ее глубине. Поэтому глубину ямы можно назвать энергией связи частиц.

7.2. Развитие представлений о составе веществ. Законы стехиометрии

Химия занимается изучением естественных и искусственных объектов на молекулярном уровне. Она позволяет изменять окружающий мир, затрагивая практически все стороны нашей жизни. По выражению Менделеева, «высшую цель науки составляет... постижение неизменяющегося среди переменного». Получение веществ с необходимыми свойствами — эта задача объединяет всю химическую науку. По предмету исследования химию разделяют на органическую и неорганическую. Выделение аналитической химии связано с методами исследования. Появление биологической и физической химии обусловлено близостью предметов и методов исследования со смежными науками. Появились химия твердого тела, химия поверхности, химия комплексных соединений, химия растворов, химия полимеров, химия нефти и др. Связь науки с требованиями человеческой практики подтверждает вся история химии, которая есть единый закономерный процесс решения основной проблемы, а не совокупность разных химических наук. Менделеев определил химию как учение об элементах и их соединениях, а теперь кажется, что важнее в химии является учение о процессах, а не о готовых формах материи.

Свойства вещества зависят от четырех факторов: элементного и молекулярного состава; структуры; кинетических факторов протекания химического процесса; степени организации вещества. Молекулой назвали наименьшую частичку вещества, сохраняющую его свойства, но молекулы становились все сложнее. К ним

251

стали относить полимеры, кристаллы, т.е. агрегаты. Учение о составе веществ называют первой концептуальной системой химии.

Поскольку человек искал необходимые вещества для обеспечения своей жизнедеятельности, химические знания копились с древнейших времен. Этот путь можно условно разделить на несколько этапов, каждый из которых связан с ценностями общества и возможностью их достижения в выбранное время.

Донаучный этап был ориентирован на поиски «философского камня», «эликсира долголетия», получение золота и серебра из других веществ. Родиной алхимии считается Древний Египет. Там в строжайшей тайне сохранялись способы выплавки металлов, получения сплавов для монет. Расширение торговли требовало

научиться превращать свинец или железо в золото. Алхимическая направленность знаний и рецептов связывалась с астрологией и магией. Семь планет связывали с семью известными тогда металлами. Арабы, вторгнувшись в VII в. в Египет, перефразировали слово «хеми» в «аль хеми», так впоследствии и появилась алхимия. Джабир (европейское имя Гебер) считал, что все семь металлов образованы из серы и ртути. В XII — XIV вв. в связи с поисками эликсира, помогающего превращению этих элементов в золото, была открыта серная и азотная кислоты, изучены процессы брожения, появились вино и уксус. Постепенно возникали и иные цели. Так, Парацельс считал, что равновесие в организмах может быть достигнуто с помощью определенных химических соединений, использующих минералы. На основе серы, ртути и соли, используя их свойства — горючесть, летучесть и твердость, он создал ятрохимию. Каждому из этих свойств он сопоставил микрокосм человека — душу, дух и тело. Болезни вызывает избыток или недостаток каких-то элементов. И ятрохимия отделилась от алхимии. Во второй половине XVII в. период алхимии исчерпал себя. Но был накоплен опыт по различным превращениям веществ, конструированию приборов и технике экспериментов, были открыты новые вещества и новые металлы (платина, висмут), изучены необычные свойства многих веществ. И все более ощущалось, что существует какой-то предел превращаемости веществ. В то же время больших успехов достигла техническая химия — развивались металлургия, производство стекла, бумаги. Развитие ремесел, фармацевтики, промышленности требовало получения новых веществ. В это время возрождение идей атомизма П.Гассенди привело к формулировке понятия молекулы как мельчайшей частички, сохраняющей свойства вещества.

Формирование химии как науки связано с именем Р.Бойля. Он отделил химию от ремесленных и медицинских целей, развил атомистические представления, объясняя формой, расположением и движениями частиц превращения веществ и их свойства. Бойль выделял мельчайшие частички — атомы, которые могут образовывать большие — кластеры, и поставил вопрос о происхождении свойств веществ, связывая их с составом вещества. Под химическим элементом он понимал предел разложения веществ и выдвинул программу их изучения. Видя основную задачу химии в изучении состава тел, требовал, чтобы элементы состава при соеди-

252

нении давали исходное вещество, т.е. ввел синтез как критерии верности анализа. По выражению Энгельса, «Бойль делает из химии науку», вводя в химию индуктивный метод. На идее атомистического строения были созданы кинетическая теория газов Бой-ля, Ломоносова, Д.Бернулли. М.В.Ломоносов сумел соединить представления о строении веществ и кинетическую теорию теплоты. Его гипотетико- дедуктивный метод привел его к формулировке закона сохранения вещества и движения.

Понятие *химического элемента* у Лавуазье также связывалось с веществами, не подвергающимися дальнейшему разложению, и он включил в свою систему, помимо азота, водорода, кислорода, серы и др., известь, магнезию, глинозем. Но он понял важность точного измерения количества веществ, участвующих в реакции. Количественные методы привели к открытию новых элементов — кобальта (1735), металлического никеля (1751), водорода (1776) (ранее наблюдаемого Бойлем в 1766 г., Ломоносовым в 1745 г., Г. Кавендишем в 1766 г.), кислорода (1771 — 1774) (Пристли, Шееле, Лавуазье), фтора (1771) и т.д. Точными измерениями Лавуазье установил **закон сохранения массы**, не зависящий от характера реакции.

Стимулировала введение количественных методов анализа состава веществ проблема горения, которая стала основной в химии XVIII в. Для объяснения процесса И. Бехером и Г. Шталем была предложена теория флогистона — невесомой субстанции, содержащейся во всех горючих телах и выделяющейся при горении. После открытия Шееле сложного состава воздуха Лавуазье разработал теорию образования металлов из руд и пришел к кислородной теории горения. И флогистон был изгнан из химии, как и теплород из физики. Проведенные тогда Кавендишем опыты показали, что образующиеся при горении газы конденсируются в воду. Так Лавуазье понял, что вода — продукт соединения двух газов и назвал второй газ водородом, так как он образует воду и горит в присутствии кислорода.

На пути рационализации химии Лавуазье предпринял первую попытку систематизировать химические элементы. Классификация Лавуазье основана на соединениях кислорода (кислоты, основания, соли, органические вещества). Так учение о составе веществ стало частью рациональной науки, но до XIX в. оно составляло всю химию. Развитие промышленного производства требовало расширения сырьевой базы, понимания происходящих в химических реакциях процессов.

Понятие *химического соединения* отражало развитие представлений об элементах. В 1773 г. И.Рихтер показал, что химические элементы взаимодействуют между собой в строго ограниченных количествах, сохраняющихся в виде пропорциональных чисел при переходе от одного сложного вещества к другому. Эту упорядоченность он назвал стехиометрией, т.е. мерой элементов, входящих в

253

состав химического вида. Закон Рихтера стали называть **законом эквивалентов**.

Закон постоянства состава установил французский химик Ж. Пруст (1799) — любое химическое соединение обладает строго неизменным составом, атомы прочно притягиваются, и этим химическое соединение отличается от смесей. Его неизменный состав не зависит от способа получения.

Пруст писал: «Природа дала химическому соединению постоянный состав и тем самым поставила его в

совершенно особое положение по сравнению с раствором, расплавом или смесью». Возникла дискуссия, поднятая Ж.Прустом и К.Бертолле, о возможности существования соединений постоянного и переменного состава, которая не окончена и сейчас. Казалось, что можно получить вещество, повторяющее состав, с такими же свойствами. Ф.Велер создал в лаборатории мочевины (1828), А.Кольбе — уксусную кислоту (1845), П.Бертло впервые получил один из жиров (1854), а А.М.Бутлеров — один из Сахаров. Эти искусственные соединения обладали свойствами природных, т.е. не зависели от способа его получения.

Долгое время считалось, что исключения из этого свидетельствуют лишь о неточности или ошибочности опыта (изомеры). Но Бутлеров впоследствии это опроверг, получив изобутан — вещество, имеющее одинаковый с бутаном состав (по 4 атома углерода и по 10 атомов водорода), но отличное по свойствам: бутан кипит при $-0,5^{\circ}\text{C}$, а изобутан — при $-10,2^{\circ}\text{C}$.

Дж.Дальтон открыл закон кратных отношений: если определенное количество одного элемента вступает в соединение с другим элементом в нескольких весовых отношениях, то количества второго элемента относятся между собой как целые числа. Он полагал, что все атомы каждого отдельного элемента одинаковы и обладают определенным атомным весом. Поскольку абсолютное значение атомного веса нельзя установить, можно использовать относительные веса. Выбрав за единицу вес атома водорода, Дальтон составил первую таблицу атомных весов. Он теоретически обосновал закон Пруста, развил атомистические представления, показав, что все вещества состоят из молекул, а молекулы — из атомов. Кроме того, он ввел и обозначения атомов — составных частей молекул и отметил возможность «обмена» атомами при реакциях.

Атомные веса элементов более точно определял шведский химик И. Берцелиус. Он отметил, что в солях наблюдаются простые и постоянные отношения между атомами кислорода основания и атомами кислорода кислоты. В 1826 г. он опубликовал свою таблицу атомных весов по отношению к кислороду, вес которого был принят за 100. Почти все значения атомных весов были столь точны, что сохранились до сих пор, но в отличие от определений Дальтона они не были целыми числами. Берцелиус ввел обозначения элементов по первым буквам греческого или латинского названия, которые используют и сейчас.

254

Эти три закона стехиометрии (эквивалентов, постоянства состава и кратных отношений) стали основанием химии. Утверждение дискретности химической организации вещества стало ведущим представлением вплоть до создания квантовой химии.

Развитие молекулярной физики позволило к этому времени иначе взглянуть на свойства вещества в простейшем агрегатном состоянии, появились эмпирические газовые законы: Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, связывающие параметры газов. Эти эмпирические законы удалось вывести из идеи молекулярного строения вещества Д. Бернулли и М. В.Ломоносову. В 1811 г. А.Авогадро установил, что при одинаковых условиях равные объемы газов содержат одинаковое число молекул. Это значит, что грамм-молекула любого газа при одинаковых условиях (давлении и температуре) занимает одинаковый объем. При нормальных условиях он равен $22,41\text{ л}$, и в этом объеме содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул газа. Это число получило название числа Авогадро.

Основные принципы теории и законы химии, единые понятия были утверждены на первом Международном конгрессе химиков (1860, Карлсруэ). Химия тесно связана с производством, поэтому ее основная задача — получение веществ с нужными свойствами. Ее реализация требует умения осуществлять качественные превращения веществ, т.е. решить задачу происхождения свойств веществ. И на первом этапе свойства веществ определялись элементарным и молекулярным составом.

Учение о составе веществ сильно зависело от возможностей анализа, и понятие химического элемента изменялось с развитием методов. Из эмпирико-аналитической сформировалась атомно-теоретическая концепция. Из сопоставления периодичности химических свойств веществ и атомных масс элементов были построены периодические системы химических элементов Д. И. Менделеевым (1869) и Мейером (1870). По выражению Зелинского, это открытие явилось «открытием взаимной связи всех атомов в мироздании». Показателем химического элемента стало его место в Периодической системе. Тогда было известно 62 химических элемента, но Менделеев предсказал на основе установленной зависимости свойства элементов с предположительными атомными весами 44, 68 и 72. Вскоре они были открыты: галлий (1875), скандий (1879) и германий (1886). В конце века был открыт аргон, которому не было места в таблице, но после открытия гелия на Солнце и других инертных газов для них создали новую группу таблицы. Тогда еще не был понятен смысл закона, не понимал его и сам автор таблицы. Этот смысл открылся только после того, как выяснили структуру атома. Но уже в XIX в. периодический закон стал «фундаментом общей химии», упорядочил химические свойства, придал новое содержание проблеме соотношения состава и свойства.

255

В 1897 г. И. Ридберг заключил, что периодичность свойств элементов и их атомная масса являются функцией порядковых номеров элементов в таблице. После открытия электрона, рентгеновского излучения, сложного состава атома, радиоактивности и искусственных ядерных реакций стало понятно, что это место определяется не атомной массой, а зарядом ядра атома. Поэтому понятие химического элемента связано с одинаковым зарядом ядра атома. В эту совокупность включаются и разные изотопы — атомы с различной атомной массой. Поскольку при химических превращениях любой атом сохраняет заряд ядра, то он остается

атомом данного элемента. Сам атом меняется, так как меняется его электронная оболочка, отвечающая за химические свойства. В таблицу входят 90 природных и около 15 искусственных (радиоактивных) элементов.

Квантовая теория периодичности свойств элементов создавалась в 30-е гг. XX в. В связи с пониманием природы химических связей как обменных взаимодействий валентных электронов четко определилось понятие химического соединения — это качественно определенное вещество, состоящее из одного или нескольких элементов, атомы которых за счет химической связи объединены в частицы (молекулы, комплексы, монокристаллы или другие агрегаты). Впоследствии были открыты *макромолекулы полимеров*, которые состоят из повторяющихся, химически связанных структурных единиц — частей мономерных молекул с одинаковыми химическими свойствами. Сложно организованной единицей являются *молекулярные ассоциаты*. Более крупная структурная единица, называемая *молекулярным агрегатом*, состоит из атомов и молекулярных блоков, причем при образовании агрегата изменяется фазовое состояние вещества.

Аналитическая химия развилась из учения о составе веществ, которое дало ключ к решению проблемы генезиса свойств веществ, возможность планировать и осуществлять реакции, выполняющие определенную цель. Появились новые технологии, в России с 1807 г. стал издаваться специальный «Технологический журнал», в котором публиковались статьи по химии и технологии производства кислот, щелочей, солей.

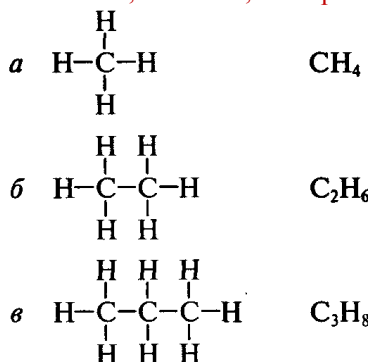
7.3. Развитие структурной химии

Наш мир состоит не из 105 элементов, а из огромного числа их соединений. Формулы и модели, построенные химиками, должны объяснять состав химических соединений и их свойства. Как отмечал историк науки Дж. Партингтон, «стремление иметь свой собственный набор формул явно рассматривалось как проявление независимости мышления каждого химика».

256

Рис. 7.3. Первые три молекулы ряда углеродных молекул с линейными цепочками:

a — метан; *б* — этан; *в* — пропан



Так, Ф. Кекуле предложил для уксусной кислоты 19 формул — каждая формула объясняла одну реакцию (1861). Но здравый смысл подсказывал, что вещество должно иметь молекулы определенной формы. С позиции геометрии было только определенное количество возможностей построения некоторой модели молекулы, и ни одна из них не объясняла всех свойств веществ. Как только Кекуле предложил простую гексагональную схему для объяснения ароматических соединений, он столкнулся с проблемой локализации химических связей. Понимая, что четырехвалентность углерода ведет к тому, что каждый атом углерода имеет одну незадействованную связь, он принял идею чередующихся одинарных и двойных связей (рис. 7.3, *a*). Но тогда могут быть получены два изомера (рис. 7.3, *б*): первый — с двойной связью между добавленными атомами хлора, второй — с одинарной. Но таких изомеров не существует ни с хлором, ни с другими добавленными группами. И в 1872 г. Кекуле предложил идею о том, что связи постоянно «изменяют положение между чередующимися секциями, как пара распахивающихся дверей» (рис. 7.3, *в*).

Кекуле не придавал большого значения своим формулам, используя их только в качестве символов для объяснения реакций. В то же время А.М.Бутлеров, напротив, считал, что каждому веществу должна отвечать своя формула с реальным, пусть и не определенным отношением к действительной структуре. Он писал: «Для каждого тела возможна будет в этом смысле одна рациональная формула, и когда сделаются известными общие законы зависимости химических свойств тел от их химического строения, то подобная формула будет отражением всех этих свойств».

Энергетическая неравноценность разных химических связей определяла в теории Бутлерова химическую активность веществ. В некотором роде он осуществил синтез представлений атомистики с непрерывностью химических отношений идеей, отвергнутой Ж. Прустом и Дж. Дальтоном. Появилась новая характеристика — непрерывность изменения энергии химических связей.

Теория Бутлерова называется теорией химического строения потому, что в ней химическая связь и химическая энергия — основа объединения атомов в молекулы. Валентность стала структурной

характеристикой связанного атома. Так, водород при переходе из одного соединения в другое меняет свои при-

257

знаки: в HCl он предстает как катион, в H—CH₃ и H—N — как ковалентно связанный атом, а в H—Na — как анион. Тогда реакционная способность отдельных фрагментов молекулы определяется энергией связи: для H—CH₃ $E = 412$, H—C (CH₃)₂ $E = 335$, H—C (C₆H₅)₃ $E = 67$ кДж/моль. Теория Бутлерова установила порядок связей и стала действенным орудием *органического синтеза*. Были синтезированы многие лекарства, красители, взрывчатые вещества. Но в производстве использовалось дорогое органическое сырье, способы получения многих необходимых веществ не были понятны. Например, при выращивании кристаллов с определенными дефектами в решетке было непонятно, как избавиться от других дефектов.

В понятие структуры вошло понятие энергетическая прочность химических связей. Понятие «свойство вещества» расчленилось на два: химические свойства макроскопического тела и реакционная способность отдельных структурных элементов, всей молекулы и всего вещества как совокупности молекул. Свойства вещества оказались зависящими не только от его состава, но и от структуры молекул. На основе учения о валентности была разработана теория строения молекул. Под молекулярной структурой понимают сочетание определенного числа атомов, закономерно расположенных в пространстве и связанных друг с другом посредством химической связи.

Вскоре были открыты оптические и геометрические изомеры органических соединений, которые можно объяснить только разным пространственным расположением молекул. В 1874 г. Я. Вант-Гофф и Бель выдвинули стройную концепцию, получившую название *стереохимии*. Они расширили теорию Бутлерова, описав изменения свойств вещества под влиянием таких факторов, как зеркальная изомерия, эффекты вращений вокруг какой-то связи и др. Вант-Гофф в книге «Химия в пространстве» высказал мысль о том, что четырехвалентный атом углерода в органических соединениях, расположенный в центре тетраэдра, в вершинах которого находятся связанные с углеродом атомы или атомные группы, является асимметрическим. Из анализа оптических свойств органических соединений он заключил, что любое соединение, вызывающее в растворе поворот плоскости поляризации, содержит атом углерода.

Изучением структур неорганических соединений занялся швейцарский химик А. Вернер и создал координационную теорию комплексных соединений. В «комплексах» вокруг центрального атома группируются в большом количестве атомы, радикалы и даже молекулы из-за возникновения так называемых вторичных валентностей. На основе его теории в наши дни объясняется химическое строение таких веществ, как гемоглобин, хлорофилл, ферменты, лаки. Он обнаружил предсказанные ранее оптически ак-

258

тивные неорганические изомеры — соединения железа, кобальта и хрома. Так оптическая активность перестала быть связанной только с атомами углерода.

Сразу же после открытия электрона начали предприниматься попытки связать его с природой химической связи. Немецкий физик Й.Штарк ввел понятие *валентных электронов*, связав валентность элемента с числом электронов на периферии атома.

Начало квантовой химии было положено работами Ф.Лондона и В.Гайтлера (1927). Они уже говорили об *электронном облаке*, и вероятность нахождения электрона в какой-то области определяли как квадрат волновой функции. Первые расчеты молекулы водорода показали, что ковалентную связь образуют два электрона с антипараллельными спинами. При этом увеличивается электронная плотность между двумя атомами почти до 20 %, что приводит к уменьшению энергии системы и ее стабилизации. Поэтому пребывание двух таких электронов энергетически более выгодно, чем нахождение одного электрона в поле своего ядра. Так как у атома водорода только один неспаренный электрон, он функционирует как одновалентный элемент. У гелия в нормальном состоянии нет неспаренных электронов — два электрона находятся на одной орбитали. Поэтому возбуждение атома гелия требует больших затрат энергии — 1672 Дж/моль. Такие энергии в ходе обычных химических реакций не наблюдаются, и гелий ведет себя как инертный газ.

Для расчета достаточно сложных молекул американский физик и химик Л. Полинг в 30-е гг. XX в. усовершенствовал и применил *метод атомных орбиталей*. Его резонансная теория валентности — это попытка объяснить структуру таких молекул, как бензол. По этой теории связи между атомами углерода в молекуле бензола грубо могут описываться как дробные. Такое описание подтверждается данными электронной дифракции и инфракрасной спектроскопии: если расстояние между атомами углерода с одинарной связью равно $1,54 \cdot 10^{-10}$ м, с двойной — $1,33 \cdot 10^{-10}$ м, то измерение для связей бензола дает $1,40 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. промежуточное значение между измерениями для одинарной и двойной связи.

Полинг писал: «Мы можем сказать... что молекула не может быть удовлетворительно представлена любой отдельно взятой структурой валентной связи и оставить попытки связать ее структуру и свойства со структурой и свойствами других молекул... Но с помощью понятия резонанса мы можем дать объяснение свойствам молекулы, прямо и просто оперируя свойствами других молекул. Для нас удобно говорить о резонансе молекул среди нескольких электронных структур». Хотя теория резонанса не опирается концептуально на квантовую механику, но она применяется при расчете таких свойств молекул, как

стабильность во время реакции. Уравнение Шредингера записывается для каждой из ре-
259

зонансных структур, потом волновые функции объединяются линейно, но к каждому уравнению добавляется свой фактор, зависящий от того «влияния», которое каждая идеальная структура осуществляет. Наибольшую известность (и две Нобелевские премии) Полингу принесли расчеты атомной структуры молекул белков. Но трудности вычислений «заморозили» выполнение намеченной обширной программы химических исследований (точные расчеты были сделаны только для водорода, а остальные — на приближениях к водороду), и особого прогресса в развитии химии как науки до широкого использования ЭВМ не произошло.

Исследовать молекулярные структуры с помощью **рентгеновского излучения** начали М.Лауэ, Г. и У.Брэгги, П.Дебая и др. Развивался рентгеноструктурный анализ, использовались дифракция рентгеновских лучей и электронов, спектроскопические методы и метод ядерного магнитного резонанса, что позволило определить строение огромного числа молекул. Это и повлияло на развитие методов молекулярной спектроскопии — для наблюдений стали использовать высокочувствительные спектрографы, а для обработки данных — быстродействующие ЭВМ. Наиболее ценным интеллектуальным достижением химии является точное установление молекулярных структур огромного числа веществ — от чистой воды и сложных бронзовых сплавов до белка родопсина в палочках сетчатки глаза человека.

Переход от структурной химии к учению о химических процессах — переход на еще более высокий уровень знаний, когда объекты изучаются более разносторонне. При обсуждении теории Бутлерова выяснилось, что связи не должны быть «жесткими». На усилении динамических факторов в понятии структуры настаивал известный химик Н.А.Меншуткин. Масс-спектроскопические и радиоспектроскопические методы дали информацию о динамических аспектах молекул, но не поколебали основных положений структурной химии. В 60-е гг. XX в. выяснилось, что часть систем, которые ранее интерпретировались как качественно отличные друг от друга изомеры, «можно описать как процессы миграции определенной группы атомов между атомными центрами в качественно неизменной молекуле» (Ю.Жданов, Л.Олехнович и В.Минкин). То, что валентность может быть не целочисленной, обнаружилось в новых соединениях, но введение координационного числа не прояснило ситуацию. Квантовая химия вместо валентности свободного атома ввела понятие спин-валентности — числа электронов с неспаренными спинами на внешних орбитах. Вместо подсчета целого числа связей атома с другими атомами рассчитывается сумма кратностей всех его связей, которая может быть и не целочисленной. Теория резонанса Полинга вызвала в свое время острые философские дискуссии. Можно считать, что она явилась удобной моделью: как и в случае с интерпретацией квантовой теории, модель резонансной структуры оказалась далекой от при-

260

вычных описаний природы и вызвала некоторое смущение части философов и естествоиспытателей проблемой использования моделей вообще.

Наличие или отсутствие связи между атомами изображают в виде графических или структурных формул. Появился термин «топология молекул». Как известно, топология — это раздел математики, который изучает свойства тел, не зависящие от их формы и размеров, или неметрические свойства. Молекулы же обладают как метрическими (длины химических связей, углы между ними и т.п.), так и неметрическими (могут быть циклическими и нециклическими, как бензол и н-бутан соответственно, и т.п.) свойствами. Топология молекулярных систем связана с их свойствами.

7.4. Строение веществ в разных агрегатных состояниях

Все вещества могут находиться в разных агрегатных состояниях — твердом, жидком, газообразном и плазменном. В древности считали: мир состоит из земли, воды, воздуха и огня. Агрегатные состояния веществ соответствуют этому наглядному разделению. Опыт показывает, что границы между агрегатными состояниями весьма условны. Газы при низких давлениях и невысоких температурах рассматриваются как идеальные, молекулы в них соответствуют материальным точкам, которые могут только сталкиваться по законам упругого удара. Силы взаимодействия между молекулами в момент удара пренебрежимо малы, сами соударения происходят без потерь механической энергии. Но с увеличением расстояния между молекулами приходится учитывать и взаимодействие молекул. Эти взаимодействия начинают сказываться при переходе из газообразного состояния в жидкое или твердое. Между молекулами могут возникнуть разного рода взаимодействия.

Силы межмолекулярного взаимодействия не обладают насыщенностью, отличаясь от сил химического взаимодействия атомов, приводящего к образованию молекул. Они могут быть электростатическими при взаимодействии между заряженными частицами. Опыт показал, что квантово-механическое взаимодействие, зависящее от расстояния и взаимной ориентации молекул, пренебрежимо мало при расстояниях между молекулами более 10^{-9} м. В разреженных газах им можно пренебречь или считать, что потенциальная энергия взаимодействия практически равна нулю. При небольших расстояниях r эта энергия мала, при $r > r_0$ действуют силы взаимного притяжения ($F < 0$), при $r > r_0$ — взаимного отталкивания ($F > 0$), а при $r = r_0$ силы

притяжения и отталкивания молекул уравновешены и $F = 0$. Здесь силы определены по связи их с потенциальной энергией $F = -dE/dr$. Но частицы движутся, обладая неким запасом кинетической энергии.

Пусть одна молекула неподвижна, а другая сталкивается с ней, имея такой запас энергии. При сближении молекул силы притяжения совершают положительную работу и потенциальная энергия их взаимодействия уменьшается до расстояния r_0 . При этом кинетическая энергия (и скорость) растет. Когда расстояние станет меньше r_0 , силы притяжения сменятся силами отталкивания. Работа, совершаемая молекулой против этих сил, отрицательна.

Молекула будет сближаться с неподвижной молекулой до тех пор, пока ее кинетическая энергия не перейдет полностью в потенциальную. Минимальное расстояние d , на которое молекулы могут сблизиться, называют *эффективным диаметром молекулы*. После остановки молекула начнет удаляться под действием сил отталкивания с возрастающей скоростью. Пройдя вновь расстояние r_0 , молекула попадет в область сил притяжения, которые замедлят ее удаление. Эффективный диаметр зависит от начального запаса кинетической энергии, т.е. это величина не постоянная. При расстояниях, равных r_0 , потенциальная энергия взаимодействия имеет бесконечно большое значение или «барьер», препятствующий сближению центров молекул на меньшее расстояние. Отношение средней потенциальной энергии взаимодействия к средней кинетической энергии α и определяет агрегатное состояние вещества: для газов $\alpha \ll 1$, для жидкости $\alpha = 1$, для твердых тел $\alpha \gg 1$.

Конденсированные среды — это жидкости и твердые тела. В них атомы и молекулы расположены близко, почти соприкасаясь. Среднее расстояние между центрами молекул в жидкостях и твердых телах порядка $(2 — 5) \cdot 10^{-10}$ м. Примерно одинаковы и их плотности. Межатомные расстояния превышают расстояния, на которые электронные облака проникают друг в друга настолько, что возникают силы отталкивания. Для сравнения, в газах при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами порядка $33 \cdot 10^{-10}$ м.

В *жидкостях* межмолекулярное взаимодействие сказывается сильнее, тепловое движение молекул проявляется в слабых колебаниях около положения равновесия и даже перескоках из одного положения в другое. Поэтому в них имеют место только ближний порядок в расположении частиц, т.е. согласованность в расположении только ближайших частиц, и характерная текучесть.

Твердые тела характеризуются жесткостью структуры, обладают точно определенными объемом и формой, которые под влиянием температуры и давления меняются много меньше. В твердых телах возможны состояния аморфное и кристаллическое. Существуют и промежуточные вещества — жидкие кристаллы. Но атомы в твердых телах вовсе не неподвижны, как можно было бы подумать. Каждый из них все время колеблется под влиянием упругих сил, возникающих между соседями. У большинства элементов и соединений под микроскопом обнаруживают кристаллическую структуру.

Так, зерна поваренной соли имеют вид идеальных кубиков. В кристаллах атомы закреплены в узлах кристаллической решетки и могут колебаться только вблизи узлов решетки. Кристаллы составляют истинно твердые тела, а такие твердые тела, как пластмасса или асфальт, занимают как бы промежуточное положение между твердыми телами и жидкостями. Аморфное тело имеет, как и жидкость, ближний порядок, но вероятность перескоков мала. Так, стекло можно рассматривать как переохлажденную жидкость, у которой повышена вязкость. Жидкие кристаллы обладают текучестью жидкостей, но сохраняют упорядоченность расположения атомов и обладают анизотропией свойств.

Химические связи атомов (ионов) в кристаллах такие же, как и в молекулах. Структура и жесткость твердых тел определяются различием в электростатических силах, связывающих вместе составляющие тело атомы. Механизм, связывающий атомы в молекулы, может приводить к образованию твердых периодических структур, которые можно рассматривать как макромолекулы. Подобно ионным и ковалентным молекулам, существуют ионные и ковалентные кристаллы. Ионные решетки в кристаллах скреплены ионными связями (см. рис. 7.1). Структура поваренной соли такова, что у каждого иона натрия имеется шесть соседей — ионов хлора. Этому распределению соответствует минимум энергии, т.е. при образовании такой конфигурации выделяется максимальная энергия. Поэтому при понижении температуры ниже точки плавления наблюдается стремление образовывать чистые кристаллы. С ростом температуры тепловая кинетическая энергия достаточна для разрыва связи, кристалл начнет плавиться, структура — разрушаться. Полиморфизм кристаллов — это способность образовывать состояния с разной кристаллической структурой.

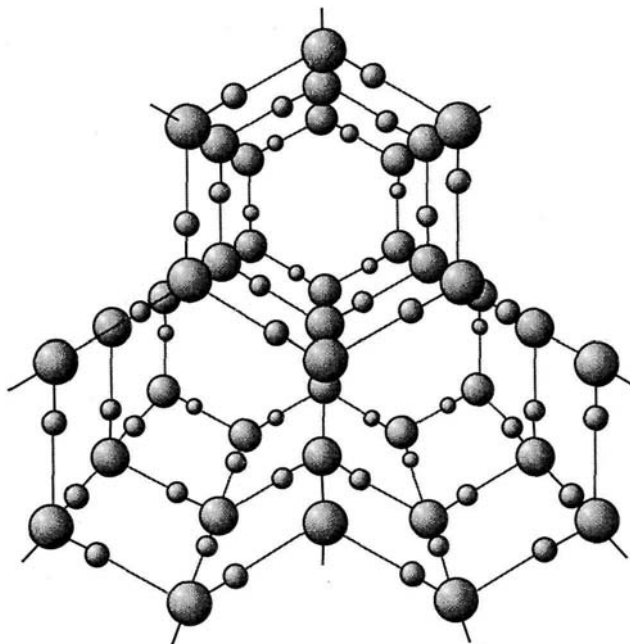
Когда распределение электрического заряда в нейтральных атомах меняется, может возникнуть слабое взаимодействие между соседями. Эта связь называется молекулярной или ван-дер-ваальсовой (как в молекуле водорода). Но силы электростатического притяжения могут возникать и между нейтральными атомами, тогда никаких перестроек в электронных оболочках атомов не происходит. Взаимное отталкивание при сближении электронных оболочек смещает центр тяжести отрицательных зарядов относительно положительных. Каждый из атомов индуцирует в другом электрический диполь, и это приводит к их притяжению. Это действие межмолекулярных сил или сил Ван-дер-Ваальса, имеющих большой радиус действия.

Поскольку атом водорода очень мал и его электрон легко сместить, он часто притягивается сразу к двум атомам, образуя водородную связь. Водородная связь ответственна и за взаимодействие друг с другом

молекул воды. Ею объясняются многие уникальные свойства воды и льда (рис. 7.4).

263

Рис. 7.4. Структура одного из типов кристаллов льда

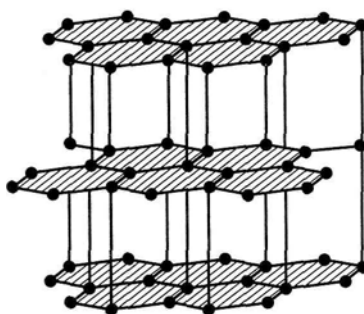


Ковалентная связь (или атомная) достигается из-за внутреннего взаимодействия нейтральных атомов. Примером такой связи служит связь в молекуле метана. Разновидностью углерода с сильной связью является алмаз (четыре атома водорода заменяются четырьмя атомами углерода).

Так, углерод, построенный на ковалентной связи, образует кристалл в форме алмаза. Каждый атом окружен четырьмя атомами, образующими правильный тетраэдр. Но каждый из них является одновременно вершиной соседнего тетраэдра. В других условиях те же атомы углерода кристаллизуются в *графит*. В графите они соединены тоже атомными связями, но образуют плоскости из шестиугольных сотовидных ячеек, способных к сдвигу. Расстояние между атомами, расположенными в вершинах шестигранников, равно 0,142 нм. Слои расположены на расстоянии 0,335 нм, т.е. связаны слабо, поэтому графит пластичен и мягок (рис. 7.5). В 1990 г. возник бум исследовательских работ, вызванный сообщением о получении нового вещества — *фуллерита*, состоящего из молекул углерода — фуллеренов. Эта форма углерода молекулярная, т.е. минимальным элементом является не атом, а молекула. Она названа в честь архитектора Р.Фуллера, который в 1954 г. получил патент на строительные конструкции из шестиугольников и пятиугольников, составляющих полусферу. Молекула из 60 атомов углерода диаметром 0,71 нм была открыта в 1985 г., потом были обнаружены молекулы C_{70} , C_{76} , C_{84} и т.д. Все они имели устойчивые поверхности,

264

Рис. 7.5. Структура графита



но наиболее устойчивыми оказались молекулы C_{60} и C_{70} . Логично предположить, что графит использован как исходное сырье для синтеза фуллеренов. Если это так, то радиус шестиугольного фрагмента должен быть 0,37 нм. Но он оказался равным 0,357 нм. Это различие в 2 % связано с тем, что атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестигранников, унаследованных от графита, и 12 правильных пятигранников, т.е. конструкция напоминает футбольный мяч. Получается, что при «сшивании» в замкнутую сферу часть плоских шестигранников превратилась в пятигранники. При комнатной температуре молекулы C_{60} конденсируются в структуру, где каждая молекула имеет 12 соседей, отстоящих друг от друга на расстоянии 0,3 нм. При $T = 349$ К происходит фазовый переход 1-го рода — решетка перестраивается в кубическую. Сам кристалл — полупроводник, но при добавлении щелочного металла в кристаллическую пленку C_{60} возникает сверхпроводимость при температуре 19 К. Если в эту полую молекулу внедрить тот или иной атом, его можно использовать как основу для создания запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации: плотность записи достигнет $4 \cdot 10^{12}$ бит/см². Для сравнения — пленка ферромагнитного материала дает плотность записи порядка 10^7 бит/см², а оптические диски, т.е. лазерная технология, — 10^8 бит/см². Этот углерод обладает и другими уникальными свойствами, особенно важными в медицине и фармакологии.

В кристаллах металлов проявляет себя *металлическая связь*, когда все атомы в металле отдают «в коллективное пользование» свои валентные электроны. Они слабо связаны с атомными остовами, могут свободно двигаться по кристаллической решетке. Около 2/5 химических элементов составляют металлы. В металлах (кроме ртути) связь образуется при перекрывании вакантных орбиталей атомов металла и отрыва электронов из-за образования кристаллической решетки. Получается, что катионы решетки окутаны электронным газом. Металлическая связь возникает, когда атомы сближаются на расстояние, меньшее размеров облака внешних электронов. При такой конфигурации (принцип Паули) растет энергия внешних электронов, и ядра соседей начинают притягивать эти внешние электроны, размывая электронные облака, равномерно распределяя их по металлу и превращая в электронный газ. Так возникают электроны проводимости, объясняющие большую электрическую проводимость металлов. В ионных и ковалентных кристаллах внешние электроны практически связаны, и проводимость этих твердых тел очень мала, их называют *изоляторами*.

265

Внутренняя энергия жидкостей определяется суммой внутренних энергий макроскопических подсистем, на которые ее можно мысленно разделить, и энергий взаимодействия этих подсистем. Взаимодействие осуществляется через молекулярные силы с радиусом действия порядка 10^{-9} м. Для макросистем энергия взаимодействия пропорциональна площади соприкосновения, поэтому она мала, как и доля поверхностного слоя, но это не обязательно. Ее называют поверхностной энергией и следует учитывать в задачах, связанных с поверхностным натяжением. Обычно жидкости занимают больший объем при равном весе, т.е. имеют меньшую плотность. Но почему объемы льда и висмута уменьшаются при плавлении и даже после точки плавления некоторое время сохраняют эту тенденцию? Получается, что эти вещества в жидком состоянии более плотны.

В жидкости на каждый атом действуют его соседи, и он колеблется внутри анизотропной потенциальной ямы, которую они создают. В отличие от твердого тела эта яма неглубока, так как дальние соседи почти не влияют. Ближайшее окружение частиц в жидкости меняется, т. е. жидкость течет. При достижении определенного значения температуры жидкость закипит, во время кипения температура остается постоянной. Поступающая энергия расходуется на разрыв связей, и жидкость при полном их разрыве превращается в газ.

Плотности жидкостей значительно больше плотностей газов при тех же давлениях и температурах. Так, объем воды при кипении составляет только 1/1600 объема той же массы водяного пара. Объем жидкости мало зависит от давления и температуры. При нормальных условиях ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па) вода занимает объем 1 л. При понижении температуры до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ объем уменьшится только на 0,0021, при увеличении давления — в два раза.

Хотя простой идеальной модели жидкости пока нет, микроструктура ее достаточно изучена и позволяет качественно объяснить большинство ее макроскопических свойств. То, что в жидкостях сцепление молекул слабее, чем в твердом теле, заметил еще Галилей; его удивило, что на листьях капусты скапливаются большие капли воды и не растекаются по листу. Пролитая ртуть или капли воды на жирной поверхности принимают из-за сцепления форму маленьких шариков. Если молекулы одного вещества притягиваются к молекулам другого вещества, говорят о *смачивании*, например клей и дерево, масло и металл (несмотря на огромное давление, масло удерживается в подшипниках). Но вода поднимается в тонких трубочках, называемых капиллярными, и поднимается тем выше, чем тоньше трубка. Иного объяснения, кроме эффекта смачивания воды и стекла, тут быть не может. Силы смачивания между стеклом и водой больше, чем между молекулами воды. Со ртутью — эффект обратный: смачивание ртути и стекла слабее, чем силы сцепления между атомами ртути. Галилей заметил, что смазанная жиром иголка может держаться на воде, хотя это противоречит закону Архимеда. Когда иголка плавает, мож-

266

но заметить небольшой прогиб поверхности воды, стремящийся как бы распрямиться. Силы сцепления между молекулами воды достаточны, чтобы не позволить иголке провалиться в воду. Поверхностный слой как пленка защищает воду, это и есть *поверхностное натяжение*, которое стремится придать форме воды наименьшую поверхность — шаровую. Но по поверхности спирта иголка уже не будет плавать, потому что при добавлении спирта в воду уменьшается поверхностное натяжение, и иголка тонет. Мыло тоже уменьшает поверхностное натяжение, поэтому горячая мыльная пена, проникая в трещины и щели, лучше отстирывает грязь, особенно содержащую жир, тогда как чистая вода просто свернулась бы в капельки.

Плазма — четвертое агрегатное состояние вещества, представляющее собой газ из совокупности заряженных частиц, взаимодействующих на больших расстояниях. При этом число положительных и отрицательных зарядов примерно равное, так что плазма электрически нейтральна. Из четырех стихий плазма соответствует огню. Чтобы перевести газ в состояние плазмы, нужно его *ионизовать*, оторвать электроны от атомов. Ионизацию можно осуществить нагреванием, воздействием электрического разряда или жесткого излучения. Вещество во Вселенной находится в основном в ионизованном состоянии. В звездах ионизация вызывается термически ($T \approx 10^6$ К), в разреженных туманностях и межзвездном газе — ультрафиолетовым излучением звезд. Из плазмы состоит и наше Солнце, его излучение ионизует верхние слои земной атмосферы, называемые *ионосферой*, от ее состояния зависит возможность дальней радиосвязи. В земных условиях плазма встречается редко — в лампах дневного света или в дуге электросварки. В лабораториях и технике плазму чаще всего получают электрическим разрядом. В природе это делают молнии. При ионизации

разрядом возникают электронные лавины, подобные процессу цепной реакции. Для получения термоядерной энергии используют метод инжекции: разогнанные до очень больших скоростей газовые ионы впрыскиваются в магнитные ловушки, притягивают к себе электроны из окружающей среды, образуя плазму. Используют и ионизацию давлением — ударными волнами. Этот способ ионизации — в сверхплотных звездах и, возможно, в ядре Земли.

Всякая сила, действующая на ионы и электроны, вызывает электрический ток. Если он не связан с внешними полями и не замкнут внутри плазмы, она поляризуется. Плазма подчиняется газовым законам, но при наложении магнитного поля, упорядочивающего движение заряженных частиц, она проявляет совершенно необычные для газа свойства. В сильном магнитном поле частицы начинают крутиться вокруг силовых линий, а вдоль магнитного поля они движутся свободно. Говорят, что это винтообразное движение смещает структуру силовых линий поля и поле «вморожено» в плазму. Разреженная плазма описывается системой частиц, а более плотная — моделью жидкости.

267

Высокая электропроводность плазмы — главное отличие ее от газа. Проводимость холодной плазмы поверхности Солнца ($0,8 \cdot 10^{19}$ Дж) достигает проводимости металлов, а при термоядерной температуре ($1,6 \cdot 10^{15}$ Дж) водородная плазма проводит ток в 20 раз лучше меди при нормальных условиях. Поскольку плазма способна проводить ток, к ней часто применяют модель проводящей жидкости. Она считается сплошной средой, хотя сжимаемость отличает ее от обычной жидкости, но это отличие проявляется только при течениях, скорость которых больше скорости звука. Поведение проводящей жидкости исследуется в науке, называемой *магнитной гидродинамикой*. В космосе всякая плазма является идеальным проводником, и законы вмороженного поля имеют широкое применение. Модель проводящей жидкости позволяет понять механизм удержания плазмы магнитным полем. Так, из Солнца выбрасываются плазменные потоки, влияющие на атмосферу Земли. Сам поток не имеет магнитного поля, но и постороннее поле не может в него проникнуть по закону вмороженности. Плазменные солнечные потоки выталкивают посторонние межпланетные магнитные поля из окрестностей Солнца. Возникает магнитная полость, где поле слабее. Когда эти корпускулярные плазменные потоки приближаются к Земле, они сталкиваются с магнитным полем Земли и вынуждены обтекать его по тому же закону. Получается некая каверна, где собрано магнитное поле и куда не проникают плазменные потоки. На ее поверхности скапливаются заряженные частицы, которые были обнаружены ракетами и спутниками, — это внешний радиационный пояс Земли. Эти идеи использовались и при решении задач удержания плазмы магнитным полем в специальных устройствах — токамаках (от сокращения слов: тороидальная камера, магнит). С полностью ионизованной плазмой, удерживаемой в этих и других системах, связывают надежды на получение на Земле управляемой термоядерной реакции. Это дало бы чистый и дешевый источник энергии (морская вода). Ведутся работы и по получению и удержанию плазмы при помощи сфокусированного лазерного излучения.

7.5. Строение и свойства металлов

Сведения о твердых телах, описанные еще Платоном, незначительно изменились к XVII в. Представления о геометрическом строении кристаллов, завершенные в XX в. Е.С.Федоровым и А. Шенфлисом, не касались физических свойств твердых тел. Открытие электрона (1897), дифракции рентгеновских лучей в кристаллах (1912) и строения атома (1913) положили начало *микроскопическим теориям* в области физики твердого тела.

268

Внутренняя энергия твердого тела состоит из кинетической энергии колебаний и энергии связи; подведенная к телу энергия расходуется примерно поровну на эти две части. В твердых телах атомы и молекулы почти неподвижны, они закреплены электромагнитными взаимодействиями с соседними частицами и не могут свободно перемещаться. При уменьшении расстояния между соседними частицами атомы начинают отталкиваться, при увеличении — притягиваться, т.е. каждый атом находится в потенциальной яме и способен колебаться вокруг точки равновесия. Эти скудные возможности перемещений атомов отражены в тепловых свойствах твердых тел. При поступлении теплоты энергия распределится между всеми атомами, вынуждая ионы в узлах кристаллической решетки колебаться с большей амплитудой. Но из-за жесткости связей колебания (их сопоставляют с фононами) будут передаваться, обусловив распространение энергии. Следовательно, эти колебания ионов не индивидуальны, для них характерна коллективная динамика.

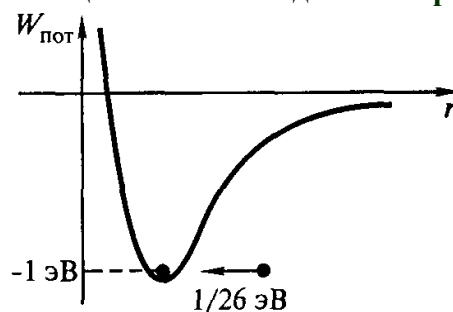
Обратимся к экспериментально определенным значениям удельной теплоемкости твердых тел (табл. 7.1). Все они содержат множитель $1,0 \cdot 10^{-23}$ Дж на 1°C на молекулу, т.е. в 2 раза больший, чем для идеальных газов. Сообщаемая атому твердого тела энергия $1,0 \cdot 10^{-23}$ Дж поровну расходуется на увеличение потенциальной и колебательной энергий связанного атома. Если все атомы получают равную энергию колебаний, то температура твердого тела возрастет на 1°C , т.е. предложенная выше модель качественно объясняет особенности теплоемкости твердых тел.

Таблица 7.1. Удельная теплоемкость с некоторых металлов при комнатной температуре

| Металл | c , Дж/(°С · г) | Плотность ρ , г/см ³ | $c\rho$, Дж/(°С · см ³) | Масса, г/атом | c , Дж/(°С · атом) |
|----------|----------------------|---|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Литий | 3,424 | 0,53 | 1,836 | $1,2 \cdot 10^{-23}$ | $3,948 \cdot 10^{-23}$ |
| Алюминий | 0,915 | 2,7 | 2,478 | $4,5 \cdot 10^{-23}$ | $4,074 \cdot 10^{-23}$ |
| Медь | 0,392 | 8,9 | 3,444 | $10,1 \cdot 10^{-23}$ | $4,074 \cdot 10^{-23}$ |
| Серебро | 0,234 | 10,5 | 2,478 | $18,0 \cdot 10^{-23}$ | $4,242 \cdot 10^{-23}$ |
| Вольфрам | 0,133 | 19,3 | 2,604 | $30,6 \cdot 10^{-23}$ | $4,158 \cdot 10^{-23}$ |
| Золото | 0,132 | 19,3 | 2,524 | $32,8 \cdot 10^{-23}$ | $4,284 \cdot 10^{-23}$ |
| Свинец | 0,126 | 11,3 | 1,428 | $34,5 \cdot 10^{-23}$ | $4,415 \cdot 10^{-23}$ |
| Уран | 0,117 | 19,0 | 2,226 | $39,6 \cdot 10^{-23}$ | $4,684 \cdot 10^{-23}$ |

269

Рис. 7.6. Пример потенциальной ямы для электрона в твердом теле



Изобразим потенциальную яму, в которой находится атом внутри твердого тела. При усилении колебаний атомы начинают смещаться, колебания происходят уже около нового положения равновесия и среднее расстояние между атомами возрастает. Этим объясняется расширение тел при нагревании. Но расширение нельзя объяснить только увеличением амплитуды, должны измениться сами равновесные состояния, поэтому и потенциальная яма должна быть асимметричной (рис. 7.6). Химическая энергия связи, приходящаяся на один атом, составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Средняя энергия теплового движения при комнатной температуре равна примерно $1/26$ этой величины. Это значит, что атомы в твердом теле находятся в глубокой потенциальной яме, и их колебания не позволяют им подняться высоко по ее стенкам. Связь между кинетической энергией колебаний атомов и температурой примерно такая же, как и в газах.

Обычно хорошие проводники электричества являются и хорошими проводниками теплоты. В металлах один или несколько электронов могут свободно перемещаться по телу проводника, образуя *электронный газ*. В изоляторах электроны «прикреплены» к своему атому. *Электроны проводимости* более подвижны, чем закрепленные атомы, и они быстрее переносят теплоту по образцу проводника. Если даже от каждого атома в металле высвободится всего по одному электрону, то концентрация свободных электронов будет равна числу атомов — в 1 м³ металла окажется 10^{28} — 10^{29} свободных электронов. Тот факт, что носителями тока являются именно электроны, был доказан экспериментально в 1938 г. И.К.Кикоиным и С.В.Грабарем. В соответствии со способностью проводить ток все вещества подразделяются на проводники, полупроводники и изоляторы (диэлектрики). В ионных и ковалентных кристаллах внешние электроны практически связаны, поэтому их проводимость очень мала и они называются изоляторами.

На основе представлений о носителях тока в металлах — электронах — немецким ученым П.Друде разработана **классическая теория металлов** (1900). Впоследствии эту теорию усовершенствовал голландский ученый Г.А.Лоренц. Электроны проводимости ведут себя как атомы идеального газа, но в отличие от них сталкиваются не между собой, а с ионами, образующими кристаллическую решетку. Столкновения устанавливают равновесие между двумя подсистемами — решеткой и электронным газом. По кинетической теории средняя скорость теплового движения электронов равна 10^5 м/с. Наложение электрического поля на

270

хаотическое движение электронов придает им упорядоченное движение, но его скорость меньше скорости теплового движения.

Соппротивление металлов объясняли соударениями электронов с ионами, и плотность тока прямо пропорциональна напряженности поля (закон Ома) с коэффициентом σ (проводимость): $\sigma = ne^2\lambda/2m\nu$ (здесь n

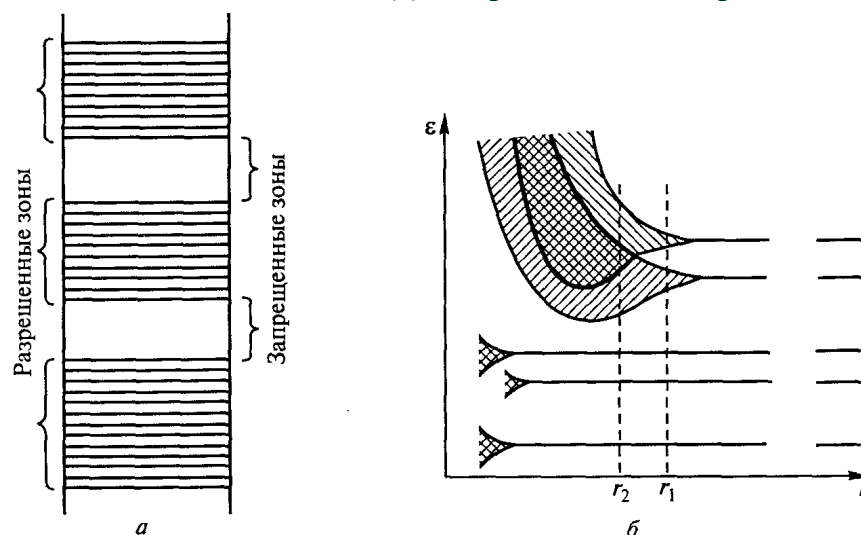
— плотность электронов, e — заряд электрона, m — его масса, v — скорость теплового движения, λ — длина свободного пробега). К концу свободного пробега электрон приобретает дополнительную кинетическую энергию, которую теряет при столкновении с ионом. Эта энергия, переходя во внутреннюю, приводит к повышению температуры. Количество этой энергии пропорционально квадрату напряженности поля (закон Джоуля—Ленца). Но с ростом температуры сопротивление металлов росло быстрее, чем предсказывала эта теория. Кроме того, теория дает большее значение теплоемкости металлов по сравнению с опытным. В 1819 г. французские ученые П. Дюлонг и А. Пти установили, что теплоемкость почти всех твердых тел не зависит от температуры и равна 25,2 Дж/моль. Этот закон многократно подтверждался опытами при разных температурах. По классической теории 1 грамм-моль вещества, содержащий N частиц, должен обладать энергией $3RT$ или теплоемкостью 25,2 Дж/моль. Отклонение от теории при более точных измерениях наблюдали многие ученые. В конце XIX в. проверили закон Дюлонга и Пти при низких температурах, и оказалось, что теплоемкости металлов при очень низких температурах стремятся к абсолютному нулю.

Квантовая теория металлов сняла эти и другие несоответствия классической теории. В 1906 г. Эйнштейн объяснил малую теплоемкость твердых тел при низких температурах. Он предположил, что все атомы колеблются с одинаковой частотой, квантованной в соответствии с гипотезой Планка. П.Дебай и М.Борн уточнили: теплоемкость твердых тел при низких температурах стала меняться пропорционально кубу температур, что привело закон в согласие с опытом вплоть до самых низких температур. Грюнайзен вывел новое уравнение состояния твердых тел и получил из него зависимость между линейным коэффициентом расширения твердого тела и его сжимаемостью. В 1924 г. Я.И.Френкель показал, что классическая концепция газа электронов, приписывающая им среднюю кинетическую энергию $3/2kT$, ошибочна. Внешние электроны обладают коллективными свойствами, и их кинетическая энергия должна быть в 200 раз больше тепловой. Затем были учтены разработанная для электронов статистика Ферми—Дирака, волновая природа электронов, и движение их в решетке металла стали рассматривать как рассеяние электронных волн. «Валентные электроны» в металле приобрели черты очень сжатого газа, который подчиняется уже не статистике Максвелла, а статистике Ферми—Дирака.

271

Итак, энергетическое состояние любого электрона определяется четырьмя квантовыми числами. Невозбужденное состояние соответствует минимуму свободной энергии. В индивидуальном атоме электроны на орбитах удерживаются ядром и занимают определенные энергетические уровни, причем по квантовой теории электрон не может иметь энергию, лежащую между уровнями. В твердом теле все сложнее. Близкие расстояния атомов в твердом теле приводят к взаимодействию, и электроны будут иметь несколько отличные значения энергии в силу принципа Паули. Если кристалл содержит 10^{20} атомов, получится такое огромное количество индивидуальных уровней, что они образуют почти непрерывную зону (зону разрешенных энергетических уровней). Учет влияния решетки (атомного остова) на электроны в кристаллических твердых телах показывает, что в кристалле можно выделить определенные энергетические области, для которых уравнение Шредингера не имеет решений. Этими запрещенными полосами (или зонами) в распределении энергии по квантовым состояниям отделены друг от друга «разрешенные» энергетические зоны (рис. 7.7, а, б). Характер зон определяет электронные свойства твердого тела, позволяя классифицировать их на проводники и непроводники. Такое описание во многом упрощено, но удобно. Разрешенную зону, возникшую из того уровня, на котором находились валентные электроны в основном состоянии атома, называют *валентной зоной*. При $T = 0$ К валентные электроны заполняют попарно нижние уровни валентной зоны, а более высокие раз-

Рис. 7.7. Энергетические зоны в металле (а) и образование зон при сближении атомов (б)

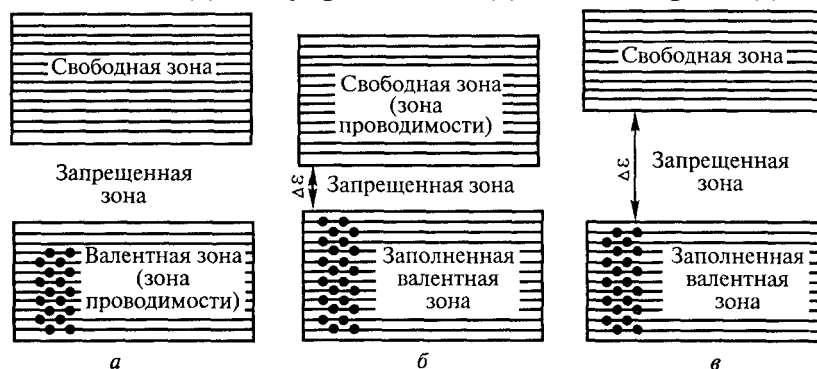


272

решенные зоны останутся свободными от них. Каждый энергетический уровень при сближении атомов расщепляется, образуя целую зону плотно расположенных уровней. Эти зоны разрешенных уровней разделены промежутками — зонами запрещенных уровней. Ширина зон не зависит от размеров кристалла. Но чем плотнее атомы расположены, тем теснее располагаются уровни в зоне. Валентные электроны заполняют нижние энергетические уровни разрешенной зоны, а более высокие уровни этой зоны остаются свободными. В зависимости от степени заполнения зоны возможны различные ситуации. Они и лежат в основе разделения твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики.

В зависимости от степени заполнения валентной зоны и ширины запрещенной зоны и возможны три случая, показанные на рис. 7.8. Когда электроны заполняют валентную зону не полностью (рис. 7.8, а), достаточно сообщить находящимся на верхних уровнях электронам небольшую энергию (порядка $1,6 \cdot 10^{-42}$ Дж) для перевода их на более высокий уровень. Для сравнения: энергия теплового движения при температуре 1 К составляет $1,6 \cdot 10^{-23}$ Дж. Дополнительная энергия, вызванная действием электрического поля, также способна перевести электроны на более высокие уровни. Электроны будут ускоряться полем и приобретать дополнительную скорость в направлении против поля. Кристалл с такой схемой уровней — металл, и валентная зона называется *зоной проводимости*. Кусок металла можно представить совокупностью ядер, между которыми находятся электроны, играющие роль «клея». Некоторые из них мигрируют по пространству между ионами металла, но большая часть не может оторваться от своих ядер. Мигрирующие электроны называют морем Ферми, или просто морем электронов, поэтому металл являет собой как бы погруженный в море Ферми каркас из ионов. Именно свобода перемещения электронов

Рис. 7.8. Схема связи ширины запрещенной зоны и электрических свойств кристалла в металле (а), полупроводнике (б) и диэлектрике (в)



273

обуславливает электро- и теплопроводность металлов. Такое свойство железа, как ковкость, связано с возможностью групп ионов сдвигаться относительно друг друга в электронном море. Когда уровни валентной зоны полностью заняты электронами — зона заполнена (рис. 7.8, б, в). Для увеличения энергии электронов нужно сообщить им энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны. Поэтому электрические свойства кристалла определяются шириной запрещенной зоны. Если она невелика, то тепловая энергия способна перевести часть электронов в верхнюю свободную зону, и для них эта зона станет зоной проводимости. Одновременно станет возможным переход электронов валентной зоны на свободные верхние уровни. Такое вещество является **полупроводником**.

Полупроводники стали активно входить в технику с 20-х гг. XX в. Появились выпрямители и фотоэлементы, но теории не было. Разработанная в конце 30-х гг. в Ленинградском физико-техническом институте теория дала физическую основу, на которой во всем мире быстро стала развиваться полупроводниковая технология. Установили, что примеси могут менять и электропроводность, и ее знак. *Собственная проводимость* возникает в результате переходов электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. Освобождаемое место называли дыркой. Так идут два процесса: появление попарно свободных электронов и дырок и рекомбинация, которая приводит к попарному исчезновению электронов и дырок. В отсутствие поля они движутся хаотически, а при включении — происходит перенос заряда в кристалле, который накладывается на хаотическое движение. Каждой температуре соответствует определенная концентрация электронов и дырок. *Примесная проводимость* полупроводников возникает, если некоторые атомы в узлах решетки заменить на другие, валентность которых отличается на единицу. Так, при введении в кристалл германия пентавалентного фосфора пятый электрон оказывается как бы лишним и может легко отщепиться от атома за счет теплового движения. Атомы примесей, которые поставляют электрон проводимости, называют *донорами*. Если же введен элемент с меньшей валентностью, он может поставить только дырку, и называют его *акцептором*.

Кристалл кремния или германия можно изготовить так, чтобы одна его половина была полупроводником акцепторного *p*-типа, когда ток переносится положительно заряженными дырками, а другая — донорного *n*-типа, когда ток переносят отрицательно заряженные электроны. Между этими половинами будет тонкая

прослойка, которую называют « p — n -переходом». Такой кристалл обладает уникальным свойством — проводит ток только в одном направлении, т. е. действует как выпрямляющий элемент. Полупроводники типа $n-p-n$ применяют в транзисторах.

274

Изоляторы (диэлектрики) имеют большую ширину запрещенной зоны, и тепловой энергии уже не достаточно для перевода через нее электронов.

Сегнетоэлектрики — особая группа кристаллических диэлектриков, которая способна к самопроизвольной поляризации при отсутствии внешнего электрического поля. У пластинки кварца, вырезанной перпендикулярно его кристаллографической оси, например, при сжатии вдоль оси на гранях появляются связанные заряды. Название связано с сегнетовой солью, у которой это свойство было обнаружено. В этих кристаллах нет центра симметрии. Для каждого сегнетоэлектрика существует область, когда эти особые свойства проявляются. Так, для сегнетовой соли — это диапазон температур от -15 до $+22,5$ °C (точка Кюри). Поляризация в них возникает при механической нагрузке в степени, пропорциональной степени упругой деформации. В этом состоит *пьезоэлектрический эффект*. Кристаллическая решетка может быть представлена в виде нескольких простых решеток, вставленных одна в другую. Если у кристалла нет центра симметрии, при деформации происходит относительное перемещение простых решеток и возникает поляризация.

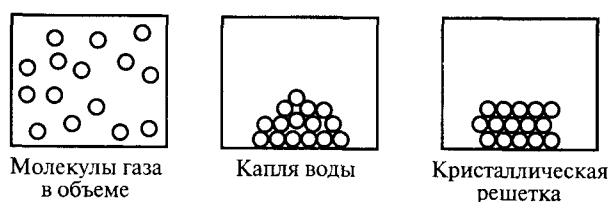
Сейчас в связи с широкой распространенностью в природе и практическим применением особый интерес вызывают конденсированные среды, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов: стекло, сталь, сплавы. Среди твердых сред — это аморфные металлические сплавы с неупорядоченным расположением атомов в пространстве. Оказалось, что свобода расположения атомов в пространстве изменяет электрические, магнитные, сверхпроводящие свойства этих тел. Такие сплавы используют для изготовления магнитных головок и высокочувствительных датчиков, сенсорных устройств и малогабаритных трансформаторов.

7.6. Структура и уникальные свойства воды

Одно из самых распространенных веществ на Земле — вода. Вода покрывает большую часть поверхности нашей планеты, из нее в основном состоят почти все живые существа. Свойства воды настолько важны для живых организмов, что известная нам форма жизни без нее вообще невозможна (рис. 7.9). Уникальные свойства воды объясняются структурой ее молекул: атом кислорода связан ковалентно с двумя атомами водорода, молекула изогнута под углом, в вершине которого и находится кислород. Из-за того, что кислород притягивает электроны сильнее, чем водород, молекула воды всегда полярна: кислород частично заряжен отрицательно, водород — положительно, поэтому молекула воды удерживается водородными связями. Когда вода находится в жидкой фазе, эти слабые связи легко рвутся и разрушаются при столкно-

275

Рис. 7.9. Вода в различных фазах



вениях молекул, тем не менее водородные связи играют большую роль, обеспечивая особое значение воды для жизни (рис. 7.10).

Тепловые свойства воды уникальны для обеспечения жизни. Испарение требует значительной траты энергии, так как температура кипения воды достаточно высока. Скрытая теплота испарения (количество теплоты, необходимой для превращения воды в пар или преодоления сил молекулярного сцепления в воде, обусловленных водородными связями) необычайно велика относительно других веществ. Ее приходится брать из среды, и испарение воды сопровождается охлаждением.

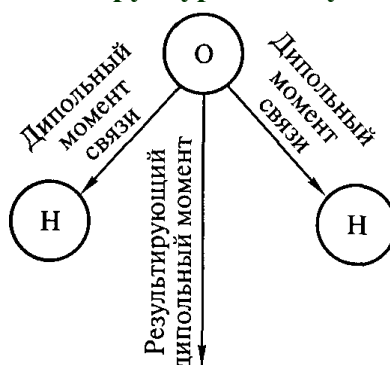
Пример — потоотделение у животных или тепловая одышка у млекопитающих или рептилий (сидят на солнцепеке с разинутым ртом). Относительно большая энергия требуется воде и при плавлении (таянии льда). И наоборот, при замерзании вода должна отдать большое количество тепловой энергии. Это уменьшает вероятность замерзания и клеток, и их окружения. Кристаллизация воды в клетках губительна для жизни, и большая теплота плавления обеспечивает стабильность внешних условий, т. е. жизнедеятельности.

Плотность воды в жидком состоянии больше, чем в твердом, и лед не тонет в ней. Кроме воды таким свойством обладают лишь висмут и чугун. Так как плотность воды при температуре от 4 до 0 °C понижается, лед образуется сначала у поверхности воды и

только под конец — около дна. Это обеспечивает сохранение жизни в водоемах: лед покрывает толщу воды, как одеяло, и тает быстрее, находясь на поверхности. Слои воды при температуре, меньшей 4 °C,

поднимаются вверх, перемешиваются и переносят питательные вещества по всей толще, что позволяет распространяться живому на больших диапазонах глубин. **Высокая теплопроводность** воды, достаточно высокие температуры кипения и замерзания, понижение температуры тел при испа-

Рис. 7.10. Структура молекулы воды



276

рении воды с их поверхности — все это важно для стабильности условий жизни. Даже тот факт, что плотность воды максимальна при температуре 4°C, что несколько выше точки ее замерзания (т.е. при охлаждении от 4 до 0°C вода расширяется), и лед легче жидкой воды, играет важную роль — предотвращает образование кристаллов в клетках и не повреждает ткани. Низкая плотность льда спасает водных животных — лед плавает на поверхности и не допускает холодный воздух вглубь, где находятся живые организмы. Поэтому вода является вместе с растворенными в ней солями необходимой средой для химических процессов, составляющих жизнь.

Из-за большой теплоемкости воды требуется большое количество энергии даже для небольшого повышения ее температуры. Объясняется это тем, что энергия расходуется на разрыв водородных связей, обеспечивающих ее «клейкость». Поэтому биохимические процессы протекают в меньшем интервале температур, с более постоянной скоростью. Вода служит стабильной средой обитания для многих клеток и организмов, обеспечивая значительное постоянство внешних условий.

Она обладает большим поверхностным натяжением, поскольку ее молекулы слипаются друг с другом (*когезия*) посредством водородных связей. Полярные молекулы притягиваются любой поверхностью, несущей электрический заряд, отсюда ее способность подниматься по тонкой трубке или порам, называемая *капиллярностью* (*адгезия*). Кроме того, у воды самое большое поверхностное натяжение по сравнению с другими жидкостями — сильное сцепление между молекулами. Многие мелкие организмы поэтому могут скользить по водяной поверхности. Это уникальное свойство играет важную роль в живых клетках и при движении воды по сосудам ксилемы у растений.

Вода — активный участник *процессов метаболизма*. При фотосинтезе она — источник водорода, участвует в реакциях гидролиза. Вода — наиболее важный по объему компонент тканей животных и растений: она является средой, в которой происходят все биохимические реакции, и одновременно их участником. Было установлено, что фазовые переходы в воде могут управлять скоростью протекания биохимических реакций. После открытия Полингом (1961) взаимосвязи между явлением наркоза и кристаллизацией гидратов наркотических веществ прояснилась роль перестроек связанной воды в явлениях наркоза, а в последнее время — и в возникновении важнейших свойств гидратированных веществ: глины, гипса, цемента, некоторых типов сегнетоэлектриков.

Вода имеет огромное значение при естественном отборе и видообразовании в живой природе. Все наземные организмы приспособились к добыванию и сбереганию воды, даже в пустынях. Не вызывает сомнения тот факт, что жизнь зародилась на Земле в водной среде.

277

7.7. Строение и свойства атома углерода, определившие его роль в природе

Примерно из ста химических элементов, встречающихся в земной коре, для жизни необходимы только шестнадцать, причем четыре из них — водород (H), углерод (C), кислород (O) и азот (N) наиболее распространены в живых организмах и составляют 99 % массы живого. Биологическое значение этих элементов связано с их валентностью (1, 2, 3, 4) и способностью образовывать прочные ковалентные связи, которые оказываются прочнее связей, образуемых другими элементами той же валентности. Следующими по важности являются фосфор (P), сера (S), ионы натрия, магния, хлора, калия и кальция (Na, Mg, Cl, K, Ca). В качестве микроэлементов в живых организмах присутствуют также железо (Fe), кобальт (Co), медь (Cu), цинк (Zn), бор (B), алюминий (Al), кремний (Si), ванадий (V), молибден (Mo), иод (I), марганец (Mn).

С точки зрения химии *жизнь* — это всевозможные превращения разнообразных крупных и сложных молекул, главным элементом которых является углерод. Он важен не с точки зрения распространенности на

Земле, в земной коре углерода всего 0,055 %, в то время как кислорода 60,50, кремния 20,45 и даже титана 0,27 %. В атмосфере двуокиси углерода содержится 0,03 %, т.е. углерода всего 0,008 %. Все биологически функциональные вещества (белки, жиры, углеводы, гормоны, витамины), кроме нескольких солей и воды, содержат углерод. Число соединений углерода огромно. Они называются органическими соединениями, поскольку когда-то считалось, что такие молекулы могут образовываться только в живых организмах.

Соединениями углерода занимается органическая химия — одна из важнейших областей химии. Органика разлагается, горит при не очень высокой температуре, при сгорании в воздухе углерод окисляется до CO_2 . Большинство органических соединений содержат водород, который окисляется до воды. Чистый углерод встречается в природе в виде графита и алмаза. До 1829 г. сторонники витализма считали, что без участия живого нельзя получить органические соединения, только «жизненная сила» способна изготовить уксусную кислоту или спирт. Немецкий химик Ф. Велер доказал ложность этого учения. Он получил мочевину выпариванием раствора цианово-кислого аммония NH_4NCO — соли, которую можно изготовить из простых веществ, не связанных с жизнедеятельностью организмов. Этот синтез был первым примером искусственного получения органики.

Сегодня синтезированы сложнейшие вещества, которых нет в природе. Углерод занимает все большее место в технике: природные и синтетические волокна, природный и синтетический кау-

278

чук, пластмассы, нефтепродукты, бумага, красители, чугун, медикаменты.

Идею о *четырёхатомности углерода* высказал Купер (1858), его поддержал Кекуле в статье «О строении и превращениях химических соединений и химической природе углерода». У Кекуле формула C_6H_6 превратилась в структурную формулу бензола, знаменитое «бензольное кольцо», наглядно отражающее четырехвалентность углерода. Без этого невозможно было понять строение сложных углеводородов, их соединений и производных. Правда, структурные формулы Кекуле были двухмерными и не могли отразить такое свойство молекул, как изомерия. Бутлеров сформулировал определение понятия химического строения как способа связей в молекуле. С помощью структурной теории развивалась систематика органических соединений. Структурные формулы наглядно отражали связь формулы со свойствами вещества, объяснили изомерию и предсказали свойства неизвестных еще соединений.

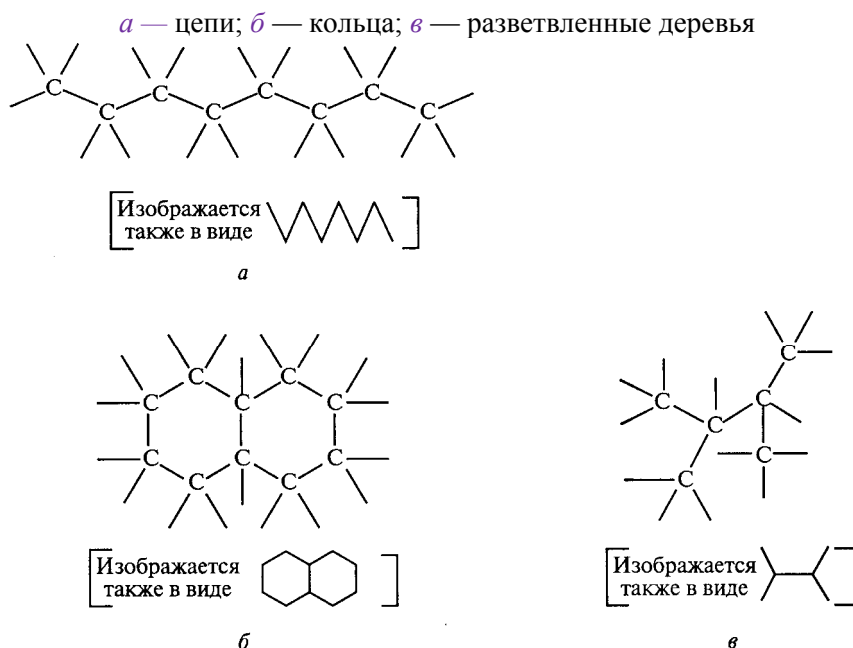
Атомный номер углерода — 6, ядро содержит 6 протонов и 6 нейтронов, вокруг ядра вращаются 6 электронов, масса атома равна 12. При химических реакциях углерод способен присоединить 4 электрона и образовать устойчивую оболочку из 8 электронов, т. е. имеет валентность, равную четырем, и способен к прочной ковалентной (присоединением электронов) связи. Например, эмпирическая формула одного из таких прочных соединений, метана, — CH_4 , а в структурном изображении — это тетраэдр (четыре симметричные связи углерода).

Зная валентность углерода, можно достаточно просто изобразить положение всех недостающих водородных атомов, что позволяет сосредоточить внимание на наиболее важных связях и химических группах. Такие прочные ковалентные связи углерод может образовывать и с атомами других элементов (H, O, P, N, S), и с углеродными (C—C-связь). Внутреннее отличие органики от большинства неорганических соединений выражается в том, что химические связи, как правило, в органических соединениях валентные, а ионные связи — очень редки.

Уникальным свойством углерода является его способность образовывать стабильные цепи и кольца (рис. 7.11), которые обеспечивают разнообразие органических соединений, и эти связи могут быть кратными.

Октан — это восемь атомов углерода в окружении атомов водорода, образующих цепочку, в которой атомы лежат не на прямой, а зигзагообразно, свободно вращаясь в местах сочленения. Октан и его изомеры, состоящие из того же числа атомов, но имеющие разветвленную структуру из-за боковых углеводородных групп, входят в состав бензина. Маленькая капля этой жидкости имеет больше молекул, чем Галактика звезд. Некоторые молекулы свернуты в клубок, некоторые вытянуты в

279

Рис. 7.11. Схема соединения атомов углерода друг с другом в органических молекулах:

длину, большинство же находятся в промежуточном состоянии. Молекула тринитротолуола симметрична. Ее шесть атомов кислорода готовы к окислению: реакция внутримолекулярного высвобождения энергии происходит мгновенно и начинается от легкого толчка.

Разница в строении молекул крахмала (источника энергии) и целлюлозы (строительного материала клеток растений) заключается лишь в небольшом изменении конфигурации водородной связи между мономерными звеньями в цепи. Другой пример: отличие в окраске алых маков от синих васильков связано с отличием одного атома из тридцати, составляющих пигмент окраски. Фиолетовый краситель цианидин, которым особенно богата ежевика, входит в состав обоих цветов. Кислый сок васильков богат ионами водорода, способными в определенном месте присоединяться к молекулам цианидина. Насыщенная водородом молекула активно поглощает красные лучи, отражая синие. У маков щелочная среда практически не содержит свободных катионов водорода, краситель оказывается ненасыщенным, поэтому они поглощают синие лучи, отражая красные. Отличие мужских половых гормонов (тестостеронов) от женских (эстрадиолов) состоит в замене атома кислорода молекулой гидроксильной группы (ОН) и убиении метильной группы (CH₃) в одном из нескольких колец, состоящих из десятков атомов молекулы холестерина.

Сравнивая оптические свойства винной и виноградной кислот, Л. Пастер (1848) заметил, что кристаллы двойных солей виноградной кислоты вращают плоскость поляризации на одну и ту же величину, но одни — вправо, а другие — влево. Отсюда он сделал вывод об асимметричном строении кристаллов и о различном

280

пространственном строении образующих их молекул. После установления строения бензола и создания структурной теории на изомерию обратили особое внимание.

Немецкий химик-органик Й. Вислиценус обнаружил существование двух форм молочной кислоты — оптически активной и неактивной. Он попытался объяснить это явление на основе геометрической изомерии и писал (1875), что это связано, вероятно, с неодинаковым пространственным расположением атомов. Асимметричное расположение атома углерода в это же время отметил и Я. Вант-Гофф, расположив четыре валентности углерода в направлении вершин тетраэдра и поместив атом С в центре. В 1888 г. также немецкий химик-органик В. Мейер назвал такое построение стереохимическим строением и дал тем самым название новой области химии.

В 1890 г. А. Ганч и швейцарский химик-неорганик А. Вернер распространили такое изображение на азот, посчитав атом азота находящимся в одной из вершин тетраэдра, а его валентные связи направленными к трем другим вершинам. Впоследствии гипотеза Вернера о координационных соединениях металлов была подтверждена результатами рентгеноструктурного анализа. Явление «обращения» знака оптической активности (можно изменить направление вращения плоскости поляризации заменой одного из атомов (или радикалов) при тетраэдрическом асимметричном атоме углерода) открыл петербургский академик П. Вальден (1896). Так структурная химия перешла от изображения формул на плоскости к их изображению в трехмерном пространстве.

Кратные связи, кроме углерода, могут образовывать фосфор и кислород. Размеры органических молекул определяются углеродным скелетом, а химические свойства — присоединенными к нему элементами и химическими группами, насыщенностью скелета и формой молекул, которая зависит от углов связей. Среди «строительных блоков» — простых органических соединений — крупных молекул можно выделить

аминокислоты, из которых синтезированы белки; *моносахариды* и *азотистые основания*, синтезирующие нуклеиновые кислоты; жирные кислоты, *глицерол* и *холин*, синтезирующие липиды. Таким образом, небольшое число органических молекул дает начало крупным молекулам и структурам живых клеток. Эти немногие виды молекул могли синтезироваться в «первичном бульоне» Мирового океана еще до появления жизни на Земле из простых неорганических молекул — диоксида углерода, азота и воды.

Биохимия, или химия живых организмов, которая сначала развивалась как подспорье медицины, со временем выделилась в отдельную область знания. Она является не только фундаментом физиологии, объясняя работу биосистем, но играет объединяющую роль для всей биологии.

281

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Как развивались представления о составе веществ? Какие основные законы определяют состав веществ? Каково значение закона Авогадро?
2. Дайте определения понятиям «молекула», «химический элемент», «химическое соединение». Как они формировались? Как связываются атомы в молекулы?
3. Приведите отличия теоретического уровня познания от эмпирического (на примерах развития учения о составе веществ). Как точность науки связана с наглядностью моделей?
4. Что изучает химия, каковы основные этапы ее развития? Дайте основные понятия структурной химии.
5. Определите понятие валентности в развитии. Что такое «насыщаемость» связей?
6. Опишите виды химических связей, соединяющих атомы в молекулы и молекулы между собой.
7. Какие формы записи состава веществ существуют и как в них отражаются свойства веществ?
8. С чем связано обилие соединений углерода с точки зрения строения его атома? В каких формах он встречается в природе?
9. Что такое зонная теория? Как она объясняет существование проводников, полупроводников и диэлектриков? Что такое электронный газ?
10. Объясните с позиций структуры воды ее уникальные физические свойства, важные для живой природы.

Глава 8. КОНЦЕПЦИИ ПРОЦЕССОВ И ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

8.1. Химический катализ и методы управления химическими процессами

Реакционная способность вещества на 50 % определяется его составом и структурой и на 50 % — его реагентом по реакции. Так, если реагент — сильная кислота, то вещество ведет себя как основание, и наоборот. Эту двойственность поведения в реакции объяснил Бутлеров, считая, что вещество расщепляется на два изомера и это влияет на равновесную изомерию (*таутомерия*). Впоследствии А. Н. Несмеянов установил, что это — раздвоение свойств изомера как целого.

К 70-м годам XIX в. идеи и методы физики стали проникать в смежные области естествознания. Н.Н.Бекетов впервые сформулировал и обосновал положение о том, что *физическая химия* — самостоятельная наука, основная задача которой состоит в изучении связи между физическими и химическими свойствами веществ, явлений и процессов. Работами М.Бертло, Ю.Томсона, В.Ф.Лучинина и Н.Н.Бекетова была создана *термохимия*, изучающая закономерности в теплоте образования и сгорания веществ в зависимости от их химического строения. Исследования Дж. Гиббса, Я. Г. Вант-Гоффа, В.Г.Нернста и других ученых развили химическую *термодинамику*, изучающую энергетические процессы, которые сопровождают процессы химические. Гиббс сформулировал правило фаз, по которому система имеет несколько состояний, разделенных между собой границами. Нернст установил, что при приближении к температуре, равной 0 К, тепловой эффект и движущая сила химических реакций все более совпадают и это дает возможность производить точный расчет химических реакций. Начало систематическому расчету реакций положил Н.А. Меншуткин.

Химические реакции — основа химии. При столкновениях молекул может высвободиться энергия, достаточная для перегруппировки электронов в них и формирования нового набора связей, т. е. образования новых соединений. Химические реакции обычно представляют в виде уравнений: слева — исходные вещества, справа — продукты реакции; стрелка обращена в сторону более низкой суммарной энергии связей, показывая, в какую сторону реакция стремится идти самопроизвольно. Но реакции могут идти в обе стороны и представляют собой перераспределение химических связей.

283

Исследования общих закономерностей, управляющих химическими процессами, заинтересовали возникшую в конце XIX в. химическую индустрию. Если какое-то вещество является *катализатором*, или *ингибитором*, происходит целый комплекс реакций, участвуют все вещества, оказавшиеся в зоне реакции, и могут получиться различные побочные продукты. От знания скорости и направления реакций, влияния на них различных факторов зависела производительность химической промышленности. Определение характера химического процесса казалось почти невозможным, пока не создали химическую термодинамику и кинетику.

Ответ на вопрос, от чего зависит возможность осуществления реакции, перестройки химических связей дают **законы термодинамики**. Например, для получения теплоты требуется определенное топливо. Переход теплоты от нагретого тела связан с распределением энергии: атомы вещества отдают энергию тепловому движению окружающим атомам, не меняя своего состояния. При химических реакциях энергия тоже рассеивается, но меняется окружение атомов и исходное вещество, может возникнуть новое вещество. При решении разнообразных термодинамических задач используют особые функции — *термодинамические потенциалы*. Зная выражение термодинамических потенциалов, через независимые параметры системы можно вычислить и другие характеристики процессов. Приведем некоторые из них.

Подставив в выражение для первого начала термодинамики $dQ = dU + dA$ формулы для работы $dA = pdV$ и количества теплоты в обратимом процессе $dQ = TdS$, получим

(1)

$$dU = TdS - pdV.$$

Это выражение, объединяющее первое и второе начала термодинамики, является полным дифференциалом внутренней энергии, а общее уравнение для полного дифференциала таково:

$$dU = \left[\frac{\partial U}{\partial S} \right]_V dS + \left[\frac{\partial U}{\partial V} \right]_S dV.$$

Сопоставившего с выражением (1), получим

(2)

$$T = \left[\frac{\partial U}{\partial S} \right]_V, \quad p = - \left[\frac{\partial U}{\partial V} \right]_S.$$

Итак, частная производная от внутренней энергии по энтропии равна температуре, взятая с обратным знаком производная по объему равна давлению, а сама внутренняя энергия является термодинамическим потенциалом. Другой термодинамический потенциал ввел Г. Гельмгольц (1877), он показал, что функция

$F = U - TS$, называемая свободной энергией, может быть критерием термодинамического равновесия.

Найдем полный дифференциал свободной энергии: $dF = dU - TdS - SdT$, и, используя выражение (1), можно записать: $dF = TdS - pdV - TdS - SdT = -SdT - pdV$. Учитывая (как и ранее), что dF является полным дифференциалом от переменных T и V , получаем

(3)

$$S = \left[\frac{\partial F}{\partial T} \right]_V, \quad p = - \left[\frac{\partial F}{\partial V} \right]_T.$$

Физический смысл свободной энергии F ясен из выражения для dF . При $T = \text{const}$ $dT = 0$ и тогда $dF = -pdV = -dA$, т.е. уменьшение свободной энергии равно работе, совершаемой системой в изотермическом процессе. Сохранение постоянной температуры тела у живых организмов позволяет считать, что производимая ими работа совершается за счет уменьшения свободной энергии.

Важным для химических процессов является и термодинамический потенциал, так называемая *функция Гиббса* — G : $G = F + pV = U - TS + pV$. Продифференцировав, получим: $dG = dU - TdS - SdT + pdV + Vdp$. С учетом (1) последнее уравнение можно переписать так: $dG = TdS - pdV - TdS - SdT + pdV + Vdp = -SdT + Vdp$. Сравнивая полученное уравнение с выражением для полного дифференциала, запишем:

(4)

$$S = - \left[\frac{\partial G}{\partial T} \right]_p, \quad V = \left[\frac{\partial G}{\partial p} \right]_T.$$

Потенциал Гиббса используют при расчетах энтропии и объема в изобарно-изотермических процессах. При стремлении системы к равновесию в необратимом изобарно-изотермическом процессе $dQ < TdS$, и для дифференциала Гиббса используют уже вместо написанного выше равенства следующее: $dG < -SdT + Vdp$. Но поскольку в этом процессе $dT = 0$, $dp = 0$, то и $dG < 0$. И это будет выполняться до установления равновесного состояния, когда и dG станет равно нулю. Можно сказать, что в неравновесных изобарно-изотермических процессах функция Гиббса убывает до минимума в состоянии равновесия. В изотермических процессах, происходящих без изменения объема, убывает также потенциал Гельмгольца — свободная энергия.

При изменении числа частиц в системе вводят так называемый *химический потенциал* μ . Тогда вместо уравнения (1) следует писать: $dU = TdS - pdV + \mu dN$. Здесь dN — изменение числа частиц в системе. Соответственно изменятся и выражения для других потенциалов: $dF = -SdT - pdV + \mu dN$, $dG = -SdT + Vdp + \mu dN$. Тогда для химического потенциала при постоянных парах соответствующих параметров (S, V), (T, V), (T, p) можно записать:

285

$$\mu = \left[\frac{\partial U}{\partial N} \right]_{S,V} = \left[\frac{\partial F}{\partial N} \right]_{T,V} = \left[\frac{\partial G}{\partial N} \right]_{T,p}.$$

Итак, термодинамический потенциал равен изменению потенциала, приходящегося на одну частицу в соответствующем процессе. И реакция возможна, если она сопровождается уменьшением величины потенциала. Когда камень падает в поле тяготения, уменьшается его потенциальная энергия. Подобный процесс наблюдается и в химической реакции: когда она идет, ее свободная энергия переходит на более низкий уровень. В этих примерах аналогия полная, поскольку нет изменения энтропии. Но в химических реакциях изменение энтропии необходимо учитывать, и возможность реакции еще не означает, что она пойдет самопроизвольно. Термодинамика объясняет: реакция пойдет только при уменьшении энергии веществ и увеличении энтропии. Энтропия растет, так как в малой молекуле расположение атомов менее упорядочено, чем в большой.

Но реальные процессы и состояния чаще всего являются неравновесными, а системы — открытыми. Такие процессы рассматриваются в *неравновесной термодинамике*.

В 1886 г. появилась работа Гиббса, содержащая *правило фаз* и новые методы исследования и описания условий равновесия через термодинамические потенциалы. При термодинамическом подходе управление ходом реакции осуществляется изменением термодинамических параметров системы — температуры, давления, концентрации. Этими параметрами можно сместить направление реакции. Но термодинамический подход не дает изменения скорости реакции, так как время не входит в уравнения. Поэтому сведения о скорости дает только кинетика.

Закон действующих масс открыли и представили в математической форме норвежские ученые К. М. Гульберг и П. Вааге (1879). Они, рассматривая равновесие как динамический процесс, построили *теорию скоростей* химических реакций. Вант-Гофф ввел в теорию принятый сейчас термин «концентрация». Если реакция происходит между компонентами *A*, *B*, *C*, этот закон принимает следующий вид: скорость реакции $V = k(A)^{\alpha}(B)^{\beta}(C)^{\gamma}$ где *k* — константа скорости реакции (в скобках — концентрации реагентов), α , β , γ — коэффициенты степени участия. Изменяя концентрации, можно менять скорость и направление реакции, т.е. управлять процессом. Выразив константу равновесия через концентрации реагентов, Вант-Гофф подвел теоретический фундамент под закон действующих масс и обосновал важнейшие положения химической кинетики (1884).

Ле Шателье выдвинул принцип подвижного **равновесия** (1884). Сейчас его формулируют так: внешнее воздействие, которое выводит систему из состояния термодинамического рав-

286

новесия, вызывает в ней процессы, направленные на ослабление результатов такого влияния. Появилась возможность смещать равновесие в сторону образования продуктов реакции через изменение температуры, давления и концентрации реагентов. Эти методы называли *термодинамическими*.

Среди соединений реагентов есть образования с разной степенью устойчивости. Менее устойчивые обладают большей свободной энергией, значит, вновь образованная группировка менее устойчива, чем исходные компоненты. Для преодоления этой разницы в значениях свободной энергии нужна дополнительная энергия, так называемая *энергия активации*. Она определяет скорость реакции, и если ее недостаточно для преодоления барьера, реакция не идет. Снижают энергию активации катализаторами.

Явление химического катализа было открыто в 1812 г. Кирхгофом. В XVIII в. уже знали о каталитическом действии селитры при получении серной кислоты, хотя смысл этого явления не поддавался объяснению. Берцелиус связал природу взаимодействия агентов с электрохимическими потенциалами (1835), обозначив силу «вызывания химической деятельности» понятием каталитической силы. Либих предположил, что взаимодействие с катализатором может непрерывно менять химические связи в молекуле. Взгляды Либиха поддержал Д. И. Менделеев. К концу XIX в. поняли, что в реакции участвуют стенки сосуда, растворители и случайные примеси. Целенаправленное изучение катализа позволило к середине XX в. получать широкий круг органических продуктов, регулировать скорость и заданную направленность химических реакций.

Д.П.Коновалов положил начало физико-химической *теории катализа*, ввел понятие *активной поверхности* (1885) и вывел формулу для скорости автокаталитических реакций независимо от С. Оствальда. Теорией катализа занимался и Д. И. Менделеев (1886). При катализе происходит активация молекул реагента при контакте с катализатором: связи в веществе становятся более подвижными, «подталкивая» вещества к взаимодействию. В. Оствальд, сравнивая относительную активность различных кислот, пришел к выяснению условий химического равновесия и развитию катализа. Он определил катализатор как вещество, «которое изменяет скорость реакции, но не входит в состав конечного продукта реакции».

Доля каталитических процессов в химической промышленности достигает 80 %. За 50 лет катализ превратился в мощное орудие синтеза веществ. Зависимость скорости реакций от температуры исследовал С. Аррениус, предложивший (1889) закон: вероятность накопления энергии активации определяется формулой, полученной Больцманом: $W = \exp(-E_{\text{акт}}/kT)$. Вант-Гофф исследовал причины, меняющие скорость реакций, и показал, что с ростом температуры энергия частиц при столкновениях может оказаться достаточной для начала химической реакции. Зная величины энтро-

287

пии веществ, можно определить условия протекания реакции и ее направление.

Природный катализатор — *хлорофилл* — комплексное металлоорганическое соединение в живой ткани зеленого листа. Поэтому можно считать, что процесс фотосинтеза происходит при фото-биокатализаторе, и эти реакции изучаются в целях получения еще одного источника энергии. За идеями строения эффективных биокатализаторов химии часто обращаются к живой природе. Поэтому будущее катализа — на пути между химией и биологией. Большинство биохимических процессов — каталитические. Расчет энергии активации проводится в *квантовой химии*.

Биокатализаторы были открыты в начале XX в. Благодаря работам французских химиков П. Сабатье и Ж. Б. Сандерана в промышленности при гидрировании органических веществ вместо благородных металлов стали использовать никель, медь, кобальт, железо. Русский химик-органик В.Н.Ипатьев исследовал каталитическое действие оксидов металлов при высоких давлениях и температурах и установил, что при использовании смеси катализаторов их действие усиливается. Каталитический способ синтеза аммиака из атмосферного азота и водорода под давлением открыл немецкий химик Ф.Габер. Затем химик-технолог К.Бош и А. Митташ предложили промышленный способ синтеза аммиака с использованием смеси катализаторов — железа, едкого калия и глинозема — при повышенных температурах и высоком давлении.

Подбор катализаторов долгое время шел эмпирическим путем, да и сами механизмы химических реакций, особенно быстрых, не поддавались объяснениям. Наиболее быстро происходят реакции фотохимического типа, когда фотоны, разрушая равновесие, вызывают новые реакции и создают новые условия равновесия, что устанавливали по вторичному рассеянию молекул. В 20-е гг. такие реакции начал исследовать английский

физико-химик Р.Дж. Норриш, но успех пришел к нему только после 1945 г., когда он привлек к работе молодого сотрудника Дж. Портера, специалиста по электронике и радиолокации. Они использовали сверхкороткие световые импульсы мощностью 600 МВт, излучаемые за 10^{-6} с. Впоследствии ученые уменьшили временной интервал до 10^{-9} с и стали использовать лазеры, имеющие мощность, в тысячи раз большую.

Квантовая химия позволила рассмотреть на микроуровне протекание реакций, отдельные молекулы и их электронные структуры. Термодинамический подход, описывающий систему в целом, позволяет глубже понять тенденции течения реакций. В 1952 г. японский физико-химик Кэнити Фукуи продолжил работу над методом молекулярных орбиталей и пришел к оценке важности переходного состояния, или активированного комплекса, подчеркнув особую роль внешних электронов в течении реакций, в том числе

288

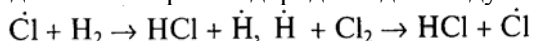
и каталитических. Расчеты на ЭВМ подтвердили его соображения, идеи Фукуи используются и сейчас. Американский физико-химик Роалд Хофман, доведя метод Фукуи до расчетного, разработал правила сохранения орбитальной симметрии молекул при химических реакциях.

Управлять ходом химической реакции можно и за счет привлечения внешнего источника энергии — световой или тепловой. С ее помощью удастся расщатать атомы в исходной молекуле и побудить их к участию в нужной реакции. Этим занимается область химии, получившая название *химии экстремальных состояний*. Использованием для этой цели более жесткого электромагнитного излучения (для молекул с крепкими внутримолекулярными связями) занимается *радиационная химия*.

8.2. Цепные реакции и свободные радикалы

Свободный радикал обнаружил в 1900 г. уроженец Украины М. Гомберг, создатель антифриза для автомобилей. Он выделил некое соединение, способное вступать в реакции, и доказал, что оно есть «половина молекулы». До этого считали, что только молекулы и атомы участвуют в химических реакциях. Если происходит реакция типа замещения, то выделяющаяся энергия перераспределяется между продуктами реакции. Но многие реакции идут через промежуточные продукты реакции и энергия активации понижается. Если промежуточные продукты имеют ненасыщенные валентности, это понижение особенно заметно. Такие атомы или соединения называют *радикалами* и обозначают точкой над символом.

Известный химик М.Боденштейн обнаружил (1913), что при взаимодействии хлора и водорода один поглощенный фотон света вызывает образование около ста тысяч молекул хлороводорода. Реакция соединения хлора с водородом идет следующим образом:



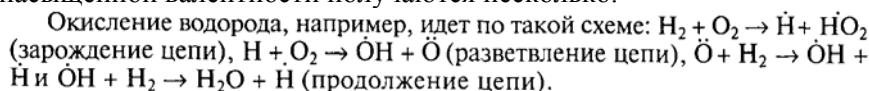
Первая ненасыщенная валентность при комнатных температурах не образуется, нужно, чтобы с какой-то внешней помощью произошло расщепление молекулы хлора на два атома, после этого реакция самопроизвольно и быстро осуществится по заданной схеме. Каждый раз вместо ненасыщенной валентности одного свободного атома появляется валентность другого атома, и этот процесс происходит поочередно. Реакция идет цепным образом, отсюда название — *цепная реакция*.

Понятие *разветвленных цепных реакций* ввели через 10 лет И.А.Кристиансен и Г. А. Крамерс, показав, что цепные реакции могут наблюдаться не только в фотохимических реакциях. Это

289

понятие позднее заимствовали физики для описания ядерных процессов.

Советские ученые Ю. Б.Харитон и А. К. Вальтер, исследуя реакции между парами фосфора и кислородом (1926), не могли понять, почему они не шли при низких и высоких давлениях кислорода, тогда как при средних происходил взрыв. Объяснение этому явлению дал основатель научной школы по химической кинетике Н. Н. Семенов. Причиной является разветвленная цепная реакция, когда вместо одной ненасыщенной валентности получают несколько.



Возникающий на этапе зарождения цепи радикал $\dot{\text{H}}$ мало активен. Итак, из одного активного центра с ненасыщенной валентностью $\dot{\text{H}}$ получают три гидроксида $\dot{\text{O}}\text{H}$ и два $\dot{\text{H}}$. Если последние радикалы $\dot{\text{H}}$ могут дать вновь по три радикала, то скорость реакции нарастает лавинообразно. Воспрепятствовать этому бурному процессу может только рекомбинация $\dot{\text{H}}$ на стенках сосуда или переход валентности на неактивный радикал HO_2 внутри объема. Значит, меняя условия протекания реакции, можно управлять и скоростью ее протекания. При этом важную роль играют размеры сосуда — успеют ли радикалы дойти до стенки и рекомбинировать на ней или разветвление реакции произойдет раньше, закончившись взрывом.

К тем же выводам пришел и английский ученый С. Н.Хиншелвуд, открывший вещества, которые могут реагировать двояко. Близкие идеи относительно классификации процессов воспламенения и предельных явлений при горении ацетилена содержались в монографии Д. В.Алексеева (1915). В ацетилене, например, при медленном нагревании продукты распада группы CN не будут иметь времени для того, чтобы родились

известные продукты полимеризации C_6H_6 , C_8H_8 и т.д. При быстром нагревании активные молекулы начнут разлетаться с большими скоростями, при столкновениях дадут начало химическому превращению и процесс будет развиваться от слоя к слою, образуя волну реакции. При малых концентрациях молекул реакция может погаснуть. Значит, процессом горения можно управлять.

Теорию цепных реакций Семенов построил и изложил в монографии «Цепные реакции» (1934). Она охватывала большое число явлений, происходящих при взрывных процессах и горении.

Примером цепной реакции является и реакция деления ядер урана, происходящая аналогично химической, только вместо закона сохранения масс действует закон сохранения и изменения энергии (и массы). Работы, начатые в 1934 г. под руководством Э. Ферми, показали, что ядра атомов большинства элементов способны поглощать медленные нейтроны и становиться радиоактивными.

290

К 1938 г. было обнаружено, что в уране, активизированном нейтронами, присутствует элемент, сходный с танталом. Этому факту есть только одно объяснение — под действием нейтронов атом урана делится на две примерно равные массы. Если в уране отношение числа нейтронов к числу протонов равно 1,6, а в тантале — между 1,2 и 1,4, то при делении обязательно возникнут элементы с «лишними» нейтронами. Это значит, что нейтроны играют роль спичек, возбуждающих реакцию деления.

8.3. Особенности растворения в воде различных веществ

В современную эпоху вся вода на Земле образует водную оболочку — *гидросферу*. Значение воды как мощного фактора, преобразующего планету, изучено достаточно хорошо. Действие воды на поверхности и в глубинах Земли связано с ее свойствами. Вода может находиться в трех агрегатных состояниях и способна растворять в себе многие вещества.

Природная вода содержит различные вещества разных концентраций. Так, самая чистая дождевая вода содержит растворенных веществ в количестве около 50 мг/л. Масса воды на Земле составляет всего около 0,025 % общей массы Земли. Она содержится в атмосфере в виде паров, составляет океаны, моря и континентальные воды, образует подземные воды в толщах осадочных пород. Большая часть воды сосредоточена в Мировом океане (до 86,5%). Средняя глубина океана 3,8 км, общая масса воды в нем $1420 \cdot 10^{18}$ кг. Океаническая вода содержит примерно 3,5 % растворенных веществ. Количество растворенного вещества в граммах, содержащегося в 1 кг морской воды, получило название *солености океана*.

Среди растворенных веществ (расположены по степени убывания количества вещества) есть катионы: Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Sr^{++} , анионы: Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , Br^- , F^- , соляная и серная кислоты. Другие элементы, содержащиеся в небольшом количестве, играют важную роль в химических процессах океана и в жизни морских организмов, например азот, фосфор, кремний, которые усваиваются морскими растениями и животными. В морской воде растворены также кислород, азот, сероводород, угольная кислота, которые тесно связаны с атмосферой и живыми объектами моря. Среди них первое место по концентрации занимает угольная кислота, которая присутствует в разных формах, образуя карбонатную систему динамического равновесия. В Мировом океане ее в 60 раз больше, чем в атмосфере. С карбонатной системой связаны ионы кальция и весь комплекс растворенных веществ. Верхней границей гидросферы является поверхность открытых водоемов, а нижняя находится в глубинах Земли, в слоях с температурой порядка 374 °C.

Воду еще с древних времен рассматривали как основу жизни. У Аристотеля она входила в число четырех неумирающих элементов, или «начал», и ее соединение с другими «началами» —

291

землей, огнем и воздухом — порождало все многообразие мира. Г. Кавендиш и А. Лавуазье открыли свойства воды (1783). Кавендиш, исследуя свойства кислорода (недавно открытого), смешивал в лаборатории одну часть этого «воздуха» с двумя частями «горючего воздуха» (водорода) и пропускал через эту смесь электрический ток. Смесь вспыхивала, а на стенках колбы появлялись капельки жидкости — обычной воды. Лавуазье провел серию таких опытов, показавших, что вода не является элементом. Через пару лет ему удалось установить, что вода образуется из одной весовой части водорода и 6,5 частей кислорода (позже Гей-Люссак и Гумбольдт уточнили соотношение — 1:8). Так узнали, что вода — это H_2O , и вслед за Лавуазье стали называть «горючий воздух» водородом. К XIX в. свойство воды быть элементом трансформировалось в свойство быть растворителем и важнейшим компонентом объектов живой и неживой природы. Изучение молекулярной структуры веществ привело к пониманию исключительной способности молекул воды образовывать связи с частицами почти всех веществ. Вода — это простейшее соединение водорода с кислородом, по массе вода состоит из 11,19 % водорода и 8,81 % кислорода. Вследствие существования трех изотопов водорода и шести изотопов кислорода существует 36 изотопных разновидностей воды.

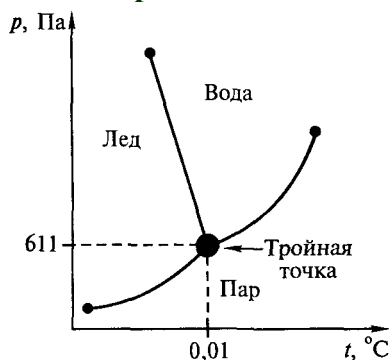
Физические свойства воды совершенно аномальны. Самое удивительное из них — это способность ее при нормальных условиях быть жидкостью. Молекулы похожих на нее химических соединений (H_2S или H_2Se) намного тяжелее воды, но при этих условиях газообразны. Свойства гидридов (водородных соединений элементов), расположенных в тех же вертикальных столбцах таблицы Менделеева, должны меняться монотонно с ростом атомной массы. В шестой группе помимо кислорода находятся сера, селен, теллур,

полоний, атомные массы кото растут: 32, 78, 127, 209 соответственно. При переходе от тяжёлых элементов к лёгким свойства растут монотонно лишь для первых четырех. Так, температуры кипения и плавления снижаются линейно, т.е. область жидкой фазы гидридов становится все более холодной. И если бы для воды эта зависимость сохранилась, она была бы жидкой лишь в диапазоне от -80 до -95 °C, а при более высоких температурах была бы газом. Конечно, это свойство, как и другие, очень важно для всей биосферы. Кроме того, совершенно аномален сам диапазон существования воды в жидкой фазе — 100 °C.

Тройная точка воды, т.е. равновесие воды, льда и пара, наблюдается при температуре $0,01$ °C и давлении 611 Па (рис. 8.1). Переохлажденная вода, т.е. остающаяся в жидком состоянии ниже 0 °C, ведет себя странно: с одной стороны, плотность ее уменьшается при понижении температуры, с другой — приближается к

292

Рис. 8.1. Тройная точка воды



плотности льда. Переохлажденную воду получают в тонких капиллярах или в масляной эмульсии. Необычайно велики пределы допустимых значений переохлаждения и перегрева воды: можно продержать ее в жидком состоянии при температуре от -40 до $+200$ °C.

В отличие от большинства других жидкостей при повышении температуры ее удельный объем уменьшается, а плотность увеличивается, достигая минимума (соответственно максимума) при 4 °C. В обычных жидкостях плотность всегда уменьшается с уменьшением температуры. Получается, что с ростом температуры растет средняя тепловая скорость молекул воды, они сильнее расталкивают друг друга, но в воде при этом плотность растет, а не уменьшается. При замерзании объем воды увеличивается до 10 %. Плотность воды больше плотности льда. При плавлении кристаллов, когда регулярность упаковки ионов нарушается, плотность уменьшается на 2 — 4 %. Это свойство воды предохраняет водоемы от сплошного промерзания, спасая в них жизнь. Лед — плохой проводник теплоты.

Очень высока **теплоемкость** воды — при плавлении льда она увеличивается более чем вдвое. Поэтому моря и океаны являются гигантскими термостатами, сглаживая все колебания температуры воздуха. Кстати, эти же функции может выполнять и водяной пар в атмосфере. Отсутствие водяного пара в пустынях приводит к резким колебаниям ночной и дневной температур. В отличие от обычных жидкостей с ростом температуры в интервале от 0 до 150 °C **теплопроводность** воды растет, а **вязкость** уменьшается. При плавлении льда теплоемкость испытывает скачок от $37,8$ до $75,6$ Дж/(моль • К), т.е. в 2 раза. Значит, нужно больше затратить теплоты для поднятия температуры воды на 1 К. Этот скачок теплоемкости после плавления означает, что в воде появились очень энергоемкие процессы, на которые нужно истратить подводимую теплоту. И эти процессы сохраняются, пока вода находится в жидком состоянии. У переохлажденной воды эта аномалия теплоемкости еще больше.

Электропроводность воды зависит от примесей, но даже в очищенной воде она не нулевая. Это связано с частичной диссоциацией ее на ионы H^+ и OH^- . Диэлектрическая постоянная воды также аномальна — достигает 81 (у других жидкостей — менее 10). В переменных электрических полях она начинает зависеть не только от частоты приложенного поля, сильно уменьшаясь для высо-

293

кочастотных полей, но и от пространственных колебаний полей. Аномальна вода и в отношении распространения в ней звука. Под действием жесткого излучения вода распадается на свободные радикалы H , OH , HO_2 , при этом образуются водород и перекись

водорода. Обычно с ростом температуры растет **сжимаемость** жидкостей (степень уменьшения объема с ростом давления), но так вода себя ведет только при высоких температурах. При низких температурах вода ведет себя совсем иначе — при температуре 45 °C сжимаемость имеет минимум. Такие явления обычно свидетельствуют о наличии противоположных процессов — обычного и аномального.

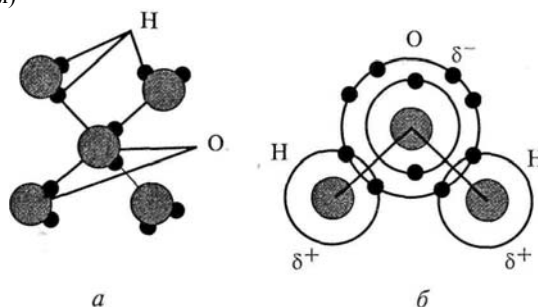
Аномальность свойств воды

Аномальность свойств воды связана со строением ее молекул и структуры в разных агрегатных состояниях. Сравнение с родственными воде жидкостями — гидридами шестой группы — показывает, что вода выпадает из плавной зависимости температур кипения и плавления этих жидкостей. Если бы она была обычной жидкостью, то кипела бы при -76 °C, а замерзала бы при -100 °C.

Главное отличие воды — в водородных связях (рис. 8.2), обусловленных квантово-механическими особенностями взаимодействия протона с атомами — способностью его к туннелированию. Хорошая модель молекулы воды — правильный тетраэдр. Ядра в молекуле H_2O образуют равнобедренный треугольник с двумя протонами в основании и кислородом в вершине. Угол HON равен 105° , расстояние O—H равно $0,957 \cdot 10^{-8}$ м, а H—H только $1,54 \cdot 10^{-8}$ м. Эту конструкцию окружает электронное облако, причем во льду каждая молекула связана четырьмя водородными связями с ближайшими молекулами. В этом состоянии расстояние между

Рис. 8.2. Водородные связи в молекуле воды:

a — атомы O (светлые кружки) несут частично отрицательные заряды и образуют водородные связи с атомами H (черные кружки), принадлежащие другим молекулам, несущим положительные заряды; b — атом O оттягивает обобществленные электроны к углу между связями и приобретает частично отрицательный заряд, а атом H — частично положительный (полярность молекулы воды связана с тем, что она изогнута под углом)



294

Рис. 8.3. Шкала кислотности (щелочности) некоторых жидкостей



молекулами равно $2,76 \cdot 10^{-8}$ м. Поэтому можно считать, что радиус молекулы воды порядка $1,38 \cdot 10^{-8}$ м, т. е. ее дипольный момент равен $1,5 \cdot 10^{-29}$ Кл · м. Так что связь сильно направлена, и пространственная организация атомов имеет четкую структуру. Примерно такая же упорядоченность сохраняется и при плавлении льда, и расстояние между молекулами не более $2,9 \cdot 10^{-8}$ м. Отсюда некоторая рыхлость структуры, которая и вызывает часть аномалий в свойствах воды. Рост температуры вызывает аномальную плотность, рост давления, разрушающий связи между молекулами, — аномальную вязкость. Кооперативность — другое важное свойство водородной связи. Оно означает, что образование одной водородной связи дает возможность образования следующей и т.д. Это происходит из-за того, что две молекулы H_2O , образуя водородную связь, вступают в щелочно-кислотное взаимодействие: одна молекула становится более кислой, а другая — более щелочной (рис. 8.3). Поэтому для образования последовательности водородных связей требуется уже меньше энергии. К образованию водородных связей способны и другие молекулы, например HF или NH_3 . Но эти и другие вещества не обладают уникальным спектром, в котором отражаются особенности водородной связи воды. При образовании молекулы воды остаются два неспаренных (кислородных) электрона, которые играют решающую роль при образовании молекулярной структуры воды. Конфигурация молекулы такова, что возможны пять валентных структур. Чисто электростатическому взаимодействию соответствуют три структуры, дающие энергию 14,4 Дж/моль. В суммарную энергию водородной связи входит и энергия делокализации заряда, связанная с понижением энергии по отношению к структуре 1, вызванной гибридизацией с четырьмя другими структурами (эта энергия равна 33,6 Дж/моль). Дисперсионное взаимодействие также вносит вклад порядка 7,2 Дж/моль. Итог: 20,4 Дж/моль, что близко к экстремальному

значению. Таким образом, электронная структура молекулы воды определяет условия объединения отдельных молекул в сложную трехмерную конструкцию. Это делает ее идеальным (и даже единственным) матери-

295

алом для построения разветвленной сети водородных связей. Такая структура наиболее совершенна во льду.

Комплекс молекул воды (H_2O)₂ (димера) существует в водяном пару (в свободном виде), в жидкой воде и во льду. Но, как установил Л.Полинг, лед не является кристаллом с полной упорядоченностью даже при 0 К. Структура льда достаточно рыхлая: каждая полость окружена шестью молекулами H_2O , а каждая молекула — шестью полостями. Размер этих полостей таков, что в них может разместиться одна молекула, не нарушая каркаса водородных связей. Еще в начале XX в. У. Брэгг методом рентгено-структурного анализа показал, что во льду каждая молекула окружена четырьмя другими молекулами, но расположение атомов водорода этим методом не устанавливалось. Это удалось уловить лишь спектроскопическими исследованиями его ученику Берналу. Оказалось, что каждый атом кислорода связан с четырьмя атомами водорода, которые находятся на линии О—О, при этом со «своими» атомами — прочной ковалентной связью, а с «чужими» — водородной, но ни один из них не фиксирован на месте. Он «знает» только свою связь О—О, но может на этой линии занимать два положения (около «своего» и «чужого») и примерно одинаковое время. Расстояние между каждой парой О—О сохраняется неизменным и равным $2,76 \cdot 10^{-10}$ м. Поэтому в присутствии внешнего электрического поля «перескоки» атомов водорода становятся более направленными и лед *обладает высокой электропроводностью*.

Структуру белков нельзя постичь, если не изучить структуру воды — среды, где они образуются. Поскольку в отсутствие молекулярной структуры плотность жидкой воды должна быть порядка $1,8 \text{ г/см}^3$, а она равна 1 г/см^3 , то должна быть в ней структура, мешающая плотной упаковке. Впоследствии установили, что каждую молекулу воды в жидком состоянии окружают не 6, а 4,4 молекулы (так называемое координационное число, у льда оно равно 4). Значит, при таянии число соседей средней молекулы возрастает всего на 0,4. Концентрация дефектов структуры во льду относительно невелика ($1/2,5$ млн молекул), а в воде она возрастает в 25 тысяч раз ($1/200$ молекул). Попытка описывать воду как лед с большим числом дефектов оказалась несостоятельной.

Направленность водородных связей проявляется в необычности воды, образующейся при плавлении льда. Оказалось, они рвутся сразу, а не постепенно, как у других кристаллов, когда молекулы накапливают энергию, переходя из одной энергетической ямы в другую. Во льду лишь отдельные молекулы вырываются из структуры, сразу оказываясь без водородных связей на другом энергетическом уровне. Хотя между уровнями происходит обмен, по мере роста температуры все меньше молекул возвращается назад. По данным Л.Полинга, при 0 °С лишь 15% водородных связей оказываются разорванными, т.е. в жидкой воде сохраняется гек-

296

сагональная структура. Даже в газообразном состоянии водородные связи сохраняются, исчезая лишь при температуре 600 °С. Заполнение пустот молекулярной конструкции льда при плавлении, как показал в 60-е гг. О. Самойлов, ведет к увеличению плотности. При нагревании пустоты заполняются больше и плотность растет. Но при нагревании идет еще и термическое расширение воды. В интервале температур от 0 до 4 °С преобладает процесс заполнения пустот, при более высоких температурах начинается расширение и плотность падает. Этим объясняются способность воды к переохлаждению и перегреву, высокая теплоемкость и др.

Водородные связи в биосистемах ведут к необычным электростатическим явлениям — в соседних точках флуктуации поляризации становятся коррелированными. Если период приложенного переменного электрического поля сравним с длиной водородных связей (около $3 \cdot 10^{-10}$ м), то две соседние молекулы могут оказаться в противоположно направленных полях и диполи этих молекул будут стремиться развернуться в разные стороны. Но они связаны водородной связью, и это им может не удастся. И диэлектрическая проницаемость воды в таком поле зависит лишь от атомно-молекулярных механизмов перераспределения заряда. Эти механизмы определяют процессы возбуждения и передачи нервного импульса, слияния клеток и пр., ведь все эти процессы в живой природе происходят через водную прослойку электролитов.

Протон может находиться как около «своего» атома кислорода (на расстоянии порядка 10^{-10} м), так и вблизи «чужого» (на расстоянии от «своего» около $1,7 \cdot 10^{-10}$ м), т.е. наряду с обычным димером $\text{HO} \cdots \text{H} \cdots \text{OH}_2$ оказывается нестабильной ионная пара $\text{HO} \cdots \text{H} \cdots \text{OH}_2$. В этом случае возрастает дипольный момент молекулы до $8 \cdot 10^{-29}$ Кл · м. Последнее состояние имеет место для границы раздела фаз, возможно, в этом состоянии находится вода вокруг клеточных мембран живых организмов. Можно сказать, что вода «помнит» свое происхождение, тогда как другие жидкости не обладают этой способностью.

Химические свойства воды

Химические свойства воды связаны с полярностью молекулы и строением ее электронной оболочки. Вода легко вступает в химические соединения, образуя гидроокиси. Щелочные и щелочноземельные металлы разлагают воду при обычной температуре — образуются водород и гидроокись. При повышенной температуре со всеми металлами происходит такая же реакция. Взаимодействие с водой ведет к коррозии

металлов. В воде растворяется гораздо больше веществ, чем в любой другой жидкости. Молекулы растворимого вещества отделяются друг от друга и смешиваются с молекулами растворителя. Из-за своей полярной природы вода растворяет ионные *вещества и другие полярные соединения*. А соединения, не имеющие заряда, в воде не растворяются,

297

между ними образуется поверхность раздела. Это обстоятельство очень важно для процессов внутри живых структур. Распадение вещества на ионы при растворении называется *диссоциацией*.

Вещество является кислотой, если оно диссоциирует в воде с образованием ионов водорода, и основанием, если способно в растворе присоединять ионы водорода или образовывать гидроксидионы OH. Если в растворе не образуется ни то, ни другое, вещество называют солью. Кислотность или щелочность раствора характеризуется показателем pH, шкала которого охватывает значения от 0 до 14. Эта шкала логарифмическая, т. е. на ней отложены логарифмы концентрации водородных ионов. Кислотность раствора с pH5 в 10 раз больше, чем с pH6, и в 100 раз больше, чем с pH7. Раствор с pH6 содержит одну миллионную моля ионов водорода на 1 л, нейтральной среде соответствует pH7, ниже идут более кислые среды, а выше — щелочные.

Уникальные свойства воды в живой материи связаны и с малыми размерами ее молекул, их полярностью (неравномерным распределением зарядов в молекуле — дипольностью воды) и способностью соединяться друг с другом водородными связями. Водородные связи слабее, чем ионные, но оказываются важными при свойствах воды как превосходного растворителя, особенно для полярных молекул. К таким веществам относятся ионные соединения, например соли, у которых заряженные частицы (ионы) диссоциируют в воде при растворении, или неионные соединения — сахара и простые спирты, в молекулах которых есть заряженные группы (типа OH-группы).

Когда вещество переходит в раствор, его молекулы или ионы могут более свободно двигаться, и реакционная способность возрастает. Большая часть реакций в клетке идет в водном растворе. Такие *гидрофильные* свойства полярных молекул важны в обеспечении стабильности мембран, белковых молекул, нуклеиновых кислот и других субклеточных структур. Неполярные вещества, такие как липиды, с водой не смешиваются и разделяют водные растворы на отдельные компоненты, как их разделяют мембраны. Поэтому неполярные части молекул водой отталкиваются и в присутствии воды притягиваются друг к другу, или обладают *гидрофобным* эффектом, например, сливание капелек масла в большую каплю и нерастворение ее в воде. Свойство воды — растворителя важно для транспортировки по организму разных веществ (это происходит в крови, в лимфатической и экскреторной системах, в пищеварительном тракте и во флоэме и ксилеме растений).

Долгое время воду считали пассивной средой, обеспечивающей протекание важных биохимических процессов и реакций. В начале 60-х гг. Л.Полинг опубликовал свои исследования влияния анестетиков на прохождение сигналов болевой чувствительности. *Анестетики* — вещества, нарушающие прохождение этих сиг-

298

налов у высших животных: четыреххлористый углерод, закись азота («веселящий» газ), сероуглерод и даже инертные газы. Оказалось, что парциальное давление паров анестетика, соответствующее этому порогу, пропорционально давлению кристаллизации гидрата этого анестетика при нуле градусов. Значит, образование гидратов связано с основами жизнедеятельности, в данном случае с включением сигнала боли. Рентгеноструктурный анализ гидратов анестетиков показал, что их молекулы находятся в пустотах каркаса, построенного из молекул воды. Следовательно, они представляют собой механические «включения», а не соединения при помощи химических связей. Их назвали *клатратами*, или клеточными соединениями.

В 70-е гг. появились работы, выполненные под руководством академика А. Николаева, в которых сообщалось об обнаружении *клатратов* в жидком состоянии и исследовании фазовых переходов в них вблизи критической точки. Академиком Э. Галимовым была обнаружена универсальная закономерность, выполняющаяся на любом уровне организации биосистем. Процессы вблизи критической точки могут идти обратимым образом, а микроскопический механизм этой обратимости связан с замедлением диффузии вблизи критического состояния. Оказалось, что в этой области процессы происходят по нелинейным законам и критические флуктуации концентраций веществ являются самоподдерживающимися, включающими способность к самокопированию. Дальнейший анализ происходящих в воде процессов может найти практическое применение во многих областях — от медицины и наркологии до самовоспроизводящихся химических машин и автоматов футурологии.

8.4. Процессы диффузии и осмоса, их роль в клеточных мембранах

Л.Больцман стремился дать интерпретацию термодинамики в рамках атомистической концепции с помощью статистической механики. Его идеи обрели реальность и значимость, когда было доказано, что материя состоит из атомов. Формулу Больцмана для энтропии проверили экспериментально, а статистический метод обрел предсказательную силу. Больцман считал, что с течением времени система побывает во всех

энергетически возможных конфигурациях, т.е. будет возвращаться снова и снова к любой такой конфигурации. После его смерти эта идея вечного возврата была сформулирована в *эргодическую гипотезу*. Смысл ее в следующем. Состояние системы в классической физике изображается точкой в фазовом пространстве, поэтому при движении в фазовом пространстве точка проведет в каждой его области долю времени,

299

пропорциональную объему этой области. В квантовой механике объему фазового пространства соответствует число состояний. Исходя из эргодической гипотезы можно понять возникновение необратимых процессов.

В качестве примера рассмотрим процесс смешивания двух равных объемов воды при разных температурах. В результате процесса мы не получим отдельных слоев (горячего и холодного) в одном сосуде, т.е. энтропия полученной теплой воды окажется больше, чем сумма энтропий объемов воды до смешивания в соответствии со вторым началом термодинамики. Это означает, что и количество состояний при смешивании увеличилось. С позиции эргодической гипотезы точка проведет большую часть времени в области фазового пространства, соответствующей теплой воде, а в областях, соответствующих горячему и холодному слоям, — малое время. Опыт показывает, что возврата к отдельным слоям после смешивания можно ждать неограниченно долгое время. Введя необратимости, Больцман считал, что это соответствует тому, что исходное состояние очень невероятно, оно отвечает малому объему фазового пространства (или малой энтропии).

К необратимым процессам *п е р е н о с а* массы, энергии, импульса, заряда, количества движения и пр. относят явления, происходящие из-за перемешивания молекул. Такими процессами являются диффузия, термодиффузия, теплопроводность, вязкое течение, электропроводность, явления термоэлектричества, расширения газов в пустоту, осмос и др. (рис. 8.4). Из-за непрерывных столкновений друг с другом ни одна из молекул (или их групп) газа или жидкости не перемещается из одного участка сосуда в другой с большой скоростью. Если небольшой кристаллик йода поместить в сосуд с воздухом, то очень медленно начнут распространяться пары рыжего цвета. Этот процесс называется *диффузией*, т. е. пары йода диффундируют сквозь молекулы воздуха. Даже внешне процесс диффузии аналогичен процессу распространения теплоты в стержне, условием которого служит наличие градиента температуры. Для диффузии необходим градиент концентрации c , и его наличие позволяет рассчитать скорость изменения числа молекул в объеме dN/dt , которая пропорциональна площади поверхности S , через которую будет происходить диффузия.

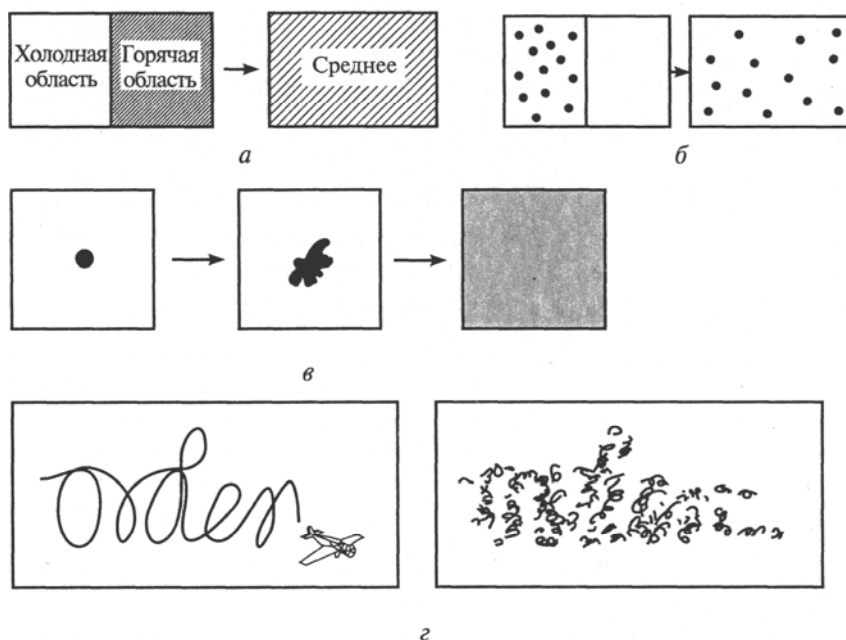
Коэффициент диффузии D меняется в соответствии с уравнением $dN/dt = -DS (\partial c / \partial x)$.

Это уравнение, похожее на уравнение распространения теплоты (знак минус показывает, что диффузия происходит противоположно росту концентрации), получил немецкий физиолог А. Фик (1855). В 1822 г. французский инженер Л. Навье математически описал движение вязкой жидкости. Через 100 лет выяснилось, что уравнения Фурье, Навье и Фика являются частными случаями общего уравнения, описывающего неравновесные процессы.

300

Рис. 8.4. Примеры необратимых процессов:

a — необратимый теплообмен; *б* — необратимое расширение газа; *в* — расплывание капли чернил в воде; *г* — диффузия дымового облака



г

Скорость диффузии зависит от скоростей диффундирующих молекул с учетом коэффициента диффузии D . В кинетической теории среднеквадратичная скорость молекул пропорциональна T/m , поэтому можно ожидать,

что и коэффициент D будет также зависеть от температуры и массы. Опыты подтвердили это с высокой точностью. Можно проверить зависимость D от m по данным для некоторых небольших молекул в воздухе при атмосферном давлении: для водорода при $T = 0$ $D = 6,34$; для воды при $T = 8$ $D = 2,39$; для кислорода при $T = 0$ $D = 1,78$; для углекислого газа при $T = 0$ $D = 1,39$; для дисульфида углерода при $T = 20$ $D = 1,02$ (здесь T - °C, D - $0,00001 \text{ м}^2/\text{с}$).

Диффузия в растворах, особенно в воде, важна для биосистем. Здесь также подходит закон Фика, но коэффициент диффузии $D = \kappa T / 6\pi a \eta r$, и из-за того, что масса m пропорциональна r^3 , $D \sim m^{-1/3}$, в жидкостях коэффициент диффузии сильно зависит от массы частиц.

Используя связь коэффициентов диффузии отдельных молекул в воде и измеряя их, можно найти размеры молекул. Так как плотность ρ многих больших биологических молекул в сухом виде примерно равна $1,27 \text{ г/см}^3$, а при погружении в воду к их поверх-

301

ности налипают молекулы воды, увеличивая их эффективный объем, то масса увеличивается почти в 1,5 раза. С учетом этого можно найти массы молекул по их размерам и средней плотности: $D = \kappa T / 6\pi a \eta r$; $m = 1/3\pi a^3 \rho$; $m_{\text{исп}} = m/1,5$.

Диффузия молекулярных ионов через мембраны, образующие клеточные стенки, осуществляется при наличии определенного электрического потенциала внутри клетки. Кроме того, определенные химические процессы, происходящие внутри мембраны, меняют направление скорости диффузии различных ионов так, что по нервным волокнам распространяются электрические сигналы, представляющие нервный импульс. В биофизике распространен термин — *транспорт частиц*, являющийся синонимом диффузии. Процесс диффузии ответствен за 98 % необходимого кислорода, поглощаемого легкими. Стенки небольших емкостей внутри легких (альвеол), в которых происходит диффузия, имеют у взрослого человека площадь порядка 70 м^2 , а толщину всего $0,5 \text{ мкм}$. Эти стенки плотно обвиты капиллярами, поэтому кровь циркулирует через мембраны легких только тоненькими струйками, причем ее общее количество около 100 мл . Так как площадь поверхности, через которую кислород диффундирует в кровь, а углекислый газ — обратно, очень велика, а толщина мембран мала, становится понятна эффективность процесса диффузии.

Диффузия через полупроницаемую перегородку названа *осмосом*. Мембрана полупроницаема, если она пористая и через нее возможна избирательная диффузия. Биологические мембраны часто проницаемы для воды, но непроницаемы для других веществ, растворенных в воде. Например, молекулы воды, имеющие диаметр $0,38 \text{ нм}$, проходят сквозь поры, а молекулы глюкозы диаметром $0,88 \text{ нм}$ задерживаются. Но молекулы глюкозы не позволяют молекулам воды свободно подходить к мембране, замедляя скорость ее прохождения. Возникает разное осмотическое давление по разные стороны мембраны, а общее давление раствора равно сумме парциальных давлений разных составляющих. В 1887 г. Я. Вант-Гофф установил, что осмотическое давление пропорционально концентрации растворенного вещества c_v и температуре T . Осмотическое давление раствора зависит от концентрации частиц, которые не могут пройти через мембрану, при этом ионизированные вещества создают большее давление, чем неионизированные. Например, если при растворении в воде поваренной соли происходит разделение на две осмотические частицы, принято считать, что 1 моль NaCl соответствует 2 осмолям. Осмолярность, равная 1, отвечает 1 осмолу растворенного вещества в 1 л воды. Нормальная осмолярность клеточной жидкости 300 осмоль/м^3 , поэтому при нормальной температуре тела ($T = 310 \text{ К}$) осмотическое давление равно $B_{c_v} T = 8,27 \cdot 300 \cdot 310 = 7,7 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Получи-

302

лось огромное значение давления, и оно останется таким, если вокруг клетки будет чистая вода. На самом деле это не так: окружение имеет концентрацию, близкую к той, что внутри клетки, и если поместить клетку в чистую воду, разность осмотических давлений будет столь высока, что вода с большим напором устремится внутрь клетки и разорвет ее.

Осмоз не обязательно связан с наличием мембран. Набухание — тоже осмотический эффект.

8.5. Понятия фазы и фазового перехода. Фазовые переходы первого и второго рода

Фазы — это различные однородные части физико-химических систем. Вещество однородно, когда все параметры состояния вещества одинаковы во всех его элементарных объемах, размеры которых велики по сравнению с межатомными состояниями. Смеси различных газов всегда составляют одну фазу, если во всем объеме они находятся в одинаковых концентрациях. Одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может быть в одном из трех агрегатных состояний — жидком, твердом или газообразном. Фазы — это устойчивые состояния определенного агрегатного состояния. Понятие фазы более широкое, чем понятие агрегатного состояния.

В зависимости от внешних условий система может находиться в равновесии либо в одной фазе, либо сразу в нескольких фазах. Их равновесное существование называется *фазовым равновесием*.

Испарение и конденсация — часто наблюдаемые фазовые переходы воды в окружающей природе. При переходе воды в пар происходит сначала испарение — переход поверхностного слоя жидкости в пар, при этом

в пар переходят только самые быстрые молекулы: они должны преодолеть притяжение окружающих молекул, поэтому уменьшаются их средняя кинетическая энергия и соответственно температура жидкости. Наблюдается в быту и обратный процесс — конденсация. Оба эти процесса зависят от внешних условий. В некоторых случаях между ними устанавливается динамическое равновесие, когда число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее. Молекулы в жидкости связаны силами притяжения, которые удерживают их внутри жидкости. Если молекулы, имеющие скорости, которые превышают среднюю, находятся вблизи поверхности, они могут ее покинуть. Тогда средняя скорость оставшихся молекул понизится и температура жидкости уменьшится. Для испарения при постоянной температуре нужно сообщить жидкости некоторое количество теплоты: $Q = rm$, где r — удельная теплота парообразования, которая уменьшается с ростом температуры. При комнатной температуре для одной молекулы воды теплота парообразования составляет 10^{-20} Дж, тогда как средняя энергия теплового движения равна $6,06 \cdot 10^{-21}$ Дж. Это значит, что в пар переходят

303

молекулы с энергией, которая в 10 раз больше энергии теплового движения. При переходе через поверхность жидкости потенциальная энергия быстрой молекулы растет, а кинетическая уменьшается. Поэтому средние кинетические энергии молекул пара и жидкости при тепловом равновесии равны.

Насыщенный пар — это пар, находящийся в динамическом равновесии, соответствующем данной температуре, со своей жидкостью. Опыт показывает, что он не подчиняется закону Бойля—Мариотта, поскольку его давление не зависит от объема. Давление насыщенного пара — наибольшее давление, которое может иметь пар при данной температуре. Процессы испарения и конденсации воды обуславливают сложные взаимодействия атмосферы и гидросферы, важные для формирования погоды и климата. Между атмосферой и гидросферой происходит непрерывный обмен веществом (круговорот воды) и энергией.

Исследования показали, что с поверхности Мирового океана, составляющего 94 % земной гидросферы, за сутки испаряется около $7\,000\text{ км}^3$ воды и примерно столько же выпадает в виде осадков. Водяной пар, увлекаемый конвекционным движением воздуха, поднимается вверх и попадает в холодные слои тропосферы. По мере подъема пар становится все более насыщенным, затем конденсируется, образуя дождевые капли. В процессе конденсации пара в тропосфере за сутки выделяется около $1,6 \cdot 10^{22}$ Дж теплоты, что в десятки тысяч раз превосходит вырабатываемую человечеством энергию за то же время.

Кипение — процесс перехода жидкости в пар в результате всплывания пузырьков, наполненных паром. Кипение происходит во всем объеме. Разрыв пузырьков у поверхности кипящей жидкости свидетельствует о том, что давление пара в них превышает давление над поверхностью жидкости. При температуре $100\text{ }^\circ\text{C}$ давление насыщенных паров равно давлению воздуха над поверхностью жидкости (так была выбрана эта точка на шкале). На высоте 5 км давление воздуха вдвое меньше и вода закипает там при $82\text{ }^\circ\text{C}$, а на границе тропосферы (17 км) — приблизительно при $65\text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому точка кипения жидкости соответствует той температуре, при которой давление ее насыщенных паров равно внешнему. Слабое поле тяготения Луны (ускорение свободного падения у ее поверхности равно всего $1,7\text{ м/с}^2$) не способно удержать атмосферу, а при отсутствии атмосферного давления жидкость мгновенно выкипает, поэтому лунные «моря» безводны и образованы застывшей лавой. По той же причине безводны и марсианские «каналы».

Вещество может находиться в равновесии и в разных фазах. Так, при сжижении газа в состоянии равновесия фаз объем может быть каким угодно, а температура перехода связана с давлением насыщенного пара. Кривая равновесия фаз может быть получена при проекции на плоскость (p, T) области перехода в жидкое состояние. Аналитически кривая равновесия двух фаз определяется из решения дифференциального уравнения Клаузиуса—Клапейрона. Аналогично можно получить кривые плавления и возгонки, которые соединяются в одной точке плоскости (p, T) , в тройной точке (см. рис. 7.1), где в определенных пропорциях находятся в равно-

304

весии все три фазы. Тройной точке воды соответствует давление $569,24\text{ Па}$ и температура $-0,0075\text{ }^\circ\text{C}$; углекислоты — $5,18 \cdot 10^5\text{ Па}$ и $56,6\text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Поэтому при атмосферном давлении p , равном $101,3\text{ кПа}$, углекислота может быть в твердом или газообразном состоянии. При критической температуре физические свойства жидкости и пара становятся одинаковыми. При температурах выше критической вещество может быть только в газообразном состоянии. Для воды — $T = 374,2\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 22,12\text{ МПа}$; для хлора — $144\text{ }^\circ\text{C}$ и $7,71\text{ МПа}$ соответственно.

Температурами перехода называют температуры, при которых происходят переходы из одной фазы в другую. Они зависят от давления, хотя и в различной степени: температура плавления — слабее, температуры парообразования и сублимации — сильнее. При нормальном и постоянном давлениях переход происходит при определенном значении температуры, и здесь имеют место точки плавления, кипения и сублимации (или возгонки).

Переход вещества из твердого состояния непосредственно в газообразное можно наблюдать, например, в оболочках кометных хвостов. Когда комета находится далеко от Солнца, почти вся ее масса сосредоточена в ее ядре, имеющем размеры $10\text{—}12\text{ км}$. Ядро окружено небольшой оболочкой газа — это голова кометы. При приближении к Солнцу ядро и оболочка кометы начинают нагреваться, вероятность сублимации растет, а

десублимации (обратного ей процесса) — уменьшается. Вырывающиеся из ядра кометы газы увлекают за собой твердые частицы, голова кометы увеличивается в объеме и становится газопылевой по составу. Давление околокометного ядра очень низкое, поэтому жидкая фаза не возникает. Вместе с головой растет и хвост кометы, который вытягивается в сторону от Солнца. У некоторых комет он достигает в перигелии сотен миллионов километров, но плотности в кометном веществе ничтожны малы. При каждом подходе к Солнцу кометы теряют большую часть своей массы, в ядре сублимируют все более летучие вещества, и постепенно оно рассыпается на метеорные тела, образующие метеорные потоки. За 5 млрд лет существования Солнечной системы так закончили свое существование множество комет.

Весной 1986 г. в космос для исследования кометы Галлея были направлены автоматические советские станции «Вега-1» и «Вега-2», которые прошли на расстоянии от нее 9000 и 8200 км соответственно, а станция НАСА «Джотто» — на расстоянии всего 600 км от ядра кометы. Ядро имело размеры 14 x 7,5 км, темный цвет и температуру около 400 К. Когда космические станции прошли через голову кометы, сублимировало около 40 000 кг ледяного вещества за 1 с.

Поздней осенью, когда после сырой погоды наступает резкое похолодание, на ветвях деревьев и на проводах можно наблюдать

305

иней — это десублимировавшиеся кристаллики льда. Подобное явление используют при хранении мороженого, когда углекислота охлаждается, так как переходящие в пар молекулы уносят энергию. На Марсе явления сублимации и десублимации углекислоты в полярных шапках играют такую же роль, что и испарение — конденсация в атмосфере и гидросфере Земли.

Теплоемкость стремится к нулю при сверхнизких температурах, как установил Нернст. Отсюда Планк показал, что вблизи абсолютного нуля все процессы протекают без изменения энтропии. Построенная Эйнштейном теория теплоемкости твердых тел при низких температурах позволила сформулировать результат Нернста как третье начало термодинамики. Наблюдаемые при низких температурах необычные свойства веществ — сверхтекучесть и сверхпроводимость — нашли объяснение в современной теории как макроскопические квантовые эффекты.

Фазовые переходы бывают нескольких родов. Во время фазового перехода температура не меняется, но меняется объем системы.

Фазовыми переходами первого рода называют изменения агрегатных состояний вещества, если: температура постоянна во время всего перехода; меняется объем системы; меняется энтропия системы. Чтобы произошел такой фазовый переход, нужно данной массе вещества сообщить определенное количество теплоты, соответствующее скрытой теплоте превращения.

В самом деле, при переходе из более конденсированной фазы в фазу с меньшей плотностью нужно сообщить некоторое количество энергии в форме теплоты, которое пойдет на разрушение кристаллической решетки (при плавлении) или на удаление молекул жидкости друг от друга (при парообразовании). Во время преобразования скрытая теплота расходуется на преодоление сил сцепления, интенсивность теплового движения не изменяется, в результате температура остается постоянной. При таком переходе степень беспорядка, а следовательно, и энтропия возрастают. Если процесс идет в обратном направлении, то скрытая теплота выделяется.

Фазовые переходы второго рода связаны с изменением симметрии системы: выше точки перехода система, как правило, обладает более высокой симметрией, как показал в 1937 г. Л.Д.Ландау. Например, в магнетике спиновые моменты выше точки перехода ориентированы хаотически, и одновременное вращение всех спинов вокруг одной оси на одинаковый угол не изменяет свойств системы. Ниже точки перехода спины имеют некоторую преимущественную ориентацию, и одновременный их поворот меняет направление магнитного момента системы. Ландау ввел коэффициент упорядочения и разложил термодинамический потенциал в точке перехода по степеням этого коэффициента, на основе чего построил классификацию всех возможных типов пере-

306

дов, а также теорию явлений сверхтекучести и сверхпроводимости. На этой основе Ландау и Лифшиц рассмотрели много важных задач — переход сегнетоэлектрика в параэлектрик, ферромагнетика — в парамагнетик, поглощение звука в точке перехода, переход металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние и др.

Расчет термодинамических свойств системы на основе статистической механики предполагает выбор определенной модели системы, и чем сложнее система, тем проще должна быть модель. Е. Изинг предложил модель ферромагнетика (1925) и решил задачу об одномерной цепочке с учетом взаимодействия с ближайшими соседями для любых полей и температур. При математическом описании таких систем частиц с интенсивным взаимодействием выбирается упрощенная модель, когда происходит взаимодействие только парного типа (такая двумерная модель названа решеткой Изинга). Но фазовые переходы не всегда удавалось рассчитать, вероятно, из-за каких-то неучтенных явлений, общих для систем многих частиц, причем не имеет значения природа самих частиц (частицы жидкости или магниты). Л.Онсагер дал точное решение для двумерной модели Изинга (1944). Он поместил в узлах решетки диполи, которые могут ориентироваться

только двумя способами, а каждый такой диполь может взаимодействовать только с соседом. Получилось, что в точке перехода теплоемкость обращается в бесконечность по логарифмическому закону симметрично по обе стороны точки перехода. В дальнейшем оказалось, что этот вывод весьма важен для всех фазовых переходов второго рода. Работа Онсагера показала, что метод статистической механики позволяет получить новые результаты для фазовых превращений.

Фазовые переходы второго, третьего и т.д. родов связаны с порядком тех производных термодинамического потенциала Φ , которые испытывают конечные изменения в точке перехода. Такая классификация фазовых превращений связана с работами физика-теоретика П. Эренфеста. В случае фазового перехода второго рода в точке перехода испытывают скачки производные второго порядка: теплоемкость при постоянном давлении $C_p = -T(\partial^2\Phi/\partial T^2)$, сжимаемость $\beta = -(1/V_0)(\partial^2\Phi/\partial p^2)$, коэффициент теплового расширения $\alpha = (1/V_0)(\partial^2\Phi/\partial T\partial p)$, тогда как первые производные остаются непрерывными. Это означает отсутствие выделения (поглощения) теплоты и изменения удельного объема.

Квантовую теорию поля начали использовать для расчетов систем частиц только в 70-е гг. XX в. Система рассматривалась как решетка с меняющимся шагом, что позволяло менять точность вычислений и приближаться к описанию реальной системы и использовать ЭВМ. Американский физик-теоретик К. Вильсон, применив новую методику расчетов, получил качественный скачок в понимании фазовых переходов второго рода, связанных с перестройкой симметрии системы. Фактически он связал квантовую механику со статистической, и его работы получили фунда-

307

ментальное значение. Они применимы и в процессах горения, и в электронике, и в описании космических явлений и ядерных взаимодействий. Вильсон исследовал широкий класс критических явлений и создал общую теорию фазовых переходов второго рода.

8.6. Сверхтекучесть и сверхпроводимость

Получение сжиженных газов, необходимых в промышленности, требовало разработки методов получения низких температур. Многое в этом направлении сделано академиком П.Л.Капицей (1938), которому открытие *сверхтекучести жидкого гелия* принесло мировую славу. Через несколько лет Ландау построил теорию сверхтекучести жидкого гелия. В предвоенные годы проблема сверхтекучести была одной из центральных проблем теоретической физики.

Установление понятия *критической точки* оказалось решающим в разработке методики и техники сжижения газов. В 1877 г. в Париже, в химической лаборатории Нормальной школы, Л. Кальете провел опыт по сжижению кислорода: предварительно кислород был охлажден и сжат до $303,9 \cdot 10^5$ Па, затем резко расширен, в результате его температура упала до 90 К, и в этот момент в стеклянном приемнике возник туман — мельчайшие капельки жидкого кислорода. Вскоре Кальете тем же способом превратил в жидкость азот и водород. В Женеве в том же году Р. П. Пикте получил уже несколько кубических сантиметров жидкого кислорода и водорода. В еще больших количествах их удалось получить польским физикам З. Врублевскому и К. Ольшевскому, когда они понизили температуру еще на 20 К путем испарения жидкого воздуха в пустоту (1885). Используя эффект Джоуля — Томсона, отличающийся от охлаждения при адиабатическом расширении тем, что газ охлаждается без совершения работы, за счет сил взаимного притяжения, английский физико-химик Дж. Дьюар сумел получить уже несколько литров жидкого водорода (1893).

Стремление к беспорядку приводит к увеличению (в среднем) расстояния между частицами, часть кинетической энергии частиц переходит в потенциальную, и по мере уменьшения средней кинетической энергии уменьшается и температура газа. Эффект Джоуля—Томсона используют для понижения температуры на порядок по сравнению с нормальной. При каждом процессе охлаждения температура падает незначительно, но система работает циклами, и в конце процесса сжиженный газ капает из сопла в колбу. Дьюар изобрел сосуд для хранения сжиженных газов, который сейчас широко распространен (сосуд Дьюара).

Системы с последовательным сжатием и расширением газа широко используют для сжижения газа. Гелий превращается в жидкость при $T = 4,2$ К. Впервые жидкий гелий получил нидерландский физик Х. Камерлинг-Оннес в Лейдене путем охлаждения гелия ниже точки его инверсии с помощью жидкого водорода, кипящего под пониженным давлением (1908). Так он достиг температуры 1 К.

308

Из теоремы Нернста, называемой третьим началом термодинамики, следует, что при приближении температуры к нулю теплоемкости тоже стремятся к нулю, т.е. начинают зависеть от температуры (T). По классической теории этого быть не должно. Значит, в рамках классической физики теорема Нернста не может быть объяснена. Кроме того, из уравнения Клапейрона следует, что коэффициент теплового расширения и термический коэффициент давления не должны зависеть от температуры, а из теоремы Нернста получается, что они тоже обращаются в нуль при $T = 0$. Это значит, что при низких температурах перестает выполняться и уравнение Клапейрона — Менделеева.

Поскольку $(\partial S/\partial p)_m = -(\partial S/\partial T)_p$, $(\partial S/\partial V)_m = (\partial p/\partial T)_v$ и по третьему началу термодинамики при $T = 0$ левые части обращаются в нуль, то в нуль должны обратиться и правые части, т.е. при $T = 0$ давление газа не зависит

от температуры, а определяется только плотностью, газ находится в состоянии вырождения. Пример такого газа — газ свободных электронов в металлах при обычных температурах.

К вырожденным газам не применима статистика Больцмана, поэтому разработана квантовая статистика Бозе—Эйнштейна (для бозонов). Из приведенных соотношений получается, что и внутренняя энергия перестает зависеть от температуры, определяясь только плотностью. Поэтому и газ свободных электронов в металлах не вносит заметного вклада в теплоемкость.

Охлаждение от 30 до 3 К совершается при использовании гелия. Сначала гелий охлаждают путем контакта его с жидким азотом или воздухом, затем — при адиабатическом расширении, когда его заставляют совершить работу. После этого охлажденный гелий многократно пропускают через установку Джоуля—Томсона, и через несколько циклов начинает капать уже жидкий гелий с точкой кипения 4,2 К. Температура 3 К имеет более общее значение, поскольку такой температурой обладает окружающее нас космическое пространство. Это слабое излучение, обнаруженное американскими учеными (радио- и астрофизиком А. Пензиасом и радиоастрономом Р. Вильсоном), является также *космическим микроволновым фоновым излучением*. В нем присутствует целый набор длин волн, но максимум интенсивности лежит около длины 3 см. Оно обладает всеми свойствами излучения, которыми бы обладало тело, нагретое до температуры 2,7 К. Считается, что это излучение было порождено в результате Большого Взрыва, и потому И. С. Шкловский предложил его назвать *реликтовым*. По теории Большого Взрыва, предложенной Г. Гамовым, в ранней Вселенной излучение и вещество находились в очень тесном тепловом контакте, и только через 700 тыс. лет после Большого Взрыва произошло их разделение, при этом температура Вселенной понизилась на 3000 К. Вселенная и далее продолжала расширяться, соответственно увеличивались и длины волн излучения, поэтому большая часть излучения сейчас имеет длину волны порядка 3 см. Вещество, лишившись контакта с излучением, остывало медленней.

309

Если добиться испарения жидкого гелия, можно достичь температур порядка 1 К. Для получения более низких температур используют магнитные свойства веществ, обусловленные наличием спина электрона. Движущиеся электроны, так как каждый электрически заряжен, порождают магнитные поля, а наличие спина приводит к возникновению магнитного поля, и каждый электрон подобен маленькому полосовому магниту. Но в отличие от него электрон во внешнем магнитном поле может иметь только две ориентации («вверх» и «вниз») как объект квантовой природы. У большинства веществ спины электронов скомпенсированы и не создают магнитного поля, у парамагнитных — они не скомпенсированы, но без магнитного поля имеют одинаковое число спинов, ориентированных «вверх» и «вниз». Различным ориентациям полосового магнита во внешнем поле сопоставляют определенное значение энергии, то же — и для двойки ориентированных спинов. Пусть в присутствии поля ориентации «вверх» соответствует большая энергия. Если с увеличением магнитного поля отношение чисел электронов со спинами «вверх» и «вниз» осталось неизменным, значит, система обладает бесконечно высокой температурой. В самом деле, она определялась через отношение числа возбужденных атомов к числу невозбужденных: $T = A(E)/\ln(N_{\text{невозб}}/N_{\text{возб}})$, поэтому при равенстве этих чисел $\ln 1 = 0$ и $T = \infty$. Итак, если два состояния отличаются по энергиям и одинаково «заселены», можно сказать, что система обладает бесконечной температурой.

Зафиксировав этот общий вывод, приложим внешнее магнитное поле к парамагнитному образцу, находящемуся в контакте с термостатом. Возникает отличие между по-разному ориентированными спинами, так как система была «бесконечно нагрета» и «перевороту» спинов вниз будет соответствовать переход части энергии в термостат. В результате число спинов, ориентированных «вниз», возрастет, они не будут скомпенсированы, система приобретет магнитный момент. Этот процесс, соответствующий стремлению к рассеянию энергии, называют *изотермическим намагничиванием*. Если теперь нарушить тепловой контакт с окружающей средой и повести процесс на следующем этапе адиабатически, потери энергии уже не будет. Приступим к адиабатическому размагничиванию образца. В отсутствие внешнего магнитного поля спины электронов практически с равными вероятностями могут быть ориентированы как по полю («вниз»), так и против него («вверх»). Энтропия системы спинов растет, хотя у образца в целом она не меняется, т. е. у системы атомов, находящихся в тепловом движении, энтропия понизилась, тепловое движение стало более упорядоченным, снизилась интенсивность теплового движения атомов (T). Внешний наблюдатель отметил понижение температуры, а система электронных спинов выступила «холодиль-

310

ником», откачав под действием магнитного поля энергию от атомов в окружающее пространство.

Принципиально новым методом получения низких температур явился предложенный П. Дебаем (1926) и У. Джоком (1927) способ, основанный на том, что при размагничивании парамагнетика в адиабатических условиях температура его понижается. В 1933 г. Джоки и Мак-Дуглас ввели этот метод в практику получения сверхнизких температур и, размагничивая сульфат гадолиния, получили температуру 0,27 К. Охлаждая таким же образом парамагнитную соль, удалось достичь температуры 0,01 К.

Многие устройства, создающие низкие температуры (в том числе и домашний холодильник), используют сжижение газа, который проходит через циклы сжатия и расширения. В первом процессе температура сначала возрастает, и сообщенная газу добавочная энергия удаляется путем передачи ее окружающей среде (в

холодильнике теплоту отбирает циркулирующий воздух). В результате при высоком давлении и комнатной температуре получается газ. Затем газ быстро расширяют, его температура падает, и при достаточно низких температурах он переходит в жидкое состояние.

С середины 60-х гг. магнитный метод получения сверхнизких температур был вытеснен более эффективным методом растворения гелия-III в сверхтекучем гелии-IV, разработанным Лондоном, Кларком и Мендозой (1962). Рефрижераторы на этом принципе стали незаменимыми при исследованиях в области температур от 0,25 до 0,01 К. Методом адиабатического размагничивания удалось достигнуть температур до 0,003 К. При таких температурах прекращаются не только химические, но и физические явления: в микроструктуре твердых тел царит полный покой.

Существует возможность еще больше снизить температуру, используя в качестве холодильника не систему электронных спинов, а систему спинов атомных ядер, которые вращаются так же, как и электроны. Путем ядерного адиабатического размагничивания удалось достичь температур рекордного холода, который отличался от нормальных температур на десять порядков (!) и составлял 10^{-4} К — при таких температурах никакие физические законы уже не действуют.

Явление сверхтекучести наблюдали и раньше, отмечая странное поведение гелия при температурах около 2 К, но только П.Л.Капица подробно исследовал и описал его. Эту «странность» в поведении гелия объяснил Л.Д.Ландау (1941) — необычность гелия в том, что жидкий гелий существует в двух формах. В области температур от 4,2 до 2,18 К (так называемая λ -точка) он ведет себя как классическая жидкость — это гелий-I. Ниже λ -точки он состоит как бы из двух жидкостей: одна ведет себя как обычная (гелий-I), другая проявляет свойства сверхтекучести — проводит теплоту без потерь, т.е. ее теплопроводность

311

равна бесконечности, не оказывает сопротивления течению, или имеет нулевую вязкость, — это гелий-II. В λ -точке происходит фазовый переход между двумя состояниями гелия. Относительное количество каждой из компонент гелия можно определить измерением силы, действующей на предмет, движущийся в жидкости. Оно зависит от температуры, и опыты показали, что при температурах ниже 1 К практически весь гелий находится в сверхтекучем состоянии.

Как же объяснить необычные свойства сверхтекучей компоненты? В случаях потерь на трение (вязкость) и сопротивление тепловому потоку движение одной части жидкости должно отличаться от движения другой, т.е. квантово-механическое состояние их должно отличаться. Энергия, потерянная одним атомом, приобретает другим, и эта передача энергии ответственна за вязкость и теплопроводность. Ландау рассматривал гелий-II как слабовозбужденную квантовую систему. Спин атома гелия-IV равен нулю, т.е. он — бозон и не подчиняется запрету Паули. Изотоп гелия-III является фермионом, подчиняется запрету Паули и приобретает сверхтекучесть только при очень низких температурах. При понижении температуры гелия энергия его атомов, естественно, уменьшается. При какой-то очень низкой температуре все они окажутся в самом низком энергетическом состоянии, но, так как запрет Паули для них не применим, будут иметь одинаковые волновые функции.

Итак, атомы сверхтекучего гелия ведут себя согласованно, как единое целое, беспорядка в этой системе нет, энтропия равна нулю. Невозможно сообщить какой-то части сверхтекучего гелия теплоту — все его атомы одинаково подвержены воздействию. Невозможен и обмен энергией между атомами — все они в самом низком состоянии, и вязкость среды равна нулю.

Явление сверхпроводимости было открыто при исследованиях в области низких температур, первоначально имевших чисто практическую направленность и приведших к многим крупным открытиям. В 1911 г. Камерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре 7,2 К сопротивление свинцового проводника внезапно снизилось в миллионы раз и практически исчезло. Затем он открыл удивительный макроэффект скачкообразного исчезновения электрического сопротивления ртути, охлажденной до температуры 4,15 К.

Это странное явление и получило название *сверхпроводимости*. В одном из экспериментов в сделанном из чистого свинца кольце был наведен ток в несколько сотен ампер. Через год оказалось, что ток все еще продолжает идти в кольце, и величина его не изменилась, т.е. сопротивление свинца было равно нулю! Этот макроэффект возникновения сверхпроводимости долгое время оставался не объясненным, но постепенно расширялся круг веществ, способ-

312

ных к нему при низких температурах. Среди них — свинец, ниобий, ванадий, алюминий, олово, титан, молибден и ряд других металлов. Сейчас известны многие элементы и сплавы, которые при низких температурах обладают сверхпроводящими свойствами. Электротехников такое открытие сначала окрылило, но надежды на создание электрических машин без сопротивления оказались преждевременными. Проблема была не только в сложности охлаждения до столь низких температур, но и в возникновении вокруг проводника с большим током сильного магнитного поля, стремящегося нарушить сверхпроводимость. Подбирали специальные сплавы, на которые бы магнитное поле не влияло. Более того, в 30-е гг. немецкие физики В. Мейснер и Р. Оксенфельд нашли, что вещество, приобретающее свойства сверхпроводимости, способно вытеснять образующееся в нем магнитное поле. Но и вытесненное магнитное поле остается помехой сверхпроводимости. Выяснилось, что состояния сверхпроводимости и магнитной проницаемости являются

взаимно исключают. Эффект Мейснера был использован в 1945 г. в знаменитом опыте Аркадьева — над чашей, изготовленной из сверхпроводящего вещества и охлажденной до температуры ниже критической, парил магнит. Он поддерживался в таком необычном состоянии, так как вытесненное магнитное поле из сверхпроводника уравновешивало вес обычного магнита.

Явления сверхпроводимости и сверхтекучести — макроскопический квантовый эффект. Братья Фриц и Гейнц Лондоны создали феноменологическую теорию сверхпроводимости. В 1950 г. английский физик Г.Фрелих разработал теорию сверхпроводимости, связав ее с электрон-фононным взаимодействием, поскольку электроны взаимодействовали через упругие колебания кристаллической решетки. При сверхнизких температурах тепловое движение в веществе практически прекращается, и под воздействием электронов возникают слабые колебания атомов. Эти колебания, похожие на звуковые волны, но имеющие квантовый характер, советский физик-теоретик И.Е.Тамм назвал *фононами*.

Таких же представлений придерживались американские физики Дж. Бардин и Дж. Шриффер. Работавший с ними физик-теоретик Л. Купер обратил внимание на то, что взаимодействие электронов проводимости с колебаниями атомов решетки превосходит силу кулоновского отталкивания и приводит к возникновению силы притяжения между ними. Поэтому электроны образуют пары, и каждая пара электронов с противоположно направленными спинами составляет так называемую «куперовскую пару», которая ведет себя как бозон. Он считал эту связь при сверхнизких температурах очень слабой и не предполагал, что она будет иметь большое значение. Результирующее притяжение между парами (энергия спаривания) очень мало, его может разрушить даже самое малое тепловое возбуждение, поэтому такие пары возникают только при очень низких температурах, почти при абсолютном нуле. Как и бозоны, эти пары при понижении температуры стремятся занять наинизшее состояние. При достижении критической температуры (для свинца 7,2 К)

313

все пары находятся в самом нижнем состоянии и имеют одну и ту же волновую функцию. Ни одна из этих пар не может изменить своего энергетического состояния, электроны движутся все вместе, как единый коллектив, не теряя энергии и не встречая сопротивления.

Современная теория сверхпроводимости

Современная теория сверхпроводимости — БКШ-теория (Дж. Бардин, Л. Купер, Дж. Шриффер) — была опубликована в 1957 г. Она представляет собой микроскопическую теорию сверхпроводимости, основанную на тех же положениях, что и теория сверхтекучести Ландау. В БКШ-теории исследованы также электро- и термодинамические свойства сверхпроводников. Некоторые аспекты теории сверхпроводимости неясны до сих пор, и исследовательские работы продолжаются.

Сверхпроводящие материалы широко используются не только при конструировании магнитов в исследовательских целях, но имеют большое практическое применение. Дело в том, что электромагниты, создающие сильные магнитные поля, оказываются дорогими из-за потерь, вызываемых сопротивлением в обмотках. Так, обычный электромагнит, создающий поле в 100 тыс. Гс, требует для поддержания поля мощность 1 МВт. Кроме того, система охлаждения, предохраняющая обмотки от перегрева, потребляет тысячи литров воды в минуту. Использование обмоток из сверхпроводящих материалов, работающих при сверхнизких температурах, снимает эти проблемы. Затраты требуются только для создания таких температур и запуска магнита в работу, а дальше он продолжает работать уже без джоулевых потерь. Применяются и специальные сплавы металлов для обмоток магнитов, особенно широко используется соединение Nb_3Sn , позволяющее получать поля до 88 кГс. Подбирают и другие перспективные соединения. Если бы удалось уменьшить потери в линиях электропередач, то выигрыш был бы просто огромен. Ожидается, что в недалеком будущем на смену громоздким мачтам электропередач придут подземные электропроводящие линии.

В 1988 г. была достигнута максимальная критическая температура сверхпроводимости на уровне 125 К, при котором достигается сверхпроводимость уже без помощи охлаждения дорогостоящим жидким гелием, а при использовании существенно более дешевого жидкого азота.

8.7. Возникновение самоорганизации в неравновесных системах. Понятие обратных связей

Суммарное уменьшение энтропии в открытых системах при определенных условиях за счет обмена потоками с внешней средой может превысить ее внутреннее производство. Появляется неустойчивость предшествующего неупорядоченного однородного состояния, возникают и могут возрасти до макроскопического уровня крупномасштабные флуктуации. Из хаоса

314

са могут возникнуть структуры, которые начнут переходить во все более упорядоченные. Эти структуры образуются за счет внутренней перестройки системы, поэтому это явление получило название *самоорганизации*. При этом энтропия, отнесенная к тому же значению энергии, убывает. Пригожин назвал упорядоченные образования, возникающие в диссипативных системах в ходе неравновесных необратимых процессов, *диссипативными структурами* (от лат. *dissipatio* — разгонять, рассеивать). Считается, что эти структуры летучие и возникают при рассеянии свободной энергии в неустойчивых **открытых системах**.

Состояние текущего **равновесия** в системе должно поддерживаться извне массой и энергией, компенсирующими потери на диссипацию. Такие системы называют открытыми. Для описания процессов самоорганизации уже нельзя использовать представления линейной термодинамики необратимых процессов, так как структуры формируются вдали от равновесия. Под действием крупномасштабных флуктуаций появляются коллективные формы движения, называемые *модами*, между которыми возникает конкуренция, происходит отбор наиболее устойчивых из них, что и приводит к спонтанному возникновению макроскопических структур. Таким системам нельзя навязать пути развития, обычно они имеют несколько возможностей развития. В точке бифуркации и происходит выбор пути, в качестве создающего начала здесь выступает хаос. При этом «спусковым крючком» может быть мельчайшее возмущение, флуктуация, тогда как выбор пути определяет макроскопические результаты. Процессы самоорганизации описываются нелинейными уравнениями для макроскопических функций. Брюссельская школа, возглавляемая Пригожиным, исследовала способность открытых систем к самоорганизации и выделила неравновесность в качестве основного источника упорядоченности.

Роль коллективного-поведения подсистем, образующих систему, подчеркивал немецкий физик Г.Хакен, и потому ввел для процессов самоорганизации название *синергетика* (от греч. *synergetike* — **сотрудничество, совместное действие**).

Самоорганизация — спонтанное образование высокоупорядоченных структур из зародышей или даже из хаоса, спонтанный переход от неупорядоченного состояния к упорядоченному за счет совместного, кооперативного (синхронного) действия многих подсистем. Хаотическое состояние содержит в себе неопределенность — вероятность и случайность, которые описываются при помощи понятий «информация» и «энтропия». После изучения случайности Хакен рассмотрел необходимости и получил детерминированные уравнения движения. При этом главными оказываются выбор равновесных мод и исследование их устойчивости. Случайное событие вызывает неустойчивость,

315

а это — толчок для возникновения новых конфигураций (мод). Зародышем самоорганизации служит «вероятность»; упорядоченность возникает через флуктуации, устойчивость через неустойчивость. В предисловии к своей книге «Синергетика» Хакен пишет: «Я назвал новую дисциплину «синергетикой» не только потому, что в ней исследуется совместное действие многих элементов систем, но и потому, что для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизацией, необходимо кооперирование многих различных дисциплин».

В синергетике сформулированы принципы самодвижения в неживой природе и создания сложных систем из простых. Тем самым в физику проник эволюционный подход, случайность вышла на макроскопический уровень. Синергетика привела к новому пониманию эволюции.

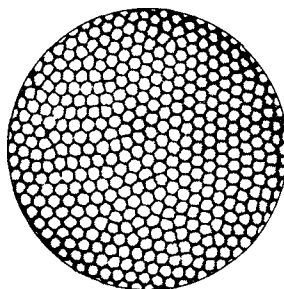
В **открытых системах** можно менять потоки энергии и вещества, т.е. регулировать образование диссипативных структур. При неравновесных процессах, начиная с какого-то критического для данной системы значения внешнего потока, из неупорядоченных и хаотических состояний за счет потери их устойчивости могут возникнуть упорядоченные состояния. Упорядоченность может быть временная, пространственная и пространственно-временная. Чтобы не вдаваться в общую теорию таких систем, обратимся к примерам из разных областей естествознания.

В 1900 г. появилась статья Х.Бенара с фотографией возникшей структуры, напоминающей пчелиные соты (рис. 8.5). Бенар наблюдал ее в ртути, налитой в широкий плоский сосуд, подогреваемый снизу. Слой ртути (или другой вязкой жидкости) после того, как градиент температуры ΔT достиг некоего критического значения, распадался на одинаковые шестигранные призмы с определенным соотношением между стороной и высотой. В центральной части такой призмы жидкость поднималась вверх, а по

граням — опускалась. По поверхности жидкость растекалась от центра к краям, а в придонном слое — к центру. Эти устойчивые структуры названы *ячейками Бенара*.

Температурный градиент ΔT в данном случае называют инверсным, так как жидкость у нижней поверхности из-за теплового расширения имеет меньшую плотность, чем вблизи верхней. Из-за силы тяжести и выталкивающей архимедовой силы система оказывается неустойчивой, слои «хотят» поменяться местами. При меньшей разнице температур между поверхностями из-за вязкос-

Рис. 8.5. Ячеистая структура жидкости при неустойчивости в ячейке Бенара



316

ти движения жидкости не возникало, теплота распространялась лишь путем теплопроводности, но начиная с некоторого значения *АТ* обмен ускорился, так как возник конвекционный поток. Флуктуации сначала из-за вязкого трения затухали, в сверхкритической области вдруг резко выросли, достигая макроскопических масштабов. Для устойчивости потоков жидкости необходимо регулировать подогрев, и он происходит самосогласованно. Возникает структура, обеспечивающая максимальную скорость тепловых потоков, и ее внутренняя структура (или самоорганизация) поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии, или *негэнтропии*.

Наиболее важны среди сложных систем **системы с обратной связью**. Система определенным образом реагирует на внешнее воздействие: может его усилить — *положительная обратная связь*, может свести его к нулю — *гомеопатическая обратная связь*, а может ослабить его — *отрицательная обратная связь*. Отрицательная обратная связь способствует восстановлению равновесия в системе при его нарушении внешним воздействием, положительная — вызывает еще большее отклонение, чем то, которое было бы при отсутствии обратной связи.

Механизм обратной связи сам меняет систему. Если он повышает степень организованности системы, говорят о самоорганизованности. Поведение системы может быть случайным или целесообразным. Последним обладают системы с отрицательной обратной связью. Для обозначения машин с внутренне целесообразной реакцией на внешнее воздействие создатель кибернетики Н.Винер ввел термин «севромеханизмы».

Обратная связь является одним из основных понятий **кибернетики** — науки об управлении сложными системами с обратной связью. Ее рождение связывают с появлением в 1948 г. книги Н.Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине», хотя некоторые идеи появлялись и раньше. В ее основе лежит идея возможности использовать общий подход к рассмотрению процессов управления в системах различной природы. Системы изучаются по реакциям на внешние воздействия, поэтому кибернетики ввели новый функциональный подход («сигнал — отклик») и новое фундаментальное понятие «информация».

Информация — мера разнообразия систем, увеличивающаяся с ростом разнообразия в системе. С ней связан один из основных законов кибернетики — закон необходимого разнообразия: эффективное управление системой возможно только тогда, когда разнообразие управляющей системы больше разнообразия управляемой. Это значит, что чем больше имеется информации о системе, тем эффективнее процесс управления ею. Это понятие характеризовало меру организованности системы в противовес энтропии как меры неорганизованности. Кибернетика ис-

317

следует зависимости между характеристиками системы и информацией, понижение энтропии означает рост информации. В системах управления решаются задачи разных типов: стабилизации, выполнения программы, слежения и оптимизации. В кибернетике рассматриваются цели и способы управления, системы во взаимодействии друг с другом, в движении и развитии. В этой науке отвлекаются от конкретных особенностей изучаемых систем, выделяя закономерности, общие для некоторого класса систем. Составляющие этой абстрактной кибернетической системы описываются в терминах абстрактных элементов.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Какая часть термодинамической системы называется фазой данного вещества? Объясните понятия «фазовое равновесие», «перегретая жидкость». Дайте молекулярную картину процессов испарения и конденсации, сублимации и десублимации. Что такое насыщенный пар и каковы его свойства? Опишите роль этих процессов в земной атмосфере.

2. Поясните явление катализа и его использование. Какова роль радиационной химии в генетике?

3. Дайте понятие о свободных радикалах и цепных реакциях. Приведите примеры.

4. Как развивалось учение о химических процессах? Как можно ускорить или замедлить ход реакции и каково промышленное значение этого? Дайте представление о химической кинетике.

5. Назовите методы управления химическими процессами. Как можно сместить химическое равновесие и направление реакции? Как происходят процессы переноса веществ?

6. Каковы особенности явлений при сверхнизких температурах? Опишите явления сверхтекучести и сверхпроводимости.

7. Поясните процессы, происходящие в расплавах и растворах. Почему при растворении обычно температура понижается? Каковы особенности растворения в воде? Какую роль играют гидрофильные и гидрофобные процессы в живых организмах?

8. Как ведут себя макросистемы вдали от равновесия? Поясните принцип локального равновесия.

В чем заключается явление самоорганизации?

9. Расскажите о простых, сложных, устойчивых, неустойчивых, изолированных и открытых системах, об обратимых и необратимых процессах. Приведите примеры обратных связей.

10. Опишите условия появления диссипативных структур в открытых системах. Приведите примеры.

Глава 9. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАРОЖДЕНИЯ СТРУКТУР В МИРЕ ЗВЕЗД

9.1. Строение типичной звезды. Источники энергии Солнца и звезд

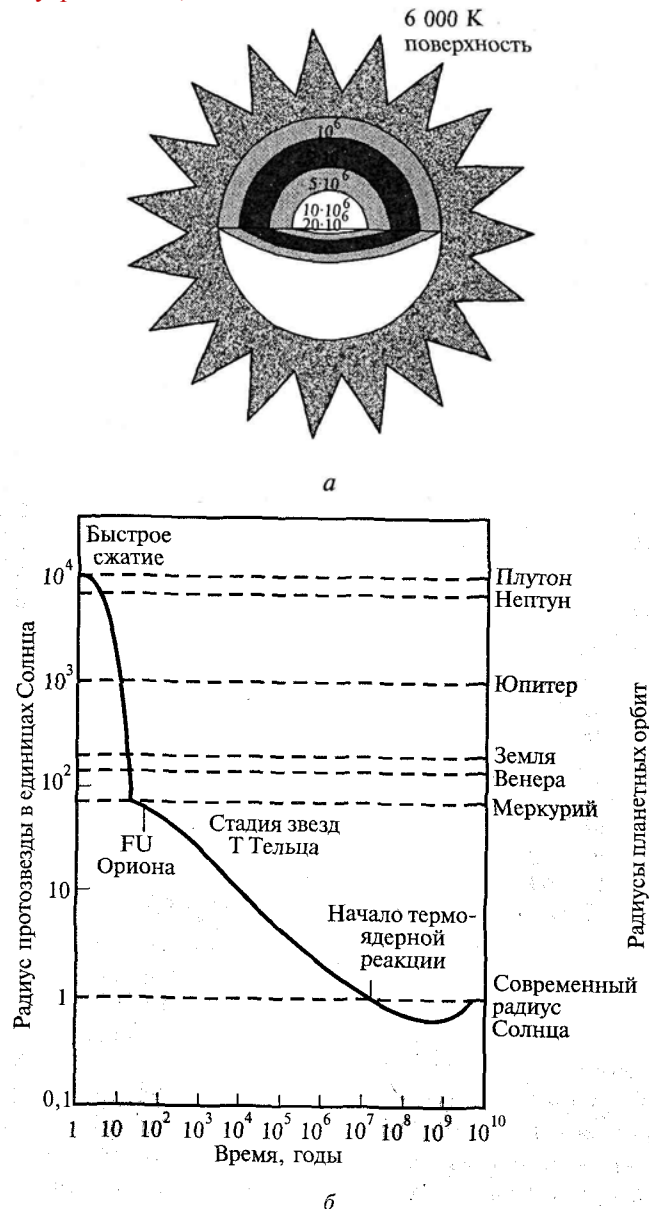
Солнце — рядовая звезда нашей Галактики, горячий шар из плазмы. Его когда-то считали твердым шаром и даже пригодным для жизни. Радиус Солнца 6 966 000 км, масса $1,99 \cdot 10^{30}$ кг, средняя плотность $1,41 \text{ кг/м}^3$. Его возраст оценивается в 4,6 млрд лет, как и у всех тел Солнечной системы. Для Земли Солнце — ближайшая звезда, источник жизни. Среднее расстояние от Земли до Солнца 149,6 млн км или 1 а.е. Земля вращается, как и другие планеты, по эллиптической орбите, ее расстояние зимой меньше на 2,5 млн км, а в июле — на столько же больше. Мощность, излучаемая Солнцем, составляет $3,86 \cdot 10^{40}$ Дж/с, или $3,86 \cdot 10^{20}$ МВт, из которой до Земли доходит только одна двухмиллиардная часть. Эффективная температура поверхности Солнца равна 5806 К, оно относится к спектральному классу желтых карликов.

Современная структура Солнца возникла в результате эволюции (рис. 9.1, а, б). Наблюдаемые слои Солнца называют его атмосферой. *Фотосфера* — самая глубокая ее часть, и чем глубже, тем слои горячее. В тонком (порядка 700 км) слое фотосферы возникает наблюдаемое излучение Солнца. Во внешних, более холодных слоях фотосферы свет частично поглощается — на фоне непрерывного спектра образуются темные *фраунгоферовы* линии. В телескоп можно наблюдать зернистость фотосферы. Маленькие светлые пятнышки — *гранулы* (размером до 900 км) — окружены темными промежутками. Эта происходящая во внутренних областях конвекция вызывает движения в фотосфере — в гранулах горячий газ вырывается наружу, а между ними — опускается. Эти движения распространяются и в более высокие слои атмосферы Солнца — *хромосферу* и *корону*. Поэтому они горячее, чем верхняя часть фотосферы (4500 К). Хромосферу можно наблюдать во время затмений. Видны *спиккулы* — язычки уплотненного газа. Изучение спектров хромосферы показывает ее неоднородность, перемешивание газа происходит интенсивно, и температура хромосферы достигает 10 000 К. Над хромосферой располагается самая разреженная часть солнечной атмосферы — корона, она все время колеблется с периодом 5 мин. Плотность и давление быстро нарастают внутрь, где газ сильно сжат. Давление превышает сотни миллиардов атмосфер (10^{16} Па), а плот-

319

Рис. 9.1. Схема внутреннего строения Солнца с распределением температур внутри него:

a — определение температур внутри Солнца; *б* — эволюция Солнца



320

ность до $1,5 \cdot 10^5$ кг/м³. Температура тоже сильно возрастает, достигая 15 млн К.

Магнитные поля играют на Солнце существенную роль

Магнитные поля играют на Солнце существенную роль, так как газ находится в состоянии плазмы. При росте напряженности поля во всех слоях его атмосферы возрастает солнечная активность, проявляющаяся во вспышках, которых в годы максимума бывает до 10 в сутки. Вспышки размером около 1000 км и продолжительностью порядка 10 мин обычно возникают в нейтральных областях между пятнами, имеющими противоположную полярность. Во время вспышки выделяется энергия, равная энергии взрыва 1 млн мегатонных водородных бомб. Излучение в это время наблюдается и в радиодиапазоне, и в рентгеновском. Появляются энергичные частицы — протоны, электроны и другие ядра, составляющие *солнечные космические лучи*.

Солнечные пятна перемещаются по диску; заметив это, Галилей заключил, что оно вращается вокруг своей оси. Наблюдения за пятнами показали, что Солнце вращается слоями: около экватора период около 25 сут, а у полюсов — 33 сут. Число пятен на Солнце колеблется в течение 11 лет от наибольшего к наименьшему. За меру этой пятнообразующей деятельности принимают так называемые числа Вольфа: $W = 10g + f$, здесь g — число групп пятен, f — общее число пятен на диске. При отсутствии пятен $W = 0$, при одном пятне — $W = 11$. В среднем пятно живет почти месяц. Размеры пятен порядка сотен километров. Пятна обычно сопровождаются группой светлых полосок — факелов. Оказалось, что в области пятен наблюдаются сильные магнитные поля (до 4000 эрстед). Видимые на диске волокна названы *протуберанцами*. Это массы более плотного и холодного газа, поднимающиеся над хромосферой на сотни и даже тысячи километров.

В видимой области спектра Солнце абсолютно доминирует на Земле над всеми другими небесными

светилами, его блеск в 10^{10} раз больше, чем у Сириуса. В других диапазонах спектра оно выглядит существенно скромнее. От Солнца исходит радиоизлучение, по мощности одинаковое с радиоисточником Кассиопея А; на небе всего 10 источников слабее его в 10 раз. Оно было замечено только в 1940 г. военными радиолокационными станциями. Анализ показывает, что коротковолновое радиоизлучение возникает вблизи фотосферы, а на метровых волнах генерируется в солнечной короне. Аналогичная картина по мощности излучения наблюдается и в рентгеновском диапазоне — лишь у шести источников оно слабее на порядок. Первые рентгеновские снимки Солнца были получены в 1948 г. с помощью аппаратуры, находящейся на высотной ракете. Установлено, что источники связаны с активными областями на Солнце и расположены на высотах 10—1 000 000 км над фотосферой, в них температура достигает 3 — 6 млн К. Рентгеновская вспышка обычно следует за оптичес-

321

кой с запаздыванием в 2 мин. Рентгеновское излучение исходит от верхних слоев хромосферы и короны. Кроме того, Солнце излучает потоки частиц — *корпускул*. Солнечные корпускулярные потоки оказывают большое воздействие на верхние слои атмосферы нашей планеты.

Первый прибор для выяснения природы и строения звезд — полярископ, сконструированный Д. Араго после открытия хроматической поляризации света, появился в 1811 г. Араго обнаружил, что фотосфера Солнца состоит из нагретого до высокой температуры самосветящегося газа, о чем высказывал догадки еще Ломоносов. С этого времени ученые начали изучать и корону, которая была видна в периоды полных солнечных затмений. В 1860 г. английский астроном У.Хеггинс, сравнивая спектры Солнца, звезд и разных веществ, установил, что спектры Солнца и звезд идентичны. Через несколько лет итальянский ученый А.Секки, изучив спектры почти 4000 звезд, подтвердил этот вывод. Французский астроном П.Ж.Жансен, первым начавший изучать атмосферы планет, выяснил, что в состав Солнца входят многие элементы, которые встречаются на Земле. В 1869 г. английский астроном Дж. Н. Локьер обнаружил там неизвестный на Земле элемент, названный гелием. Он же установил существование 11-летнего цикла солнечной активности и предположил, что входящие в состав звезд элементы могут разлагаться под действием высоких температур. Локьер выделил этапы распада элементов, о каждом из которых можно судить по спектру, но позже установили, что изменение спектра определяется изменением температуры. В то же время Локьер и Жансен предложили (независимо друг от друга) новый метод наблюдения протуберанцев и хромосферы Солнца, позволяющий не дожидаться времени затмения.

Потенциальную энергию сжатия Гельмгольц считал источником энергии звезды. Температура даже внешних слоев Солнца порядка 6000 К, т.е. вещество находится там в газообразном состоянии. Движение частиц газа — основа тепловой энергии звезды, гравитационное притяжение частиц — основа ее потенциальной энергии. Чтобы компенсировать потери энергии на излучение, достаточно, чтобы диаметр Солнца уменьшался на 75 м в год. Тогда светимость Солнца удваивалась бы каждые 10 млн лет, но этого не происходит. Эти расчеты и оценка роли гравитационного сжатия оказались не бесполезными в дальнейшем.

Термоядерными реакциями синтеза гелия из водорода объяснил энергию звезд английский астрофизик Эддингтон (1920), известный своими работами по теории гравитации и квантовой теории, обнаруживший экспериментально отклонение света звезды в поле тяготения Солнца (1919), предсказанное ОТО. В книге «Звезды и атомы» (1927) он показал, что масса ядра гелия не точно в четыре раза превышает массу ядра водорода, а несколько меньше. Если к незначительной разнице масс применить формулу Эйнштейна $E = mc^2$, то окажется, что этот дефект массы эквивалентен огромной энергии. Тогда выводы Эддингтона вызвали сомнения среди ученых.

322

Рис. 9.2. Схема синтеза гелия из атомов водорода



Реакция синтеза ядер гелия из водорода возможна при условиях, реализуемых в центральной части Солнца, где температура составляет 10—13 млн К. Атомы теряют свои электронные оболочки, но этого недостаточно для преодоления силы кулоновского отталкивания между ядрами. Протон предохранен от взаимодействия с другим протоном потенциальным барьером в $2,24 \cdot 10^{-14}$ Дж (140 кэВ). Тепловая энергия протона при $T \approx 10^6$ К составляет всего 1 кэВ, а суммарная энергия сталкивающихся протонов вдвое больше, т.е. барьер превышает в 100 раз среднюю энергию частиц. Необходимо сближение частиц на расстояние, меньшее 10^{-15} м. С точки зрения классической механики, этот барьер непреодолим, но в законах квантовой механики существует вероятность преодоления — так называемый туннельный эффект. Протон должен успеть столкнуться с другим протоном, преодолеть барьер, окружающий его ядро, превратиться в нейтрон, и произойдет рождение тяжелого водорода — дейтерия (рис. 9.2). Так начнется термоядерная реакция, являющаяся, по современным представлениям, источником энергии звезд. При условиях, типичных для недр звезд типа Солнца, возможны реакции двух типов.

Протон-протонный цикл ядерных реакций разработал американский физик-теоретик Г. Бете (1939). Ядро тяжелого водорода — дейтерия, соединяясь сначала с протоном, образует ядро изотопа гелия. Последняя реакция этого цикла состоит в слиянии ядер легкого гелия и освобождении двух протонов. Этот цикл обеспечивает выход энергии $3,16 \cdot 10^{-12}$ Дж (19,78 МэВ) и может идти при температурах порядка 13 млн К. Расчет показывает, что для обеспечения наблюдаемой светимости Солнца достаточно, чтобы выделение энергии происходило лишь в 0,1 части массы Солнца. На Солнце это самый эффективный цикл.

Азотно-углеродный цикл состоит из шести реакций. Этот цикл типичен для более тяжелых звезд, он требует температур порядка

323

20 млн К. Углерод играет в нем роль катализатора реакций, т. е. его количество остается неизменным. Реакции этого цикла тоже происходят на Солнце, но идут медленно. Два протона не образуют связанной системы (нет изотопа He^2). При столкновении один из протонов превращается в нейтрон с излучением позитрона и нейтрино.

Количество освобожденной энергии оценивалось по формуле Эйнштейна. Дефект массы для слияния четырех протонов и образования ядра атома гелия (α -частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов) составляет 0,02863 а. е. Соответствующая ему энергия излучается, что дает энергию $E = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж. Поскольку Солнце излучает энергию $L = 3,86 \cdot 10^{26}$ Дж/с, то из отношения L/E , примерно равного 10^{38} , можно

заклучить, что в недрах Солнца за 1 с образуется около 10^{38} ядер гелия. Но тогда должно образовываться вдвое больше нейтрино.

Обнаружение нейтрино подтвердило бы осуществимость таких реакций на Солнце. Оценки показывают, что длина пробега нейтрино порядка 10^{15} м. Это в сотни раз превышает размеры всей Солнечной системы, а на расстоянии 150 млн км от Земли до Солнца поток нейтрино должен бы составлять 65 млрд на 1 см^2 в 1 с.

Для регистрации нейтрино предложено много методов, строятся специальные установки, но точных результатов по их обнаружению пока нет. То, что нейтрино не удавалось уловить, создало проблему «солнечного кризиса». Выход был найден в резком перемешивании солнечного вещества, которое происходит периодически. Дело в том, что центральные части Солнца должны вращаться быстрее, чем поверхностные. Поэтому в область, где происходят термоядерные реакции, втягиваются слои плазмы с повышенным содержанием изотопа He^3 , что расширяет область реакции и замедляет ее ход. Накопление вращательного момента, вызывающего эти процессы, продолжается 10 млн лет. Потом происходит передача избытка его центральным областям звезды, и все повторяется. При перемешивании светимость уменьшается, поток нейтрино ослабевает. Возможно, с этим связаны причины оледенений на Земле.

Внутренние области Солнца, где должны происходить термоядерные реакции, изучал Эддингтон и строил их модели. Он считал, что звезды — это шары из плазмы, находящиеся в состоянии лучистого равновесия. Эддингтон определил «время жизни» Солнца, температуру его недр, вычислил предельные массы звезд, обеспечивающие их устойчивость (см. рис. 9.1, а). В 1924 г. он установил связь между массой и светимостью звезд, подсчитал, что силу тяготения должна уравнивать направленная наружу сила, которая могла возникнуть благодаря стремлению газа расширяться под действием высокой температуры. Исходя из значений массы Солнца и его размеров Эддингтон получил значение температуры в центре газового шара 15 млн К.

324

Активная область, где идут термоядерные реакции, занимает центральную шаровую зону с радиусом 230 тыс. км. Ее окружает зона лучистого переноса энергии радиусом 280 тыс. км с $T \approx 5$ млн К, в которой не могут происходить термоядерные реакции: атомы здесь не полностью ионизованы, поглощение γ -излучения переводит какие-то их электроны на более высокие орбиты, а возвращаются они уже в несколько ступеней, т.е. испускаются кванты меньших энергий. Зону лучистого переноса окружает зона конвекции, в которой энергия переносится к поверхности путем конвекционного движения солнечной плазмы. Скорости конвекционных движений невелики, порядка 100 — 500 м/с, но эти «подфотосферные» слои порождают солнечную активность.

Теория зоны конвекции описывает не только состояние вещества, но и строение звезд на ранних этапах их эволюции (до выхода на Главную последовательность), и строение ядер массивных звезд. В зоне конвекции дробление квантов резко ослабевает и лишь малая часть энергии уходит в инфракрасной и радиочастотной областях спектра. Конвекционная зона — источник энергии, обеспечивающий нагревание солнечной короны и хромосферы. КПД переноса энергии в солнечную корону всего 0,01. Газ короны непрерывно истекает в межпланетное пространство, где дует сильный солнечный ветер, сметающий микрометеорные частицы и испаряющиеся из атмосфер планет газы, формирует планетные хвосты. На расстоянии земной орбиты скорость солнечного ветра составляет около 400 км/с, а Солнце теряет 0,01 своей массы за 5 млрд лет (или 4,3 млн т за 1 с).

У голубых звезд и белых гигантов, и сверхгигантов радиус активной зоны составляет 0,2 радиуса звезды, конвекционная зона практически отсутствует, а весь остальной объем занимает зона лучистого переноса энергии. Красные гиганты имеют очень малое, радиусом до 0,001 радиуса звезды, изотермическое ядро, полностью состоящее из гелия, образовавшегося в прошлом из водорода. Поэтому термоядерные реакции идут уже не в ядре, а рядом с ним. Зона переноса излучения имеет небольшую относительную протяженность, а конвекционная зона занимает почти весь огромный объем этих звезд.

9.2. Звезды, их характеристики и эволюция

Звезды — это основные тела Вселенной, в них сосредоточено более 90 % наблюдаемого вещества. Солнце — одна из звезд, но для нас Солнце определяет всю жизнь; другие звезды представляются светящимися точками на небосводе, так как очень далеки от нас. Отдельные группы звезд — созвездия — выделяли еще в древности, в их названиях отражены образ мысли, предания, леген-

325

ды и жизнь разных народов. Сейчас на звездном небе выделено 88 созвездий с четко обозначенными границами, 60 из них видны с территории нашей страны. В каждом созвездии звезды обозначаются по мере уменьшения яркости буквами греческого алфавита. Некоторые яркие звезды имеют свои собственные названия, которые чаще всего достались им от греческих (Сириус), латинских (Регул) или арабских (Альтаир) астрономов. В течение суток звезды делают полный круг по небу и центр этого круга (полюс мира) находится в том же направлении, в котором днем отбрасывается самая короткая тень (время истинного полудня). Постепенно люди научились **ориентироваться** (от лат. «*ориенс*» — **восток**) и по звездам. В ритме со сменой

времен года изменяется вид звездного неба и наибольшая высота Солнца в полдень. Созвездия, видимые над горизонтом вечером на западе, примерно через 2,5 месяца уже появляются утром на востоке. Значит, Солнце движется справа налево среди звезд, его путь называют *эклиптикой*. Созвездия служат фоном, на котором изучаются и описываются положения перемещающихся по небу тел. Созвездия, по которым проходит годовой путь Солнца, относят к *полюсу Зодиака*. В древности в него входили 12 созвездий, отсюда деление года на 12 месяцев, так как Солнце проходит участок каждого из них за месяц, т. е. по 30 градусов дуги. Сейчас путь Солнца проходит через 13 созвездий (стало «заходить» в созвездие Змееносца).

Звездные величины, введенные в древности, обозначают буквой *m*. Все видимые звезды еще во 2 в. до н. э. астроном Гиппарх разделил по яркости: переход от одной звездной величины к другой глаз ощущает одинаковым перепадом блеска. У самых ярких звезд $m = 1$, у самых слабых — 6. В безлунную ночь невооруженным глазом можно видеть почти 3000 звезд (до 6-й звездной величины), в телескоп — почти 350 тыс. звезд (до 10-й величины), 32 млн — до 15-й и 1 млрд — до 20-й. Так как воспринимаются лишь относительные изменения яркости, эти значения связаны со свойствами глаза. Диапазон в 5 звездных величин соответствует отношениям их блеска в 100 раз. Поэтому отношение блеска одной звезды к блеску другой, отличающееся на одну величину, соответствует $(100)^{1/5} = 2,512$. Эта величина $m = m_0 - 2,5 \lg E$, где *E* — освещенность (световой поток, падающий на единичную площадку поверхности), $m_0 = -13^m,89$ — звездная величина, соответствующая 1 лк. И отношение освещенностей звезд равно 2,5 в степени разности их звездных величин, т.е. $m_2 - m_1 = -2,5 \lg(E_2/E_1)$. Для Солнца $m_{\text{С}} = -26^m,58$, для полной Луны $m_{\text{Л}} = -12^m,7$, поэтому из приведенной формулы можно заключить, что при одинаковой высоте над горизонтом полная Луна освещает земную поверхность в 465 000 раз слабее Солнца. Сириус ярче Полярной звезды, имеющей звездную величину +2, в 25 раз, что соответствует разности звездных величин 3,5. Поэтому звездная величина Сири-

уса (+2 - 3,5) = -1,5, а Солнце посылает энергии в 10^{10} раз больше, чем Сириус. Здесь учтено, что освещенности, созданные одним источником на разных расстояниях, обратно пропорциональны квадратам этих расстояний.

Звезды — газовые шары, они светят собственным светом (в отличие от планет). По физическим характеристикам звезды делят на *нормальные звезды*, *белые карлики* и *нейтронные звезды*. Размеры большинства звезд различны, диаметры — от 10 до 10^7 км, Солнца — 1,4 млн км. Белые карлики и нейтронные звезды имеют диаметр всего 10 — 20 км, есть гиганты — Бетельгейзе, Арктур, а самые большие, красные гиганты, больше Солнца настолько, что, оказавшись на его месте, заняли бы объем, включающий орбиту Юпитера. Плотность вещества гигантов и сверхгигантов меньше плотности воздуха в атмосфере Земли, солнечного — больше плотности воды в 1,5 раза, у белого карлика (звезды Сириус В) — порядка 2 т/см^3 , а у нейтронных звезд — 10^{14} кг/м^3 , порядка плотности атомного ядра.

Светимость звезды

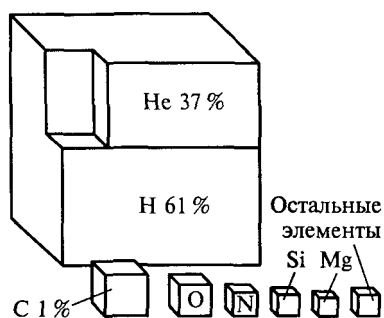
Светимость звезды — это мощность оптического излучения. Чаще всего светимости звезд выражают в светимостях Солнца, которое излучает $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт. Диапазон светимостей наблюдаемых звезд огромен — от 10^{-3} до 10^6 светимостей Солнца. Для нас Солнце много ярче других звезд, но это не означает, что оно излучает больше энергии, чем они. Для исключения влияния расстояния ввели понятие абсолютной звездной величины, которую имела бы звезда, находящаяся от нас на расстоянии 10 пк. Абсолютная звездная величина *M* связана с видимой величиной *m* соотношением, которое является одним из основных в звездной астрономии: $M = m + 5 - 5 \lg r$. Величина *m* - *M* называется *модулем расстояния*. Для Солнца абсолютная звездная величина $M_{\text{С}}$ равна $+4^m,72$, т.е. существенно меньше, чем видимая, как для всех звезд, которые находятся на расстоянии ближе 10 пк.

Расстояния до звезд, как уже указывалось, измеряют методом параллакса (см. рис. 2.2). Здесь единицами длин служат парсек и световой год. 1 пк соответствует годичному параллаксу в 1", т.е. с этого расстояния 1 а. е. видна под углом 1". Отсюда следует, что в 1 пк столько астрономических единиц, сколько угловых секунд в радиане, т. е. 1 пк = 206 265 а. е. Естественно, что наибольший годичный параллакс $\pi = (0'',76)$ имеет ближайшая к нам звезда — Проксима Центавра. Поскольку расстояние $r = a/\sin \pi$, $r = (206\,265''/0'',76)$ $a = 272\,000$ а, т.е. самая близкая к нам звезда находится на расстоянии, в 272 000 раз большем, чем Солнце. Световой год есть расстояние, которое проходит свет в течение года, т.е. $365,25 \times 86400 \cdot 3 \cdot 10^8 = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} = 63\,100 \text{ а. е.}$ Но 1 пк = 206265 а. е., и потому 1 пк = 3,26 св. г.

В XIX в. звезды рассортировали по размерам и массам, а затем — по спектрам.

327

Рис. 9.3. Схема распространённости химических элементов во Вселенной



Спектральные классы ввел в 1900 г. американский астроном Э.Пикеринг, обозначив их буквами латинского алфавита.

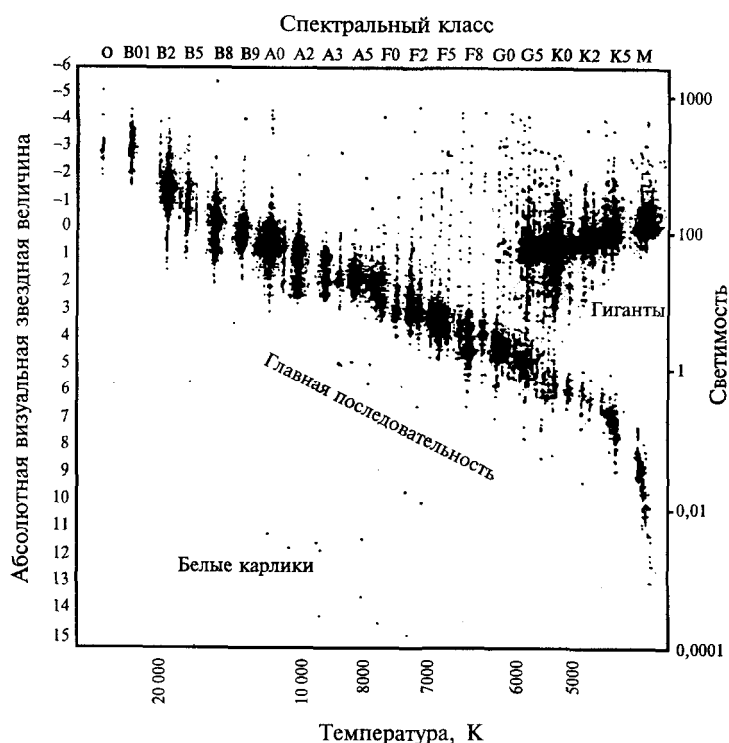
Спектральные классы ввел в 1900 г. американский астроном Э.Пикеринг, обозначив их буквами латинского алфавита. Границы между классами были нечеткие, и впоследствии каждый класс разбили на группы от 0 до 9, и наше Солнце попало по спектру в группу **G2**. Когда при истолковании спектров начали учитывать ионизацию, стало возможным по спектральным сериям определять температуру звезд. Состав звезд не отличается разнообразием: как и Солнце, большинство звезд состоит преимущественно из водорода и гелия. Тогда спектральные классы выстроили в порядке убывания температуры: **O, B, A, F, G, K, M**. Имеются еще четыре дополнительных класса: для холодных звезд — **R, N, S**, для горячих — **W**. Очевидно, что без классификации звезд нельзя говорить об их эволюции.

Химический состав звезд определяют по спектрам. Данные относятся к поверхностным слоям звезд, поскольку они непрозрачны. Оказалось, что 98 % звездного вещества — это водород и гелий, причем обычно водорода по массе в 2,7 раза больше (рис. 9.3). Строение звезды и источник ее энергии казались в какой-то степени выясненными, но возникли другие, не менее важные вопросы. Солнце, возраст которого оценивают в 5 млрд лет, бедно водородом и богато гелием, хотя за это время оно должно было истратить меньше водорода и образовать меньше гелия. Может быть, раньше оно было горячее и процессы шли скорее, но, по геологическим данным, количество солнечной энергии практически не менялось. Если бы водород уже в большей части выгорел, то в самом центре этой звезды могли начаться ядерные реакции и стали образовываться более тяжелые элементы. На Солнце и других звездах много элементов, более сложных, чем гелий. Получается — и они из самого центра Солнца?! Это противоречит гипотезе происхождения их из туманности, стало быть, тяжелые элементы должны появиться как-то иначе.

Диаграмму зависимости светимостей звезд от их спектральных классов (температур) составили голландец Эйнар Герцшпрунг и американец Генри Норрис Ресселл, она названа именами обоих (рис. 9.4). По оси абсцисс расположены спектральные классы звезд (показатели цвета или температуры), по оси ординат — светимости звезд **L** (или звездные величины **M**). Звезды по светимости разделены на семь классов, обозначенных римскими цифрами. Класс светимости пишется после спектрального клас-

328

Рис. 9.4. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела (спектр — светимость)



са звезды: так, Солнце — звезда класса G2V. На диаграмме звезды располагаются не беспорядочно, а образуют несколько последовательностей.

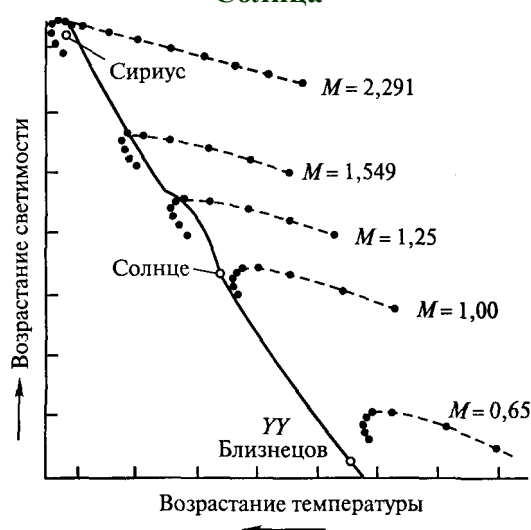
Главная последовательность

Главная последовательность — узкая полоса звезд, протянувшаяся из верхнего левого угла вниз. Так, в окрестности Солнца большинство звезд сконцентрированы вдоль нее. В правом верхнем углу — сверхгиганты. Размеры звезд сумели оценить с помощью изобретенного в 1881 г. интерферометра, который улавливал разницу в длинах световых волн, исходящих от разных точек поверхности звезды. Оказалось, что вблизи Солнца на одного сверхгиганта приходится около 1000 гигантов и около 10 млн звезд Главной последовательности.

Группа звезд-гигантов компактна и расположена вверху диаграммы между Главной последовательностью и группой сверхгигантов. Параллельно Главной последовательности, несколько ниже ее, расположены звезды, образующие *последовательность субкарликов* (у них содержание металлов гораздо ниже, чем у звезд Главной последовательности), в левом нижнем углу диаграммы — группа белых карликов, светимость которых меньше солнечной в сотни раз.

329

Рис. 9.5. Схема возможного эволюционного трека звезды с массой, несколько большей массы Солнца



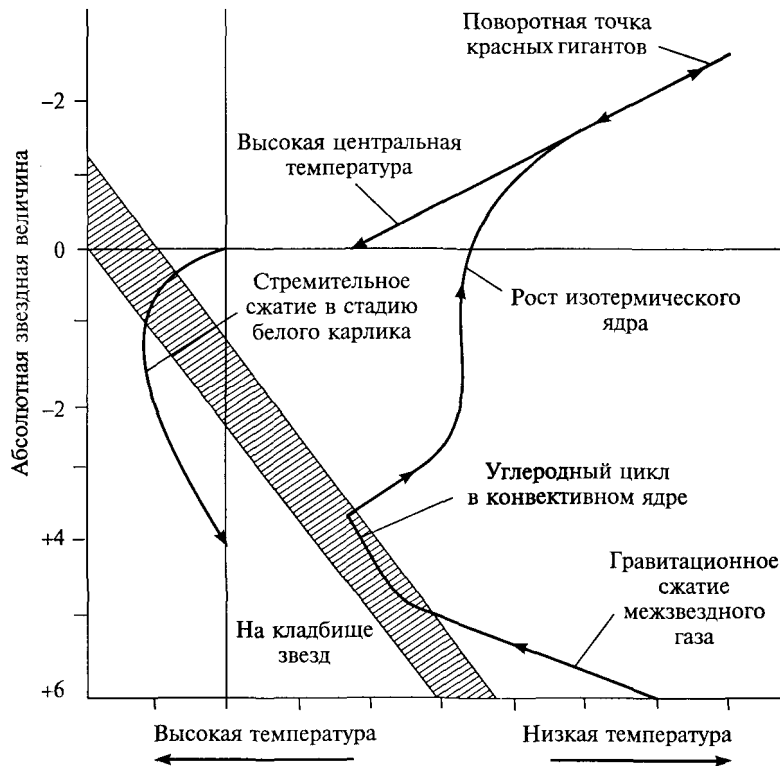
Масса звезды

Масса звезды приобрела значимость, когда были открыты источники энергии звезд. Масса Солнца $M_C = 2 \cdot 10^{30}$ кг, а массы почти всех звезд лежат в пределах 0,1 — 50 массы Солнца. Практически наиболее верным способом определения массы звезды являются исследования движений двойных звезд. Оказалось, что положение звезды на Главной последовательности определяется ее массой (рис. 9.5).

Соотношения светимостей звезд и их радиусов $L/L_C = (R/R_C)^{5,2}$ светимостей и масс $L/L_C = (M/M_C)^{0,75}$ сравнили со значением количества энергии, излучаемой поверхностью звезды за единицу времени $L/4\pi R^2$, и получили соотношение между температурой поверхности и ее массой $T/T_C = (M_{3B}/M_C)^{0,6}$. Итак, чем меньше масса звезды, тем меньше ее поверхностная температура и более поздним будет ее спектральный класс. Отсюда можно оценить массу звезды и по ее светимости: $M_{3B}/M_C = (L/L_C)^{0,256} = 3,04 \cdot 10^{-0,102M}$. Звезды отличаются цветом; считается, что имеют место законы равновесного излучения — закон Стефана — Больцмана и закон Вина. Антарес имеет красный цвет, Капелла — желтый, Сириус — белый, Вега — голубовато-белый.

Модели внутреннего строения звезд основаны на соотношениях между их параметрами. Они получены Эддингтоном из условий равновесия плазмы внутри звезд. Оказалось, что с увеличением массы скорость потребления топлива растет быстрее, чем его запас, т. е. чем больше и горячее звезда, тем быстрее кончится ее топливо и ее «жизнь» на Главной последовательности, где находится 0,99 всех видимых звезд. Так, Солнце, по оцен-

330

Рис. 9.6. Распределение физических характеристик звезд и звездной эволюции

кам ученых, пробудет на ней еще 8 млрд лет, т.е. оно еще не достигло своего среднего возраста. Если бы Солнце принадлежало к классу A, то его срок (5 млрд лет) был бы на исходе. Для такой большой и горячей звезды, как *S* Золотой Рыбы, этот срок был бы всего 2 — 3 млн лет. В теории Эддингтона все свойства звезды основывались на модели идеального газа, поэтому звезды у него при сжатии обязательно нагревались.

На основе закономерностей распределения звезд на диаграмме и известных физических моделей Расселл построил эволюционный путь звезды (рис. 9.6). Переходя от стадии холодной туманности в голубовато-белую, звезда перемещается в верхней части диаграммы справа налево, пока не достигнет верхнего левого конца Главной последовательности. Далее звезда под влиянием поля тяготения сжимается (при этом нагревания не происходит, а ее вещество достигает плотности, уже не соответствующей плотности газа) и остывает, превращаясь в *желтый карлик*, как Солнце. Затем она станет *красным карликом* и погаснет совсем, став *черным*

331

карликом — пеплом угасшей звезды. Так звезда скользит по Главной последовательности из верхнего левого угла к нижнему правому. Эту гипотезу, просуществовавшую всего 10 лет, назвали *теорией скользящей эволюции звезд*.

Схема эволюции звезд сопоставлялась с наблюдениями. Существование межзвездной пыли доказал Р.Трюмплер (1930), исследуя звездные скопления. Схема эволюции такова. Облако газа и пыли (газопылевой комплекс) сжимается и нагревается, возникающие неоднородности приводят его в состояние гравитационной неустойчивости, и оно распадается на части. Пока фрагмент прозрачен для инфракрасного излучения, температура его внутренних слоев не повышается, сжатие идет ускоренно. С некоторого момента сжатие переходит в адиабатическое, объект становится непрозрачным, давление и температура внутри растут, замедляя сжатие. Так возникает *протозвезда*.

Внутренние слои разогреваются за счет энергии гравитации падающего к центру вещества, объект как бы закипает, что отражается бурными вспышками на поверхности. Пример такой звезды — *T* Тельца. Это продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты температуры, достаточные для начала термоядерных реакций. В соответствии со своей массой звезда занимает место на Главной последовательности. Солнце проделало такой путь почти за 2 млн лет. Звезда такой массы «сядет» в среднюю часть последовательности и останется там на срок до 10^6 лет. Так протозвезда станет *звездой*.

По мере выгорания водорода давление в оболочке повышается, внешние слои расширяются и звезда начинает покидать Главную последовательность (двинется сначала чуть вправо и вниз), так как на расширение тратится некоторая энергия, и светимость звезды уменьшается (см. рис. 9.6). Равновесие достигается за счет формирования протяженной зоны конвекции, и звезда перейдет в группу красных гигантов. Огромная атмосфера красного гиганта не обеспечивает перенос энергии от внутренних слоев, и внутри звезды процессы пойдут адиабатически. Вблизи ядра температура может достичь необходимого значения для протекания термоядерных реакций, возможно, и с большим выходом энергии, чем у протон-протонных. Тогда холодная огром-

Рис. 9.7. Эволюция звезд, типы ядерных реакций в них и распределение химических элементов (характеристика «металличности» звезд)



332

ная атмосфера будет отброшена растущим давлением и превратится в расширяющуюся газовую туманность, которая может рассеяться в пространстве за сотни тысяч лет. Вероятно, наблюдаемая туманность в созвездии Лиры имеет такое же происхождение. Соединения ядер гелия возможны, но они дают меньше энергии (до 9 %), чем соединения ядер водорода. Звезда может продлить свое существование, если из углерода, получающегося при соединении трех атомов гелия, начнут возникать более сложные ядра. Конец наступает при синтезировании железа, которое имеет самые устойчивые ядра и уже не выделяет энергии (рис. 9.7).

9.3. Переменные звезды и их эволюция. Конечные стадии эволюции звезд и Солнца

Эволюционный путь звезды определяется ее массой, так как масса определяет количество горючего и с ее ростом увеличиваются температура в центре звезды и интенсивность термоядерных реакций. У звезд относительно небольшой массы (до $30 M_{\odot}$) светимость L пропорциональна M^{γ} , где $\gamma = 3 - 5$. Время жизни T_s звезды пропорционально M/L , т.е. $M^{1-\gamma}$, и для $\gamma = 4$, например, получаем T_s пропорциональное M^3 . Значит, если для Солнца T_{\odot} порядка 10^{10} лет, то у звезды массой $2M_{\odot}$ $T_s = 10^9$ лет. Для очень массивных звезд светимость не столь высока, и она пропорциональна массе, т.е. время жизни почти не зависит от массы и равно 3 — 5 млн лет.

Если звезда имеет массу, близкую массе Солнца, то возможен переход звезды в кратковременную — на несколько миллионов лет — стадию *пульсаций* (стадия цефеиды), после чего звезда станет белым карликом. Возможно, что Солнце через миллиарды лет тоже начнет расширяться, достигнет стадии красного гиганта, и, если к тому времени человечество не покинет Солнечную систему (или не уничтожит себя раньше этого срока), его судьба будет предопределена. Красные гиганты типа Бетельгейзе и Антареса развились из звезд Главной последовательности и были массивнее Солнца. Возможно, большие звезды станут инфракрасными гигантами.

Оценим размер Солнца в стадии красного гиганта. По закону Стефана — Больцмана светимость L пропорциональна квадрату радиуса R^2 и T^4 . Значит, радиус R пропорционален $\sqrt{L/T^2}$. Подставляя численные значения, получаем радиус Солнца в эпоху красного гиганта: $R = R_{\odot}(T_{\odot}/T)^2 \sqrt{L/L_{\odot}} = 80 R_{\odot} = 0,37$ а. е. Полученное значение показывает, что Солнце расширится до орбиты Меркурия (среднее расстояние 0,387 а.е., расстояние в перигелии — 0,31 а. е.) и поглотит только планету Меркурий.

333

Переменные звезды — это звезды, блеск которых меняется (беспорядочно или периодически). Они отличаются от звезд типа нашего Солнца, «жизнь» которых относительно стационарна. *Затменно-переменными* являются двойные звезды.

Отмеченное более тысячи лет назад арабскими астрономами изменение блеска звезды β Персея отражено в ее названии — Эль-Гуль, или «дьявол», что в Европе превратилось в Алголь. Причину колебаний ее блеска разгадал английский астроном-любитель Дж. Гудрайк, предположив «существование большого тела, вращающегося вокруг Алголя». Он же обнаружил (1784) пульсации звезды дельта Цефея с периодом меньше 0,2 суток. Еще раньше Д. Фабрициус заметил новую яркую звезду в созвездии Кита, блеск которой менялся с периодом в 348 дней, и назвал ее Мирой («Чудесная»). Такие долгопериодические переменные звезды — преимущественно звезды-гиганты «холодного» спектрального класса M . Впоследствии были обнаружены и классифицированы более 14 тыс. переменных звезд.

Физически переменные звезды на диаграмме «спектр — светимость» занимают широкую полосу в направлении от Главной последовательности в область гигантов и сверхгигантов. При переходе слева направо

период пульсаций звезды обратно пропорционален корню квадратному из средней плотности звезды. А ведь чем дальше вправо к области сверхгигантов смещена звезда, тем больше ее радиус и меньше ее плотность! Итак, период пульсаций связан со всей структурой звезды. Вероятно, источником пульсаций в этих звездах служит энергия, высвобождающаяся в звездных недрах, которая способна преобразоваться в механическую за счет особенностей ее строения.

Цефеиды — важный тип физически переменных звезд (см. гл. 3), с периодом блеска от нескольких часов до суток. Изучение спектров цефеид показывает, что вблизи максимального блеска звезда приближается к нам с наибольшей скоростью, а вблизи минимума — удаляется (эффект Доплера). Значит, цефеиды периодически сжимаются и расширяются (см. рис. 3.7).

Радиус цефеиды почти в 30 раз больше солнечного, и зона двукратной ионизации гелия, составляющая всего 1—2% радиуса, при средней температуре 40 000 К и плотности $3 \cdot 10^{-8}$ г/см³ составляет 10^{-6} всей массы. Но именно эта, казалось бы, незначительная зона приводит к пульсациям, работая как поршневой двигатель: освобождение энергии при сжигании горючего (или приобретение энергии системой) происходит в момент максимального сжатия в цилиндре. В зоне ионизации гелия-II за счет поглощения энергии растет давление, газ расширяется и уменьшается плотность. Слой становится прозрачней, запасенная в нем энергия начинает усиленно высвечиваться. При достижении наибольшего расширения внешние слои под действием тяготения начнут падать вниз, но равновесное положение «проскользнут», произойдет сжатие, и цикл повторится. Более детальный анализ показал, что пульсировать способ-

334

ны только звезды, в которых зона ионизации попадает в резонанс со всей звездой. Это возможно только для гигантов и сверхгигантов, а при движении вправо от них отстройка от резонанса приводит к неправильностям в блеске звезды. Возможно, многие звезды проходят подобные стадии эволюции.

Новые звезды в нашей Галактике дают до сотни вспышек за год, но видеть удастся только одну-две из них. Термин «новые» ввел Тихо Браге, наблюдавший вспышку в 1572 г., и, хотя это название не из удачных, так как вспышка свидетельствует не о рождении, а о гибели звезды, оно сохранилось. Недавно установили, что новые — это тесные двойные системы, состоящие из звезды позднего класса и горячей звезды, окруженной оболочкой плотного газа. Вспыхивает звезда с меньшей массой, перетягивание части массы к ней разогревает ее и приводит к взрыву. Зарегистрировано около 170 новых звезд в нашей Галактике и около 200 — в галактике Андромеды.

В максимуме Новая звезда достигает абсолютной звездной величины $M = -8$. Такая яркость длится всего несколько дней. Может случиться, что она за несколько месяцев вернет свои прежние характеристики, и в звездных просторах это не выглядит катастрофой, но через сто или тысячу лет она может вновь взорваться (как вулкан имеет склонность к повторным извержениям). В 1885 г. взорвалась Новая S Андромеды: будучи слабой звездочкой 7-й величины, она вдруг стала светить ярче звезды 6-й величины. С учетом расстояния до нее она стала ярче всей галактики Андромеды, ее блеск достигал блеска миллиона простых новых звезд, или в 10 млрд раз превышал блеск Солнца. Это была вспышка Сверхновой звезды.

Сверхновыми звездами стали называть уже по аналогии звезды, производящие наиболее мощные взрывы. Вспышку Сверхновой наблюдали китайские астрономы еще в 1054 г. в созвездии Тельца, и сейчас остатки оболочки этой звезды наблюдаются в виде Крабовидной туманности. Со временем она рассеется в пространстве, но при вспышках образуются изотопы многих элементов с массовыми числами, большими 60. Именно эти вспышки обогащают газопылевые комплексы тяжелыми элементами, поэтому в молодых звездах наблюдается более высокое содержание тяжелых элементов, чем в старых. Вспышки Сверхновых наблюдали примерно раз в 150 — 300 лет в каждой галактике. Кроме расширяющейся оболочки газа, которая сбрасывается при вспышке, на месте вспышки остается нейтронная звезда, или **пульсар**. Грандиозная Сверхновая была зарегистрирована при обычном фотографировании звездного неба Р. Макнаутом (Австралия) 23 февраля 1987 г., а через 20 ч — И.Шелтоном (Чили), причем она произошла на расстоянии всего 16 тыс. св. лет в Большом Магеллановом облаке. Вспышка была потом детально исследована во

335

всех диапазонах длин волн, и от нее исходил мощный поток нейтрино. Эти исследования приоткрыли картину эволюции звезд, выделили проявление и роль в ней смены ядерного горючего, показали, что эта Сверхновая относилась к старым звездам.

Ранее это была звезда (красный гигант) с массой в 18 раз больше солнечной, она светила в 40 тыс. раз ярче Солнца и за 10 млн лет выработала энергию превращения водорода в гелий. Когда во внутренней области, где сосредоточено 30 % массы звезды, закончились термоядерные реакции, центральные слои стали сжиматься. Сжатие продолжалось десятки тысяч лет (от 6 до 1100 г/см³), при этом температура поднялась от 40 до 190 млн К. Эти изменения привели к «загоранию» следующего ядерного горючего — гелия, которого хватило еще на 1 млн лет. Внешние слои, содержащие водород, расширили звезду до 300 млн км, и она превратилась в красный гигант. После выгорания гелия настала очередь ядерного горения углерода на 12 тыс. лет при температуре ядра 740 млн К и плотности 240 г/см³. В результате сгорания углерода образовались магний, неон и натрий. Неон выгорел после углерода за 12 лет при температуре 1,5 млрд К и плотности $7,4$ млн г/см³. После неона начинает гореть кислород, который сгорает за 4 года ($T = 2,1$ млрд К и плотность в ядре 16 млн г/см³).

После выгорания кислорода наступает очередь образовавшихся кремния и серы. Горение кремния формирует температуру в 3,4 млрд К и плотность 50 млн г/см³. Процесс выгорания кремния происходит уже за 7 суток. Ядро не уменьшило своей энергии из-за высокой температуры, но стало железным. Оно не обладает запасом ядерной энергии и не может противостоять тяготению, поэтому начинает стремительно сжиматься. За доли секунды ядро массой в 1,5 солнечных и радиусом в половину земного сжимается до радиуса около 100 км, т.е. становится почти нейтронным. Если бы оно сжалось до 10 км, то получилась бы нейтронная звезда. Но шло развитие рождения Сверхновой. Когда плотность достигла 270 млрд г/см³, нейтроны стали давить друг на друга, и процесс прекратился. Внешняя часть ядра, продолжающая падать с огромной скоростью, столкнулась с жестким ядром. В результате возникла ударная волна, которая устремилась к внешней поверхности звезды, но поток нейтрино обогнал ее, сорвал внешние оболочки и развеял их в пространстве. Через 160 тыс. лет этот поток нейтрино достиг Земли и был зафиксирован в подземных нейтринных лабораториях Японии, СССР и США.

Пульсарами называли источники пульсирующего излучения, характер которого был не похож на известный ранее (типа цефеид). Радиоастрономы А.Хьюиш, С.Белл, И.Пилкингтон, П.Скотт и Р.Коллинз обнаружили на $\lambda = 3,68$ м необычные радиосигналы, длящиеся 0,3 с (1968). Сигналы с точностью до 10^{-8} с повторялись через 1,337 с в течение полугода, но амплитуда сигнала менялась. Такой характер сигнала напоминал передачи земных радиостанций, в которых на строго ритмичные высокочастотные сигналы накладываются колебания звуковой частоты.

К настоящему времени открыто уже более двухсот пульсаров. Регистрируя излучение пульсаров на различных, но близких час-

336

татах, удалось по запаздыванию сигнала на большей длине волны (при предположении о некоторой плотности плазмы в межзвездной среде) определить расстояние до них. Оказалось, что все пульсары находятся на расстояниях 100 — 25000 св. лет, т.е. принадлежат нашей Галактике, группируясь вблизи ее плоскости. Возможно, что большинство открытых пульсаров находится в том же спиральном рукаве, что и Солнце. Пульсар NP 0531 в центре Крабовидной туманности отождествляли со звездой, которую считают остатком от вспышки Сверхновой в 1054 г. С развитием рентгеновской астрономии было замечено, что основную долю энергии пульсары излучают в этом диапазоне, и рост периода излучения пульсаров со временем позволяет оценить их возраст. Пульсирующий характер излучения объясняют быстрым вращением звезды и наличием сильного магнитного поля с индукцией до 100 млн Тл. Если магнитная ось не совпадает с осью вращения, то образуется «магнитный конус», попав в который заряженная частица может ускориться до скоростей, близких к световым, излучая энергию в направлении своего движения. Возникает узконаправленный пучок нетеплового излучения, и этот радиоимпульс регистрируется на Земле. Для пульсаров с периодом 0,5 — 2 с возраст составляет от 10^6 до $30 \cdot 10^6$ лет, т.е. это сравнительно молодые объекты Галактики. Но явление пульсара не связано с пульсациями нейтронных звезд. При плотности нейтронной звезды 10^{15} г/см³ период пульсаций равен всего 0,001 с, что в сотни раз меньше наблюдаемых периодов у пульсаров. Поэтому была разработана модель вращающейся нейтронной звезды, у которой ось вращения не совпадает с магнитной.

В 1985 г. появилась гипотеза, что источник рентгеновского излучения Лебедь X-3 представляет собой кварковую звезду. В 1989 г. в центре взорвавшейся SN 1987 А обнаружили пульсар с частотой вращения до 2000 об/с, самый быстрый из известных, и также предположили, что он является кварковой звездой. Считается, что после такой вспышки остаток звезды должен превратиться в белого карлика и туманность.

Массы звезд определяют их конечные судьбы. Гипотезу о том, что возможно существование звезд огромной плотности, состоящих только из нейтронов, высказал Ландау еще в 1932 г. сразу же после открытия нейтрона. Через два года эту идею развили В.Бааде и Ф. Цвикки. Они показали, что такие звезды могут образовываться при взрывах Сверхновых — конечная стадия эволюции массивных звезд. Если в ядре звезды образовались атомы железа, оно будет далее сжиматься и разогреваться под действием сил гравитации. Железо начнет распадаться на протоны и нейтроны, затем протоны, взаимодействуя с электронами, превратятся в нейтроны. Получится компактная нейтронная звезда. Снаружи нейтронное ядро будет обматывать железная кора температурой до 10^6 К.

337

Размеры звезды примерно $12 \sim 15$ км при средней плотности 10^{18} кг/м³. При такой огромной плотности нейтронная жидкость является вырожденной и подчиняется принципу запрета Паули, препятствующему дальнейшему сжатию. В центре нейтронной жидкости возможна примесь кваркового вещества.

Если давление вырожденных нейтронов при вспышке Сверхновой не сможет предотвратить дальнейшее сжатие ядра, начнется **гравитационный коллапс**. Когда скорость убегания (или вторая космическая) станет равной скорости света, коллапс неотвратим. Этот размер сжатия получил название *гравитационного радиуса*, определяемого массой звезды. Для Земли он составляет около 1 см, а для Солнца — 3 км. Если он достигнут, звезда станет *черной дырой*. Теория черных дыр, предсказанных ОТО, разработана достаточно подробно. Чтобы покинуть черную дыру, надо развить вторую космическую скорость, превышающую скорость света, что невозможно. Поэтому ни один объект не сможет покинуть ее поле. Вблизи черных дыр резко меняются

свойства пространства-времени. Считают, что таков конец эволюции самых массивных звезд. Черная дыра может проявить себя, если она входит в состав двойной звездной системы, в которой вторая звезда — яркий гигант. Предполагают, что массивные черные дыры возникают в центрах компактных звездных скоплений, центрах галактик и квазаров. Возможно, маленькие черные дыры возникали и в самом начале расширения Вселенной. Тогда их можно было бы искать по рождению вблизи них элементарных частиц, как следует из теории. Сейчас «подозреваемыми» объектами на черные дыры являются Лебедь X-1, Скорпион X-1, Стрелец А и др.

Итак, звезды эволюционируют, и эволюция их необратима. Грандиозные неравновесные процессы происходят в пульсирующих звездах — цефеидах, в недрах звезд — мощные термоядерные процессы, обеспечивающие выделение огромного количества энергии. В конечные этапы жизни в звездах возникают некие упорядоченные состояния, которые не могут быть описаны классической физикой. В нейтронных звездах и белых карликах вещество переходит в новые квантовые состояния, которые ограничивают энергетические потери.

9.4. Галактика, ее форма и строение. Солнечная система в Галактике

Наша галактическая система — рядовая звездная система. На небе в ясную безлунную ночь хорошо видна яркая белесоватая полоса — *Млечный Путь*. Он простирается (при вечерних наблюдениях) через созвездия Скорпиона, Стрельца, Орла и дальше вверх к созвездиям Лебедя, Цефея и Кассиопеи. При утренних

338

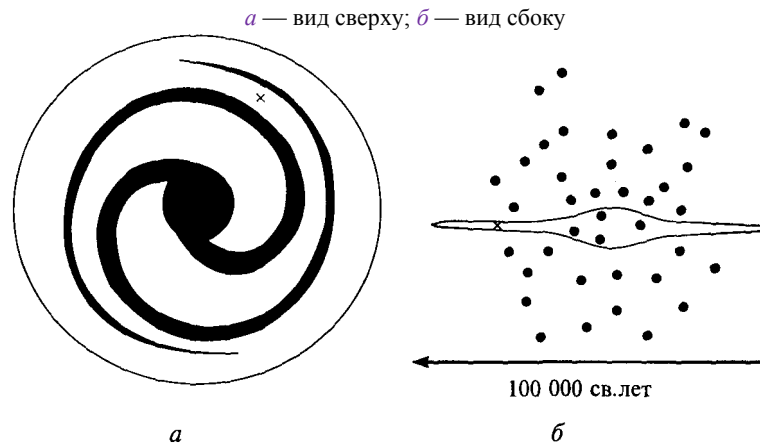
наблюдениях можно проследить его другую ветвь: по созвездиям Персея, Возничего, Тельца, Близнецов, Ориона и Большого Пса. В южном полушарии он проходит через созвездия Паруса, Киля, Южного Креста и Центавра. Таким образом, Млечный Путь образует на небе полный круг. Греки называли Млечный Путь галактическим (молочным) кругом. Его светлое сияние происходит в основном из-за свечения бесчисленного количества слабых звезд.

Представление о том, что Млечный Путь состоит из огромного числа звезд, восходит еще к Демокриту. Его догадку подтвердил Галилей с помощью своего телескопа. У. Гершель обратил внимание на то, что в направлении созвездия Геркулеса звезды как бы раздвигаются, а на противоположной стороне — сближаются. Такое впечатление получается при движении по дороге, по обеим сторонам которой высажены деревья, поэтому Солнце движется по отношению к ближайшим звездам и расстояния до них неодинаковы.

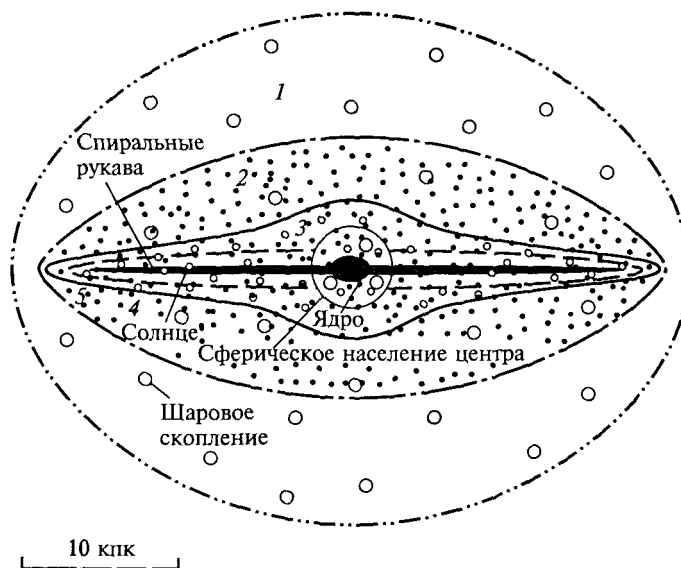
Основателем звездной астрономии считается У. Гершель. Из наблюдений он заключил, что протяженность Галактики порядка 5800 св. лет, а ее толщина — 1100 св. лет. Он не знал о существовании межзвездного газа, поглощающего излучение звезд, поэтому его размеры Галактики приуменьшены в 15 раз. В XX в. были определены форма и масштабы этой гигантской звездной системы и установлено место, которое занимает в ней наше Солнце. Солнечная система находится между спиральными рукавами, один из которых виден в направлении на центр Галактики в созвездии Стрельца, а другой — в противоположном направлении, в созвездии Персея. Именно в направлении на созвездие Стрельца Млечный Путь выглядит наиболее ярко.

Галактика — это гигантская звездная система, состоящая почти из 200 млрд звезд, и Солнце — одна из них. Вообще галактики — огромные вращающиеся звездные системы. Они различаются и по внешнему виду, и по характеристикам. Помимо звезд в галактики входит межзвездное вещество: газ, пыль, частицы космических лучей. Некоторые галактики похожи на нашу Галактику, называемую Млечный Путь, по ряду свойств и по внешнему виду. По их фотографиям можно заключить, что это достаточно тонкий диск с утолщением в центре. В этом месте Галактика простирается на область с радиусом 25 кпк и толщиной около 2 кпк, на расстоянии в 10 кпк от центра находится Солнечная система (рис. 9.8). Она движется вокруг центра Галактики почти по окружности со скоростью 250 км/с. Орбита Солнца лежит в плоскости Галактики, и один оборот длится 250 млн лет. Масса центральной части Галактики порядка $3 \cdot 10^{41}$ кг. Предполагают, что большая масса рассредоточена на периферии Галактики в области радиусом около 100 кпк. Многие звезды образуют группы — скопления. Эволюционные процессы связаны с такими характеристиками

339

Рис. 9.8. Схема положения Солнечной системы в Галактике (отмечено крестиком):**Рис. 9.9. Подсистемы Галактики:**

1 — гало; *2* — промежуточная подсистема; *3* — диск; *4* — старая плоская подсистема; *5* — молодая плоская подсистема



340

звезд, как возраст, химический состав, характеристики движений и пространственное расположение.

Возраст звезд меняется в большом диапазоне значений: от 15 млрд лет (возраст Вселенной) до сотен тысяч лет — самых молодых. Есть звезды, образующиеся на наших глазах. Все звезды, по терминологии Бааде (1944), принято называть звездным населением (рис. 9.9). В плоскости Галактики расположены звезды молодые и среднего возраста — население I, или диска (звезды Главной последовательности спектральных классов *O* и *B* — самые молодые и горячие, *G*, *K*, *M* — карлики). Это — рассеянные звездные скопления, горячие звезды — гиганты и сверхгиганты, Сверхновые звезды, долгопериодические цефеиды, молекулярные облака, светлые и темные туманности. Возраст их порядка 10^7 — 10^8 лет, они недавно образовались из межзвездного газа, потому находятся вблизи него в плоскости. Межзвездного газа по массе немного — около 5 % общей массы, и он сконцентрирован в спиральных рукавах. Наше Солнце находится посередине между двумя спиральными рукавами. Самые старые — население II, или гало (шаровые скопления, содержащие до миллиона звезд; рассеянные скопления, содержащие лишь 100 — 1000 звезд; субкарлики и переменные типа *RR* Лиры); к старым относят красные карлики, красные гиганты и цефеиды. Их возраст порядка 10^{10} лет. Старые объекты находятся ближе к центру Галактики. Промежуточную группу по возрасту занимают звезды, заполняющие диск Галактики толщиной около 1 кпк. Это новые звезды, планетарные туманности, яркие красные гиганты, расположенные в ядре Галактики.

Сравнительно молодые звезды верхней части последовательности входят обычно в состав рассеянных скоплений, непосредственно наблюдают около 1000 из них, и все они относятся к диску. Кроме рассеянных, в Галактике более 100 шаровых скоплений, представляющих собой достаточно компактные образования из 10^5 — 10^6 звезд. Они названы так потому, что в центре скопления блеск звезд сливается в яркий фон. Ближайшее шаровое скопление можно видеть в созвездии Центавра даже невооруженным глазом в виде размытого пятна. Шаровые скопления очень устойчивы, образуют сферическую подсистему. В них много бело-голубых звезд и мало красных гигантов; многие из них являются источниками мощного рентгеновского

излучения. Это объясняют аккрецией межзвездного газа на черные дыры, находящиеся в центре шаровых скоплений.

Межзвездный газ относят к населению диска, так как он ближе всего к молодым звездам по химическому составу, расположению и характеру движения. В спектрах были открыты линии межзвездного натрия, калия, железа, титана и водорода (по косвенным данным, например, потому что водород образует вместе с атомом

341 углерода молекулу CH). Измерения взаимных положений компонент в спектрах позволили составить схемы обращения облаков вокруг центра Галактики. Советские астрономы Г. А. Шайн и В. Ф. Газе, фотографируя небо сквозь светофильтры, выделяющие отдельные линии водородной серии Бальмера, открыли более 200 туманностей, не видимых на обычных фотографиях (1951). Сейчас установлено, что средняя плотность водорода в межзвездной среде порядка 0,1 частицы в 1 см³, а в плотных облаках — до нескольких тысяч. Соотношение водорода и гелия в межзвездной среде оценивается как 9 : 1. В спиральных рукавах плотность водорода примерно на порядок выше, чем между рукавами.

Межзвездная среда ослабляет свет звезд примерно на 0,6 зв. вел. на 1 пк, как доказал в 1847 г. русский астроном В.Я.Струве, а советский ученый П.П.Паренаго вывел формулу учета этого ослабления. Межзвездная среда похожа на пыль, концентрация которой в 100 раз меньше газовой. Частицы пыли похожи на ледяные загрязненные кристаллики, температура которых =17 К. Газопылевые облака поглощают свет далеких звезд, их поглощательная способность пропорциональна $1/\lambda$. Например, ядро Галактики удастся наблюдать только в инфракрасном и радиодиапазонах. В центре Галактики обнаружен мощный источник радиоизлучения Стрелец А. В нем предполагают наличие массивной черной дыры, окруженной газовым диском диаметром около 1 млрд км. Из ядра, линейные размеры которого около 4000 св. лет, с огромными скоростями (до 600 км/с) выбрасываются сгустки вещества, масса которых за год оценивается в 1 массу Солнца. В основном облака концентрируются вблизи галактической плоскости.

Ядро Галактики изучено плохо, так как центральная область почти недоступна для наблюдений из-за сильного поглощения в межзвездной среде. Наблюдения в разных областях спектра позволили установить, что размер ядра составляет около нескольких килопарсек (кпк). Плотность звезд достигает 10⁷ звезд/пк³, тогда как вблизи Солнца — одна звезда на 10 пк³. В центре Галактики находится источник нетеплового излучения (Стрелец А), вероятно, очень быстрые электроны, которые возникают при вспышках сверхновых звезд или пульсаров, ускоряются в магнитных полях. Мощное излучение от ядра существует в радиодиапазоне и в инфракрасной области. Есть предположения, что это массивное быстровращающееся плазменное тело «магнетойд», или черная дыра.

Движения старых и молодых звезд в Галактике имеют различия: у старых — большие эксцентриситеты орбит, а молодые движутся почти по окружностям. Получаются две подсистемы: молодые звезды быстро вращаются внутри почти неподвижной системы более старых звезд.

Галактический год — период вращения Солнца вокруг центра Галактики. Направляя радиотелескоп в разные участки Млечного

342

Пути, ученые изучили распределение водорода в пространстве облаков, линия водорода на $\lambda = 21$ см оказалась расщепленной. Так установили спиральные рукава, вдоль которых образуются молодые звезды.

Лучевые скорости звезд определяют по доплеровскому смещению спектральных линий. Сравнение фотографий звезд, сделанных через достаточно большие интервалы времени, дает наличие двух составляющих — лучевой (направленной к наблюдателю) и тангенциальной, которые представляют пространственную скорость. Если лучевую составляющую определяют по эффекту Доплера, то для определения тангенциальной составляющей нужно знать и расстояние до звезды. Звезды гало и диска Галактики различны и по своим *пространственным скоростям*: у звезд гало скорости в 4—5 раз больше.

Различное содержание тяжелых элементов звезд гало и диска позволили выстроить последовательность жизни звезд. Предполагают, что Галактика как система звезд образовалась примерно 13 млрд лет назад. На «догалактической» стадии вещество Вселенной не содержало никаких элементов, кроме водорода (3/4) и гелия (1/4). Гравитационные силы сжимали облако, и возникли первые неоднородности, среди которых выделились области с большой плотностью. В них начался процесс звездообразования, возникли и первые скопления звезд. Появились шаровые и рассеянные скопления, в них сформировалось некоторое количество звезд классов *O* и *B*. Они «сгорели» за 1 млрд лет, закончив свою эволюцию вспышкой Сверхновой звезды.

Более тяжелыми элементами обогатили межзвездную среду оболочки взрывающихся звезд. Первые поколения звезд содержат элементы более тяжелые, условно их называют металлами, и «металличность» звезды часто характеризуют величиной:

$$\text{Fe}/\text{H} = \ln(\text{N}_{\text{Fe}}/\text{N}_{\text{H}})_{\text{звезда}} - \ln(\text{N}_{\text{Fe}}/\text{N}_{\text{H}})_{\text{Солнце}}$$

где N_{Fe} , N_{H} — число атомов железа и водорода соответственно (см. рис. 9.7).

Появление тяжелых элементов говорит о том, что, прежде чем попасть в эти звезды, первичное вещество подверглось каким-то ядерным превращениям и обогатилось тяжелыми элементами. Большинство звезд имеют малую массу, которой недостаточно для выработки тяжелых металлов путем термоядерных реакций. Такие звезды, как наше Солнце, способны только превращать водород в гелий, поэтому их химический состав

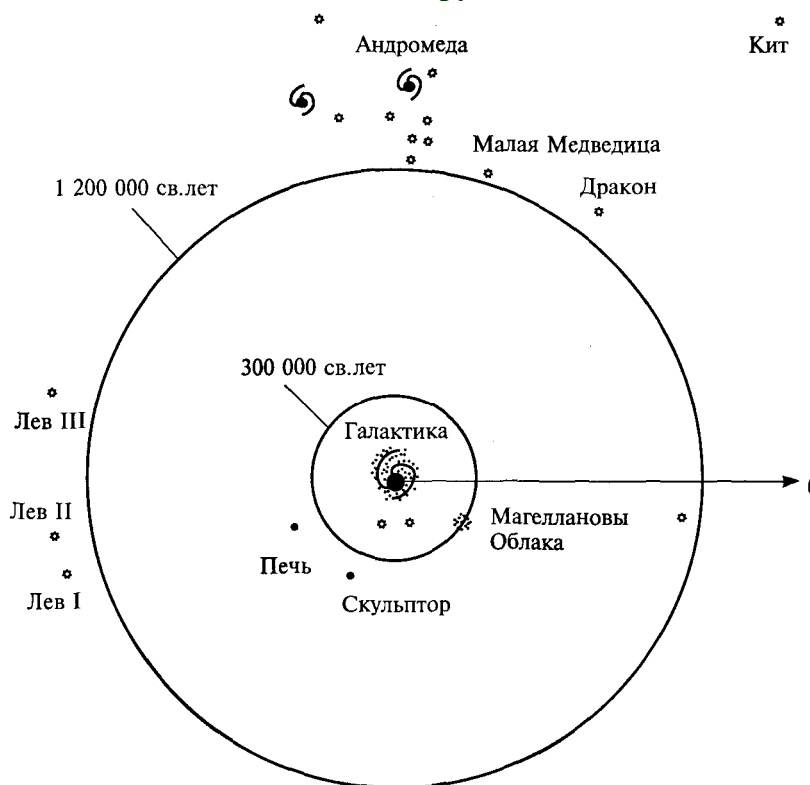
не меняется и соответствует тем химическим элементам, из которых они образовывались. Тот факт, что молодые звезды гораздо богаче металлами, чем старые (у Солнца металлы составляют 2 — 3 % массы) и что межзвездная среда имеет близкий процент содержания металлов, говорит о том, что звезды генетически связаны с межзвездным газом.

343

9.5. Многообразие мира галактик. Содержание и значение закона Хаббла

Мир галактик столь же разнообразен, как и мир звезд. Долгое время туманные пятнышки, наблюдаемые в телескопы, считали туманностями, относящимися к Галактике (воспринимаемой как вся Вселенная). Это — огромные вращающиеся системы звезд, разнообразные по внешнему виду и физическим характеристикам, размером 1 — 100 кпк. В них находится от 10^7 до 10^{12} звезд. Небольшие галактики часто являются спутниками больших галактик. Невооруженным глазом можно увидеть ближайшие к нам галактики — Магеллановы Облака (в Южном полушарии) и туманность Андромеды (в Северном полушарии), они входят в Местную группу галактик (рис. 9.10). Остальные галактики видны только в телескоп как пятнышки. Классификация галактик в каталогах — М с номером. Так, М31 — туманность Андромеды. В каталоге, составленном в СССР в 60-е гг. XX в., более 30 000 галактик.

Рис. 9.10. Местная группа галактик



344

Вид галактики на фотобумаге несколько отличен от ее вида на негативе и зависит от того, в каких лучах был снят. Коллектив Астрономического института при Московском университете во главе с Б.А.Воронцовым-Вельяминовым составил «Морфологический каталог галактик» (MGC) из 30000 галактик ярче 17-й звездной величины и атлас взаимодействующих галактик. Оказалось, что некоторые галактики отличаются мощным радиоизлучением, которое больше оптического. Их называли радиогалактиками (например, Лебедь А). Позднее стало ясно, что галактики не покоятся относительно расширяющегося недеформируемого фона, а имеют собственные движения, изучение которых позволит определить протяженность неоднородностей в распределении массы, а эти неоднородности очень велики и отражают сложные процессы начала расширения.

Деление галактик на **спиральные**, **эллиптические** и **неправильные**, основанное на внешнем виде, было введено в 1925 г. американским астрономом Э.Хабблом, изучившим более тысячи галактик (рис. 9.11). Его классификация отражает и существенные физические различия между галактиками.

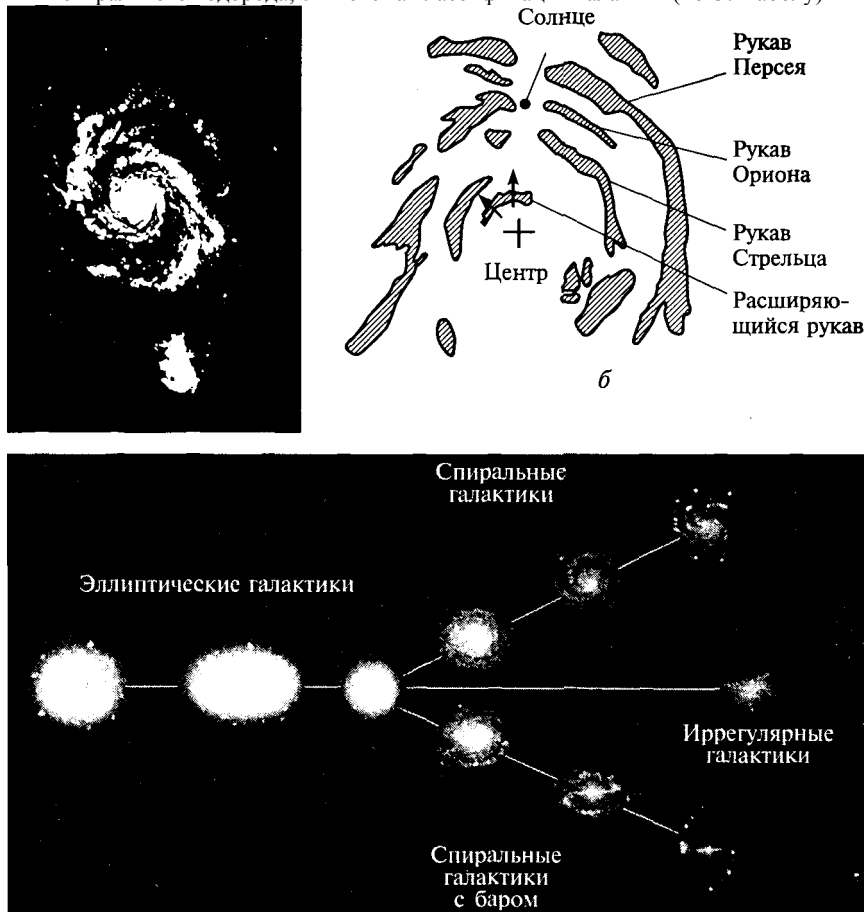
Спиральные галактики состоят из двух подсистем — дисковой и сферической. Сферическая часть напоминает эллиптическую галактику, дисковая — сжата и содержит много межзвездной пыли, газа и молодых звезд. Более молодые и яркие звезды сгруппированы в спиральные рукава. Оказалось, что почти половина галактик имеют спиральную форму. В центре таких галактик — красивое и яркое ядро, большое и тесное скопление звезд. Из ядра выходят закручивающиеся вокруг него ветви, состоящие из молодых звезд и

облаков нейтрального газа. Таковы галактики Млечный Путь и туманность Андромеды. *Эллиптические галактики* несколько похожи на них, но с меньшими рукавами. Среди наиболее ярких галактик они составляют 25 %; считают, что они состоят из более старых звезд (возраста Солнца или старше), так как имеют красноватый оттенок. Они почти не содержат межзвездного газа, и там не формируются новые звезды. Вращение в них происходит с небольшими скоростями (менее 100 км/с), а равновесие поддерживается за счет хаотических передвижений звезд по радиально вытянутым орбитам. Такую галактику наблюдают в созвездии Девы, она имеет почти шаровидную форму и весьма активна. В ядре эллиптической радиогалактики Кентавра А удалось обнаружить на расстоянии в 10^6 св. лет отдельные детали размером в 100 св. лет, отражающие бурную активность. *Неправильные галактики* имеют небольшую массу и размер, в них много межзвездного газа. Заметны как очаги звездообразования какие-то клочки. Примером таких галактик являются наиболее близкие к Земле две небольшие галактики Магелланова Облака, которые даже называют спутниками Млечного Пути. До Большого Облака около 200 тыс. св. лет, до Малого — всего 170 тыс. св. лет. В Большом Облаке в 1987 г.

345

Рис. 9.11. Галактики:

a — спиральная галактика NGC 6814, похожая на Млечный Путь; *б* — схема спиральных рукавов Галактики по радионаблюдениям нейтрального водорода; *в* — схема классификации галактик (по Э. Хабблу)



наблюдалась вспышка Сверхновой звезды, а при помощи обсерватории «Квант» орбитального комплекса «Мир» в 1999 г. было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение. Наблюдения с помощью «Кванта» и другого российского рентгеновского телескопа «Гранат» позволили подтвердить гипотезу о том, что в центре нашей Галактики — черная дыра, масса которой в миллионы раз больше солнечной.

Отдельные звезды в галактиках стали различать только в 30-е гг. В 1923 г. Хаббл с помощью 2,5-метрового рефлектора открыл в спиральной туманности созвездия Андромеды несколько перемен-

346

ных звезд (т.е. с меняющимся блеском) и цефеиду. По периоду колебаний блеска цефеиды он определил ее звездную величину и расстояние до нее — 900 тыс. св. лет. Туманность M31 находится вне нашей Галактики. Поправка на поглощение излучения межзвездным газом увеличила это расстояние до 2,2 млн св. лет, что превышает более чем в 20 раз размеры нашей Галактики. Хаббл подсчитал число галактик до 20-й звездной величины на 1283 участках неба. Он нашел, что на один квадратный градус на небесной сфере приходится в среднем 130 галактик. Небесная сфера содержит 41 253 квадратных градуса, поэтому общее число галактик до 20-й звездной величины составляет 5,4 млн (звезды до 20-й величины можно наблюдать в 2,5-метровый телескоп Хаббла).

Галактики распределены почти равномерно по всем направлениям, хотя образуют скопления и группы.

Тесным является скопление из 40 тысяч галактик в созвездии Волосы Вероники (Северное полушарие), находящееся на расстоянии около 400 млн св. лет и занимающее почти 12° . Иногда группы столь тесные, что галактики как бы проникают друг в друга. Так, в нашу Галактику частично заходит галактика Малое Магелланово Облако. Радиусы больших скоплений (около тысячи галактик) составляют до 1 — 4 Мпк или даже 10 Мпк. Такое скопление наблюдается в созвездии Девы, находящемся на расстоянии 15 Мпк от нас — оно и есть центр Местного сверхскопления галактик, куда входит и Местная группа галактик. Размеры таких скоплений растут в связи с общим расширением Вселенной.

Лучевые скорости галактик первым определил Слайфер (1912). К 1925 г. он измерил скорости 41 галактики, из них 36 удалялись от нас со скоростями до 1000 км/с, и лишь несколько приближались. Хаббл измерил расстояния до галактик по цефеидам и ярким звездам и установил (1929), что скорости «разбегания» галактик растут пропорционально расстоянию до них. Закон Хаббла: $V = Hr$, где H — постоянная, получившая название *постоянной Хаббла* (см. рис. 3.8).

Сначала Хаббл считал, что $H = 500$ км/(с • Мпк). В настоящее время H считают от 50 до 100 км/(с • Мпк). С помощью красного смещения Хаббла оценивали расстояние до галактик и до края видимой Вселенной — Метагалактики. Поскольку увеличение красного смещения сопровождается уменьшением яркости галактики, то заключили, что закон $V - Hr$ действительно отражает расширение Метагалактики. При $H = 50$ км/(с • Мпк) и $\Delta\lambda/\lambda = 0,3$ получается $r = (c/H\Delta\lambda/\lambda) = 19,6 (\Delta\lambda/\lambda)$ млрд св. лет.

Существование дискретного источника радиоизлучения в созвездии Лебедя впервые доказали в 1946 г. Дж.Хей, С.Парсонс и Дж.Филлипс (Англия). Впоследствии радиоисточники стали обозначать латинскими буквами после названия созвездия по мере убывания интенсивности по алфавиту. К 1950 г. был составлен каталог из 50 радиоисточников, а через

347

5 лет — уже из 1936. Некоторые оказались ложными, некоторые отождествлялись с другими галактиками, часть из них принадлежала нашей Галактике (в ряде случаев это были остатки вспышек Сверхновых), хотя первоначально источник Телец А отождествляли с Крабовидной туманностью. Излучение некоторых оказалось тепловым, причем спиральные и неправильные галактики имели слабое радиоизлучение, светимость эллиптических галактик в дециметровом диапазоне превышала его в сотни раз. В 100 раз ярче были эллиптические галактики с протяженной оболочкой. Источник Лебедь А имел нетепловой характер излучения, распределение его по частотам отличалось от закона Рэлея—Джинса. Сравнение оптического (в 5-метровый телескоп это была слабая, как бы вдвоенная, звездочка 18-й величины) и радиочастотного изображений показало, что мощность излучения в радиодиапазоне не только в полтора раза выше, но и больше в миллион раз, чем у обычной галактики. При этом мощное радиоизлучение идет от областей, отстоящих от самой галактики на 10 тыс. св. лет по обе стороны. Спектры излучения содержали сильные эмиссионные линии, которые могли образоваться в результате столкновения облаков газа, и в связи с этим решили, что имело место весьма редкое явление — столкновение двух галактик.

Механизм нетеплового радиоизлучения — *синхротронный*, его вызывают электроны высоких энергий, входящие в состав космических лучей, которые при движении в сильных магнитных полях генерируют радиоволны разных частот. Это излучение сильно поляризовано. Значит, оно порождено тормозным излучением и есть выделенное направление в распределении магнитных полей. По измеренной интенсивности излучения находят плотности энергии заряженных частиц и напряженности магнитных полей. Так, выяснили, что протяженные компоненты радиоизлучения — это намагниченные облака разреженного газа, насыщенные космическими лучами.

Развитие техники радиоинтерферометрии повысило разрешающую способность радиотелескопов и позволило выяснить, что двойная структура источников — типичное явление. Из 500 радиогалактик 75 % — двойные, а остальные представляют собой малую яркую область, окруженную оболочкой. Ближайшая радиогалактика NGC 5128 находится в созвездии Центавра и удалена от нас всего на 5 Мпк. На фотографиях видна широкая темная полоса поглощающей свет пылевой материи. Этот источник, как и источник Лебедь А, состоит из двух компонент, расположенных за пределами оптической области. В самом центре выделяется мощный почти точечный источник радиоизлучения. Подобные ситуации стали наблюдать при сравнении картин неба в разных диапазонах длин волн. Такова галактика М 82 в созвездии Большой Медведицы. Около 3 млн лет назад из нее было выброшено вещество объемом в 6 млн солнечных масс, и часть его получила скорости, близкие к световым, т.е. произошел взрыв с выбросом энергии в 10^{65} Дж, эквивалентный одновременной вспышке 10 млн Сверхновых. Для взрыва объекта Лебедь А выброс энергии оценивается в 10 тысяч раз больше. Такие огромные значения энергии, превышающие в несколько раз гравитационную энер-

348

гию связи всех звезд в радиогалактике, имеют своим источником область галактического ядра, где генерируются релятивистские электроны.

Активные спиральные галактики с развитыми ядрами открыты американским астрономом К.Сейфертом (1943). Он описал 12 таких галактик (галактики Сейферта). Диаметры ядер около 10 пк, а почти 1/3 занимают излучающие области. В их спектрах много эмиссионных линий водорода, гелия и тяжелых элементов, а в спектрах обычных галактик больше линий поглощения. Известно около ста таких объектов; мощность их

меняется со временем, т.е. там происходят какие-то грандиозные процессы. В 1963 г. советский астроном Б. Е. Маркарян выделил 600 галактик с повышенной долей излучения в ультрафиолетовой области (галактики Маркаряна). В них много звезд — горячих гигантов. Ядра этих галактик, как и галактик Сейферта, очень активны.

Амбарцумян связывал их активность со взрывами в их ядрах. По его теории (1955), ядра активных галактик могут содержать также массы дозвездного вещества с неизвестными пока свойствами и источниками энергии. И. С. Шкловский считал, что ядра галактик — единые сильно намагниченные вращающиеся плазменные тела. Слои этих тел вращаются с разными скоростями, и магнитная энергия периодически скачкообразно превращается в энергию ускоренных заряженных частиц, вследствие чего и происходит выбрасывание струй в направлении вращения. Сам он пишет так: «Возможно, что в центральных областях галактик реализуется какая-то гигантская, циклически работающая машина. После взрыва плазменного тела туда постепенно натекает газ из окружающей среды, что приводит к образованию нового плазменного тела. Все же многое, может быть, самое важное, остается загадочным и непонятным». Стало привычным отождествлять радиоисточники либо с туманностями, либо с галактиками. По оценкам, ожидали незначительные потоки радиоизлучения от самых близких звезд, но источники давали намного большие потоки.

В 1963 г. голландский астрофизик М. Шмидт исследовал спектр достаточно яркой звезды 13-й величины, отождествленной с радиоисточником ЗС 273. Линии водорода были смещены на огромную величину, соответствующую скорости 42 000 км/с, а по закону Хаббла расстояние до источника должно быть около 600 Мпк, или 2 млрд св. лет. Две другие линии совпадали с линиями дважды ионизованного кислорода и ионизованного магния. Затем нашли источник с красным смещением линий, т.е. он удалялся от нас. Если это смещение связано с эффектом Доплера, то первый источник ЗС 273 приближался со скоростью света, равной 48 000 км/с, а второй — удалялся со скоростью света $0,8 c = 240\,000$ км/с. При этом обнаружили, что рядом находится очень много объектов, которые движутся вместе, т.е. это далекие галактики. Тогда откуда

349

такая яркость? Астрономы А.С.Шаров и Ю.Н.Ефремов изучили старые фотографии этого объекта и оказалось, что объект сильно изменил свой блеск. Выходило, что галактика, состоящая из триллионов звезд, организует звезды, чтобы они синхронно меняли свой блеск?! Значит, излучали не звезды, а нечто иное, мощность которого соответствовала мощности ядер сейфертовских галактик. Зная расстояние до них и видимую звездную величину, можно подсчитать светимость — она фантастически большая: 10^{53} Дж/с. Эти космические объекты нового типа получили название квазизвезд, или **квазаров**.

Квазаров сейчас известно уже около тысячи. Внешне похожие на звезду, они излучали в сотни раз больше энергии, чем наша Галактика с ее почти 200 млрд звезд. Квазары занесены в каталоги, имеется статистика их свойств. Похоже, что в раннюю эпоху Вселенной квазаров было больше. Почти все они излучают и в рентгеновском диапазоне, и тоже переменно. Переменность потоков мощного излучения свидетельствует о том, что квазары должны быть невелики — около 10^{13} м. Они распределены почти равномерно по направлениям, но находятся на разных расстояниях. Свет от ближайшего к нам квазара идет 1 млрд лет, а от самого удаленного — 12 млрд лет, значит, мы видим их такими, какими они были от 1 до 12 млрд лет назад, тем самым прослеживая время образования этих необычных объектов до образования Солнечной системы.

Спектр квазаров по распределению энергии соответствует синхротронному излучению: много излучают в ультрафиолете и мощное инфракрасное излучение в широкой полосе около 70 мкм. Излучение в рентгеновском диапазоне велико: для квазара ЗС 273, например, оно по мощности в 50 раз больше в радиодиапазоне и вдвое превышает оптическое. За время жизни (порядка 10^6 — 10^7 лет) квазар излучает около 10^{67} Дж. Для обоснования источника такой огромной энергии предложено много вариантов, но пока ни один не может быть принят. Если это аннигиляция, то из связи энергии с массой такая энергия эквивалентна потере 5 млн солнечных масс (M_{\odot}), но известно, что состояние звезд с массой $100 M_{\odot}$ неустойчиво (притяжение верхних слоев не уравновешивается ростом давления с глубиной). Термоядерный источник в 140 раз менее эффективен аннигиляционного. Может, равновесие поддерживается быстрым вращением массивной звезды вокруг оси, магнитными полями и вихревыми движениями в оболочке. В квазарах почти нет легких элементов. Считают, что они произошли от огромного взрыва в прошлом. Если это — образование типа «сверхзвезды», то равновесие в них поддерживается быстрым вращением вокруг оси, магнитными полями и вихревыми движениями в оболочке. Может быть, квазары похожи и на N -галактики с меньшей светимостью.

«Первичным источником энергии квазаров и активных ядер галактик должна быть энергия гравитационного взаимодействия центрального, компактного тела и падающей на него плазмы», — считал Шкловский. На снимках видны выбросы сгустков горячей

350

плазмы, движущиеся с огромной скоростью (0,27 с, как у объекта SS 433) в противоположных направлениях от уплощенного газового диска, который образуется вокруг компактного объекта, возможно, нейтронной звезды.

После открытия квазаров, связанного с отождествлением спектров слабых источников в разных диапазонах, такие исследования продолжались. Астрофизик А. Сендидж заинтересовался голубыми звездами, излучающими в ультрафиолете, но не зарегистрированными в радиодиапазоне. Эти объекты удалялись от нас

с большими скоростями. Их сначала называли «контрабандистами», а затем **квазагами**.

Черные дыры

Черные дыры должны быть в ядрах гигантских эллиптических галактик, они появились в центре галактик в процессе эволюции. Так считают многие исследователи вслед за Зельдовичем и Новиковым. Черные дыры могут возникать разными способами, и их «питание» осуществляется за счет падения вещества — аккреции (от лат. *accretio* — приращение). Так современная всеволновая (от радио- до гамма-диапазона длин волн) астрономия начинает подступать к изучению источников энергии Вселенной, но нестационарность мира галактик твердо установлена. В 2000 г. было сообщено об открытии трех гигантских черных дыр (в 50—100 раз массивнее Солнца) в созвездиях Овен и Дева. Одна расположена на расстоянии в 25 млн св. лет, а две другие удалены примерно на 100 млн св. лет. До этого были известны всего 20 черных дыр, которые массивнее Солнца в несколько раз. Саму черную дыру нельзя видеть, но был получен снимок «действия» черной дыры в галактике Кентавр А — она заглатывала шлейф горячего газа.

9.6. Сценарий стационарной Вселенной и «Космология Большого Взрыва»

Космология — наука о строении и эволюции Вселенной. Она изучает свойства всей доступной для наблюдений Вселенной как единого целого. Общие представления о ее строении сложились в астрономии, но задачи космологии можно было решать лишь в XX в. Создание крупных телескопов, развитие фотографической и всеволновой астрономии, спектроскопии и других методов исследования позволили изучить распределение галактик в пространстве, их движения на огромных расстояниях (до 10 млрд св. лет). Мы теперь знаем, что окружены огромным и удивительным миром галактик и квазаров. Понять это было бы невозможно без общей теории относительности (ОТО) — математической базы современной космологии.

Эйнштейн обобщил закон тяготения Ньютона на случай сильных гравитационных полей. Изменились представления о простран-

351

стве и времени — они уже не были сценой для развития драмы истории Вселенной, а участвовали в самом процессе, и материя меняла свойства пространства и времени. Тяготеющие массы искривляют вокруг себя пространство-время, а оно воздействует на материю. Эйнштейн, объединив гравитацию и геометрию Римана, получил из средней плотности массы во Вселенной «абсолютные размеры Вселенной». Многие сомневаются в достаточности ОТО для понимания явлений Мегамира — ведь его масштабы превышают лабораторные условия на Земле в 10^{26} раз! Но изучение ближайших к нам галактик показало, что они состоят из тех же объектов — звезд, звездных скоплений, туманностей. Наука не может обойтись без построения рабочих моделей, независимо от изучаемого объекта. Модели уточняются, частично заменяются или отбрасываются. Можно построить цепочку объектов Мегамира: видимая Вселенная — галактика — Галактика — звезда — планета. Общие закономерности развития Вселенной строятся путем создания моделей.

Модель пустой Вселенной (1917), в которой два объекта расположены на столь большом расстоянии, что можно пренебречь силами притяжения между ними, рассмотрел нидерландский астроном Биллем де Ситтер. Стационарность мира требовала, чтобы галактики удалялись друг от друга с ускорением. Фактически в его решении содержалось предсказание расширения Вселенной, но до открытия Хаббла это представлялось неким казусом. Величина, обратная постоянной Хаббла H , имеет размерность времени. Отсюда заключают, что за это время вещество галактик «разлетелось» из точки наблюдения. Значит, это время прошло с того момента, когда оно было сконцентрировано в точке. Наблюдаемые скорости разлета достигают 10^4 км/с, поэтому в момент «начала» должен был произойти взрыв, породивший Вселенную. Пока считали $H = 500$ км/(с · Мпк), это время не превышало 2 млрд лет (меньше возраста Земли). Это породило разные гипотезы: расширение Вселенной, изменение скорости света, или «старение» фотона на огромных расстояниях. Если значение H очень надежно, то линейная зависимость в законе Хаббла считается твердо установленным фактом.

Взяв $H = 75$ км/(с · Мпк) и считая, что «сегодняшнее» время жизни Вселенной t_0 приблизительно равно R_0/V_0 , подставим $V_0 = H_0 R_0$ из закона Хаббла и получим $t_0 = 13$ млрд лет. Учитывая приближенность такой оценки, следует отметить, что величина этого времени, которое называют возрастом Вселенной, колеблется от 10 до 20 млрд лет.

Фридман детально исследовал уравнения ОТО и показал, что теория допускает в качестве моделей и развивающиеся системы — коллапсирующие. Стабильная Вселенная Эйнштейна является нестабильной при малейшем возмущении. Фридман выделил три

352

возможности, соответствующие трем моделям Вселенной: 1) $\kappa = 0$; расширяющееся евклидово пространство; 2) $\kappa > 0$; пульсирующая модель, пространство неевклидово (сферический мир); 3) $\kappa < 0$; монотонно расширяющееся неевклидово пространство (гиперболический мир).

В первом случае при $\Lambda = 0$ уравнение, описывающее изменения масштабного фактора, со временем имеет точное решение (модель Эйнштейна—де Ситтера). Начавшееся расширение продолжается неограниченно, и $H = 2/3t$, а возраст Вселенной равен $t_0 = 2/3H$. Параметр ускорения не меняется и положителен, потому что масштабный фактор растет со временем: $R = R_0 \exp(\Lambda/3ct)$. В этой стационарной Вселенной (модель Ф.Хойла)

плотность, несмотря на расширение, поддерживается постоянной за счет непрерывного «творения» вещества из особого «энергетического поля». Во втором случае при $\Lambda < 0$, т. е. при наличии дополнительной силы притяжения, кроме ньютонова тяготения, и открытом искривленном пространстве в пульсирующей Вселенной, в некоторый момент масштабный фактор становится равным нулю, и с $t = 0$ он начнет возрастать, достигнет максимума и снова уменьшится до нуля. Если выбрана закрытая модель пространства и Λ -член равен некоторой критической величине, определяемой плотностью вещества во Вселенной, то масштабный фактор растет от нуля до определенного максимума, достигаемого в далеком будущем. Если космологическая постоянная становится больше этого критического значения, то масштабный фактор растет, хотя и медленно, но неограниченно. В замкнутой Вселенной и при равенстве космологического члена своему критическому значению возможны два решения: стационарный мир Эйнштейна $R(t) = \text{const}$ и модель Эддингтона—Леметра, в которой $R(t) = R_1$ в бесконечно удаленном прошлом и неограниченно растет в будущем.

Выбор модели Вселенной определяется средней плотностью вещества во Вселенной. Если она больше критической, то $\kappa > 0$ и мир замкнут. Для $H = 50 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$ критическое значение плотности достигает $5 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3$. Это несколько больше средней плотности, размазанной по всему наблюдаемому объему (в пределах одного-двух порядков величины). Но мощный фон рентгеновского излучения свидетельствует о том, что межгалактическое пространство может быть заполнено водородом температурой около 1 млн К. Возможно, существуют и еще какие-то массы во Вселенной, пока не обнаруженные.

Массы звездных скоплений оказались по оценкам несколько больше масс, наблюдаемых в скоплениях объектов, в связи с чем возникла проблема *скрытой массы*. По опытным данным на каждый протон приходится примерно 1 млрд нейтрино, обладающих массой покоя $5 \cdot 10^{-35} \text{ кг}$. И это обилие нейтрино во Вселенной тоже приближает значение средней плотности к критическому значению. Поэтому осциллирующая модель может стать более вероятной, хотя она не сводится к простому повторению циклов «расширение—сжатие», как указывают Зельдович и Новиков.

353

Бельгийский аббат Ж. Леметр связал релятивистские модели с данными наблюдений: если разбегание галактик соответствует расширению пространства, то при проектировании на прошлое нужно представить уменьшение объема и увеличение плотности. Эти рассуждения связали с актом творения мира. Первоначальная плотность вещества (протоатом) достигала 10^{96} кг/м^3 , и это значение плотности определило границы применимости понятий пространства и времени. Поэтому не имеет смысла говорить ни о том, сколько длилась эта сингулярность, ни о том, что было до нее.

Расчеты Фридмана были многократно проверены и Эйнштейном, и Эддингтоном, и де Ситтером. О Фридмане справедливо говорят, что он «на кончике пера» открыл разбегание галактик. Открытие гравитационного красного смещения через несколько лет подтвердило догадки о нестационарном развитии, о расширении Вселенной. Вскоре теоретически было показано, что своеобразие релятивистской космологии вовсе не связано с теорией Эйнштейна, а обусловлено космологической постановкой проблемы. Из динамики Ньютона возможно получить необходимость эволюции, как это и сделал в 1934 г. английский астрофизик Э.Милн.

Модель расширяющейся Вселенной проявляется на уровне галактик, и не существует центра, от которого галактики «разбегаются». В общем случае постоянная Хаббла H зависит от времени, и скорость расширения убывает из-за тормозящего действия гравитации. Если допустить расширение Метагалактики и в прошлом, можно оценить ее возраст примерно в 13 млрд лет. Будущее Вселенной по современным представлениям зависит от средней плотности ρ .

Скорость расширения $\ddot{a}R/dt = (8\pi G^2/3 - k + \Lambda R^2/3)^{1/2}$ по ОТО для горячей модели. Здесь Λ — космологическая постоянная, учитывающая возможное существование в мире дополнительной силы, помимо силы тяготения; при $\Lambda > 0$ — это сила отталкивания, при $\Lambda < 0$ — сила притяжения.

Расчеты предшествующей истории Космоса в большинстве моделей дают для начала расширения пространства (13 — 20 млрд лет назад) состояние с очень высокими плотностью материи и энергией излучения. В уравнениях появляется математическая сингулярность, и ни одна модель не движется ранее этого момента. Так как при сжатии газа его температура возрастает, допускают, что в далеком прошлом Вселенная была очень горячей. Именно к модели «горячей Вселенной» пришел Гамов, назвав ее «Космология Большого Взрыва». Его интересовали относительная распространенность и происхождение химических элементов во Вселенной. С.Чандрасекар, Х. Бете, К. Вейцеккер и другие ученые считали, что в глубинах Солнца не могут образовываться элементы тяжелее гелия.

354

Гамов предположил, что в самом Начале при больших плотностях и температурах ранней Вселенной возможно протекание реакций синтеза элементов. По законам термодинамики при этих условиях в разогретом веществе всегда должно находиться в равновесии с ним и излучение. После нуклеосинтеза, занимающего несколько минут, излучение должно остаться, продолжить движение вместе с веществом в расширяющейся Вселенной и сохраниться до нашего времени, только его температура должна понизиться за это время из-за расширения. Эту схему необходимо было рассчитать и сравнить с ней распространенность элементов в современной Вселенной. Эта работа заняла 10 лет. Гамов консультировался с Э.Ферми и А.Туркевичем, но в

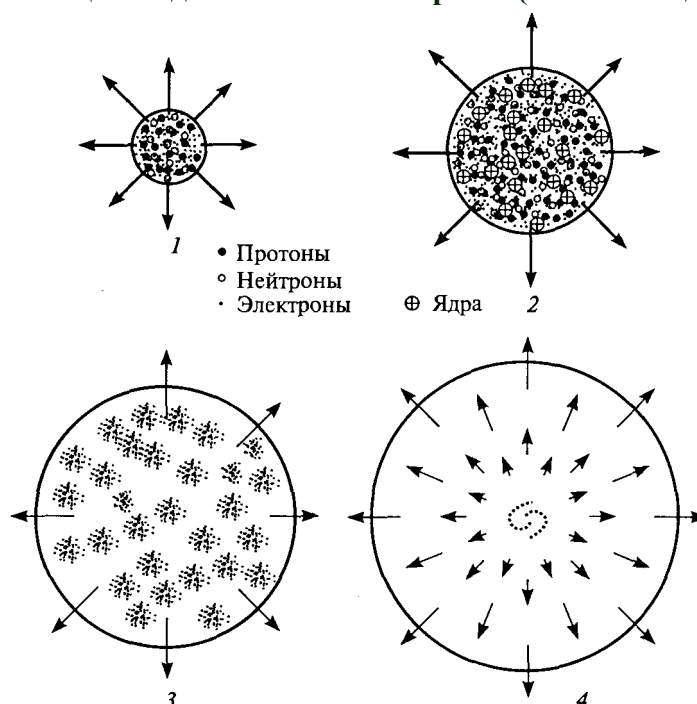
1948 г., когда вместе с Альфером была подготовлена его статья, он вписал в последний момент и Бете. Так появилась знаменитая А-Б-Г-теория. Впоследствии она совершенствовалась в работах Гамова с С.Хаяши, Хойлом, Фаулером, М.Бербиджем, Дж. Бербиджем. Этим же занимались Зельдович, а позже Дж. Пиблс, используя уточненные данные ядерной физики и астрономических наблюдений.

Теория горячей Вселенной дала необходимые соотношения водорода и гелия в современной Вселенной из ядерных реакций в ранней Вселенной. Тяжелые элементы должны были рождаться иначе, возможно, при вспышках Сверхновых звезд. Предсказанное Гамовым *фоновое излучение* (1953) должно быть изотропным с температурой, близкой к 0 К, или до 10 К, если процесс нуклеосинтеза начинался с 10^9 К (рис. 9.12).

Гамов получил простое соотношение между плотностями вещества и излучения по мере расширения Вселенной. Плотность излучения уменьшается со временем быстрее, чем плотность вещества, но в прошлом их отношение когда-то было равно единице, а еще раньше излучение по плотности преобладало над веществом. По этой причине излучению должна принадлежать ведущая роль в эволюции Вселенной. Фридман получил формулу изменения во времени плотности излучения, если оно преобладает во Вселенной над веществом, а Вселенная расширяется по параболическому типу, т. е. неограниченно. Эту формулу Фридмана и использовал его ученик Гамов. Он нашел границу между двумя эпохами — преобладания излучения и преобладания вещества, и эта граница приходится на время $t = 2,1 \cdot 10^{15} = 73$ млн лет. В начальный период именно излучение определяло судьбу Вселенной, а после преобладало вещество. В тот момент их плотности были равны $9,4 \cdot 10^{-23}$ кг/м³, а температура излучения составляла 320 К, отсюда можно найти ее современное значение: $T = 320 (2,2 \cdot 10^{15}/t) = (7 \cdot 10^{16}/t)$ К. Полученная формула дает температуру излучения в эпоху преобладания вещества над излучением (7 К). Для излучения черного тела такая температура соответствует сантиметровому диапазону. Гамов не надеялся зарегистрировать это фоновое излучение в общем потоке радиоизлучения галактик и межзвездного газа, но Новиков и Дорошкевич считали, что излучение,

355

Рис. 9.12. Схемы, поясняющие модель Большого Взрыва (1—4 — стадии развития взрыва)



оставшееся от начала расширения Вселенной, можно обнаружить в сантиметровом диапазоне.

Реликтовое излучение открыли весной того же года. Американские ученые А. Пензиас и Р. Вильсон, отлаживая рупорную антенну нового радиотелескопа, не могли избавиться от помех на длине волны 7,35 см. Уровень этих помех не менялся при повороте антенны, т.е. был изотропен. В 1965 г. выяснилось, что это было фоновое излучение, предсказанное Гамовым. Оно соответствовало расчетам Новикова и Дорошкевича, было чернотельным и имело $T = 2,7$ К. По своей плотности это излучение почти в 30 раз превосходило плотность излучения звезд, а концентрация фотонов была больше, чем концентрация обычного вещества.

Плотность реликтового излучения можно оценить. При $T = 3$ К энергия каждого фотона составляет около 10^{-22} Дж. Для 500 фотонов в 1 м³ $E = 0,5$ Дж/м³. И по формуле $E = \rho c^2$ находим $\rho = 5 \cdot 10^{-31}$ кг/м³. Сейчас для вещества $\rho = 5 \cdot 10^{-28}$ кг/м³, т.е. по массе вещество больше в 1000 раз.

Две космологические теории конкурировали — теория расширяющейся Вселенной (начальное состояние было таким горячим

356

и плотным, что могли существовать только элементарные частицы и излучение; затем Вселенная расширялась и охлаждалась, образуя звезды и галактики) и теория стационарной Вселенной (Вселенная

существовала всегда, наблюдаемое разрежение вещества компенсируется его непрерывным творением). Теория расширяющейся Вселенной одержала верх благодаря предсказанию, наблюдению и интерпретации космического фонового (реликтового) излучения. Оно не предсказывается и не может быть объяснено второй теорией.

Автор теории вечной стационарной Вселенной — Хойл — вынужден был признать, что придется модернизировать теорию для объяснения реликтового излучения. В 1992 г. измерения ничтожно малых вариаций фонового излучения подтвердили еще одно из предсказаний теории расширяющейся Вселенной. Исследователи интерпретируют эту «рябь» как флуктуации плотности вещества и энергии на ранних стадиях эволюции Вселенной. Такая рябь может объяснить сгущивание вещества под влиянием собственной гравитации, ведущее к образованию звезд, галактик и более крупных структур, наблюдаемых в современной Вселенной.

Космология Большого Взрыва Г. Гамова заняла прочное место в современной науке.

9.7. Рождение частиц по современной модели развития Вселенной

Однородное микроволновое излучение, оставшееся от ранних стадий развития Вселенной, пронизывает пространство, что подтверждают и точные исследования, проведенные со спутников. Для понимания явлений космологии используют идеи, опирающиеся на физику элементарных частиц, которая, как и ядерная физика, сыграла большую роль при создании теорий и расширяющейся, и стационарной Вселенной. Особенно ценным для них оказался вклад Эйнштейна и Планка, которые в начале века сформулировали физику абсолютно черного излучения: поскольку на ранней стадии расширения должно быть равновесие между энергией и веществом, то энергия, выделившаяся при взрыве, должна иметь спектр черного излучения.

Теория синтеза химических элементов в звездах была необходима. К началу 30-х гг. знали, что большинство звезд состоят из водорода и гелия, но было неясно, откуда берется углерод. В 50-е гг. Хойл предложил реакцию образования углерода из трех ядер гелия в специфических условиях центра звезды. Возможность такой реакции подтвердил американский физик У. Фаулер на ускорителе высоких энергий, а Хойл и Солпитер подвели под эти эксперименты теорию. К 1957 г. Фаулер, Хойл, Маргарет и Джеффри

357

Бербидж разработали теорию синтеза большинства химических элементов в звездных недрах из водорода и гелия. В звездной топке легкие элементы «сплавились» в тяжелые ядра, которые рассеялись в пространстве из-за взрыва Сверхновых или смерти красных гигантов (каким через 5 млрд лет станет Солнце). Затем цикл повторится, образуя звезды нового поколения.

Однако данная теория не могла объяснить существование трех легких элементов — лития, бериллия и бора. Из-за своей неустойчивой природы эти элементы должны образовываться в газе с низкой плотностью и низкими температурами и, первоначально присутствуя в молодых звездах, должны были распадаться при сжатии и нагревании звезды. Это оставалось загадкой. Хотя содержание каждого из них составляет менее 10^{-9} от количества водорода, уникальное происхождение этих элементов делает их «комментаторами» истории Вселенной. Подобные варианты схем рождения элементов создавались в нескольких местах, но не были привязаны к существующим во Вселенной количественным соотношениям элементов.

Первичное вещество, из которого родилась Вселенная, Алфер и Герман назвали библейским словом «илем» (от греч. *ylem* — **первичная материя**). Эта первичная субстанция представляла собой **нейтронный газ**. Они считали, что в «первичном аду» родились тяжелые ядра путем присоединения свободных нейтронов, и этот процесс продолжался, пока их запас не истощился. Алфер и Герман не могли объяснить образование элементов тяжелее гелия, поскольку нет стабильных изотопов с массовыми числами 5 и 8, значит, нельзя получать тяжелые элементы последовательным добавлением нейтронов. После этого интерес к А-Б-Г-теории заметно остыл, и за десять лет (1953 — 1963) значительных исследований не было. Хойл в шутку назвал эту гипотезу «the big bang theory» — теорией громкого хлопка. Это понравилось конкурентам Хойла, а в России его перевели как «теория Большого Взрыва».

Гипотезу холодной Вселенной начал развивать в 1962 г. Зельдович. На его взгляд, из теории горячей Вселенной следовали слишком большие плотность и температура излучения, не подтверждаемые данными радиоастрономии. Перебрав все возможные варианты, Зельдович остановился на гипотезе, согласно которой исходным веществом был холодный протон-электронный газ с примесью нейтрино, причем на каждый протон приходилось по одному электрону и одному нейтрину. Эту гипотезу Зельдович разрабатывал вплоть до обнаружения реликтового излучения.

Простой расчет опубликовали еще до этого открытия Хойл и Р.Тейлор (1964). Светимость нашей Галактики оценивают числом 10^{52} Дж/с. Если возраст Галактики 10^{10} лет, то при постоянной светимости она выделила за это время $2 \cdot 10^{61}$ Дж. При образовании одного ядра гелия выделяется энергия $2,5 \cdot 10^{-5}$ Дж. Значит, за время существования Галактики в ней образовалось 10^{66} α -частиц. При массе частицы $6,67 \cdot 10^{-27}$ кг это составляет $7 \cdot 10^{39}$ кг, а масса

358

Галактики — $4 \cdot 10^{41}$ кг. Поэтому к нашему времени отношение гелия к водороду He/H могло бы быть 7/400, или 1/57 — по массе, или 1/230 — по числу атомов. Это меньше наблюдаемого соотношения в 20 раз,

так как из анализа состава звездных атмосфер, космических лучей получается He/H порядка $1/11$. Уже из таких простых оценок понятно, как добиться согласия модели с данными соотношениями.

Плотность материи ρ во Вселенной практически совпадает с плотностью реликтового излучения. Она выражена через энергию $\rho = E/c^4$, где $E = \sigma T^4$. С другой стороны, $\rho = M/(4/3)\pi R^3$ [$R = (9GM^2/2)^{1/3}$]. Следовательно, $\rho = (5 \cdot 10^8/t^2) \text{ кг/м}^3$. Отсюда ясна связь температуры T и времени t , прошедшего от начала расширения: $T - 10^{10}/t^{1/2}$.

Сначала (при $t < 0,01$ с) температура очень высока, и вещество состоит из нейтронов и протонов в равных пропорциях. Благодаря присутствию электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино происходит непрерывное превращение $n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}$ и обратно: $p + e^- \leftrightarrow n + \nu$. При охлаждении за первые 10 с число протонов увеличится за счет нейтронов и начнется образование дейтерия, трития, изотопов гелия He-3 и He-4 . Через 100 с от начала расширения заканчиваются все ядерные превращения: водорода получается 0,9, гелия — 0,09, остальное приходится на более тяжелые элементы. По массе водород составляет около 0,7, гелий — 0,3. Это и есть химический состав Вселенной к началу формирования звезд и галактик.

Для наглядности эту стадию делят на четыре эры. Для каждой из них можно выделить преобладающую форму существования материи, в соответствии с чем и даны названия.

Эра адронов находится в самом начале, продолжается 0,0001 с. Плотность $d > 10^{14}$, $T > 10^{12}$ К, $t < 0,0001$ с. При высоких температурах могли существовать только частицы, обладающие большой массой, для которых существенно и гравитационное взаимодействие. Элементарные частицы разделяют на адроны и лептоны, причем первые могут участвовать в сильных и быстрых взаимодействиях, а вторые — в более слабых и медленных, поэтому первые эры получили такие названия. Адронная эра — эра тяжелых частиц и мезонов, велика энергия гамма-квантов. Основную роль играет излучение, количества вещества и антивещества могут быть примерно равными. В конце адронной эры происходит аннигиляция частиц и античастиц, но остается некоторое количество протонов. Из равновесия с излучением вышли последовательно гипероны, нуклоны, K - и π -мезоны и их античастицы.

Эра лептонов продолжается $0,0001 < t < 10$ с, при этом $10^{10} \text{ К} < T < 10^{12} \text{ К}$; $10^7 < d < 10^{17} \text{ кг/м}^3$. Основную роль играют легкие частицы, принимающие участие в реакциях между протонами и нейтронами. Постепенно из равновесия с излучением вышли μ -мезоны и их античастицы, электронные и мезонные нейтрино, а избыточные мюоны распались на электроны, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино. В конце эры лептонов происходит аннигиляция электронов и позитронов. Через 0,2 с Вселенная становится прозрачной для электрон-

359

ных нейтрино, и они перестают взаимодействовать с веществом. Согласно теории, эти реликтовые нейтрино сохранились до нашего времени, но температура их до 2 К, поэтому пока их не могут обнаружить.

Фотонная эра приходит позже и продолжается 1 млн лет. Основная доля массы — энергии Вселенной приходится на фотоны, которые еще взаимодействуют с веществом. В первые 5 мин эры происходили события, во многом определившие устройство нашего мира. В конце лептонной эры начались взаимные превращения протонов и нейтронов друг в друга. К началу эры фотонов количества их были примерно равными. При уменьшении температуры протонов стало больше, поскольку реакции с образованием протонов оказывались энергетически более выгодными и, значит, более вероятными. Это определило скорости реакций, и к началу эры число нейтронов составило 15 %.

Эра излучения в начале характеризуется параметрами: $3000 \text{ К} \ll T < 10^{10} \text{ К}$; $10^{-18} < \rho < 10^7 \text{ кг/м}^3$, нейтроны захватываются протонами, и происходит образование ядер гелия. Кроме того, за эти первые минуты некоторое количество нейтронов пошло на образование ядер бериллия и лития, а некоторое количество распалось. В результате доля гелия в веществе могла составить $1/3$. В конце эры температура снизилась до 3 000 К, плотность уменьшилась на 5 — 6 порядков, в результате чего создались условия для образования первичных атомов. Излучение отделилось от вещества, Вселенная стала прозрачной для него, и пришла новая эра — эра вещества. Излучение играет главную роль, образуется гелий. В конце эры главную роль в образовании вещества Вселенной начинает играть вещество (масса Вселенной).

В звездную эру, наступившую при $t \approx 1$ млн лет, $T \approx 3\,000 \text{ К}$ и плотности $d \approx 10^{-18} \text{ кг/м}^3$, начинается сложный процесс образования протозвезд и протогалактик.

Грандиозная картина процессов, схематично описанная здесь, разрабатывалась детально, особенную проработку получили самые первые доли секунды. Возможности исследования деталей процессов резко возросли с появлением быстродействующих ЭВМ с большими объемами памяти. Безусловно, эта картина повлияла на наше мироощущение и продолжает уточняться. Модель «горячего» начала объясняла происхождение химических элементов, их количественные соотношения сейчас, но образование крупномасштабных сгущений в пространстве или существование квазаров она не объясняла.

9.8. Модель инфляционной Вселенной. Возникновение во Вселенной крупномасштабных неоднородностей

Крупномасштабное сгущение галактик или существование самих квазаров нельзя объяснить теорией горячей Вселенной. Еще Хаббл, изучая в 20 — 30-е гг. распределение галактик с помощью

360

мощнейшего тогда 100-дюймового телескопа, выявил тенденцию образования групп галактик. Он отметил, что распределение ярких галактик неоднородно в очень больших угловых масштабах. Но при усреднении по областям определенных размеров распределение однородно. Так, вблизи галактических полюсов оно практически однородно, в пределах $10 — 40^\circ$ вообще не наблюдается ни одной галактики. Хаббл объяснил это поглощением межзвездного газа, сосредоточенного вдоль плоскости Галактики.

Космическое фоновое излучение — не единственный ключ к разгадке ранней истории Вселенной. Но почему вещество не заполняет равномерно все пространство? Ведь в крупных масштабах усреднения она однородна. Здесь теории микро- и мегамира вновь идут вместе. В теории физики элементарных частиц главный процесс — нарушение симметрии. Во Вселенной нарушение симметрии ведет к образованию космических неоднородностей.

Текстуры — это зародыши агрегатов вещества, неоднородности, появившиеся вскоре после образования Вселенной. Текстуры могли превращаться в ходе эволюции в галактики и их скопления. Они создают вариации плотности, и в этих областях гравитация более эффективно тормозит общее расширение. Если гравитация преобладает над расширением, область начинает сжиматься, увеличивая флуктуации плотности. Ньютон был уверен, что самогравитирующие облака могут возникать самопроизвольно в равномерно распределенном веществе. Но в однородной космической среде сгустки образуются не так, как кристаллы в переохлажденной жидкости. Космологи считают, что флуктуации плотности в первоначальном огненном шаре, выросшие до современных структур, не могли образоваться самопроизвольно. Поэтому они должны были быть с самого начала.

Вселенная очень неоднородна, что показывают обзоры крупномасштабного распределения галактик. Но она однородна в больших масштабах (больших сотен Мегалпарсек). Этот вывод получен из фонового излучения, содержащего информацию о свойствах Вселенной, очень далеко разнесенных в пространстве. Эти свойства оказываются совершенно одинаковыми, хотя эти точки могут идти от самого горизонта, сейчас — с расстояния 26 млрд св. лет (так как расстояние до горизонта 13 млрд св. лет). Галактики имеют тенденцию к сгущиванию, образуя *струи* и *сгущения*, которые окружают пустоты — *войды*. Пустоты достигают размеров 100 — 400 млн св. лет. Можно ожидать, что видимое распределение окажется отличным от истинного распределения материи. И говорят, что вещество во Вселенной существует в форме светящихся звезд, газовых облаков и темного вещества. Об этом свидетельствуют и наблюдения орбитальных движений звезд и газа, а масса темного вещества в виде гало составляет до 10 масс видимого объекта (его оценивают по гравитационному воздействию). Природа темного

361

вещества пока не выяснена, некоторые считают его холодным, но оно может сгущиваться под влиянием гравитации с образованием объектов от галактик до сверхскоплений.

Но почему Вселенная однородна в одних масштабах и неоднородна в других, что же послужило началом расширения пространства Вселенной? В начальный момент в точке были огромное давление и высокая температура. Давление нагретых газов вызывает интенсивное расширение — взрыв. Если взрыв происходит в воздухе, имеет место перепад давлений между горячим газом и воздухом, вызванный неоднородностью плотности расширяющегося газа. Но вещество Вселенной однородно, поэтому перепада давлений, вызывающего подталкивающую к разлету силу, нет. Огромное давление в самом начале не может служить толчком к быстрому разлету. И наоборот, большое давление ведет, согласно ОТО, к дополнительному тяготению, т. е. даже замедляет расширение.

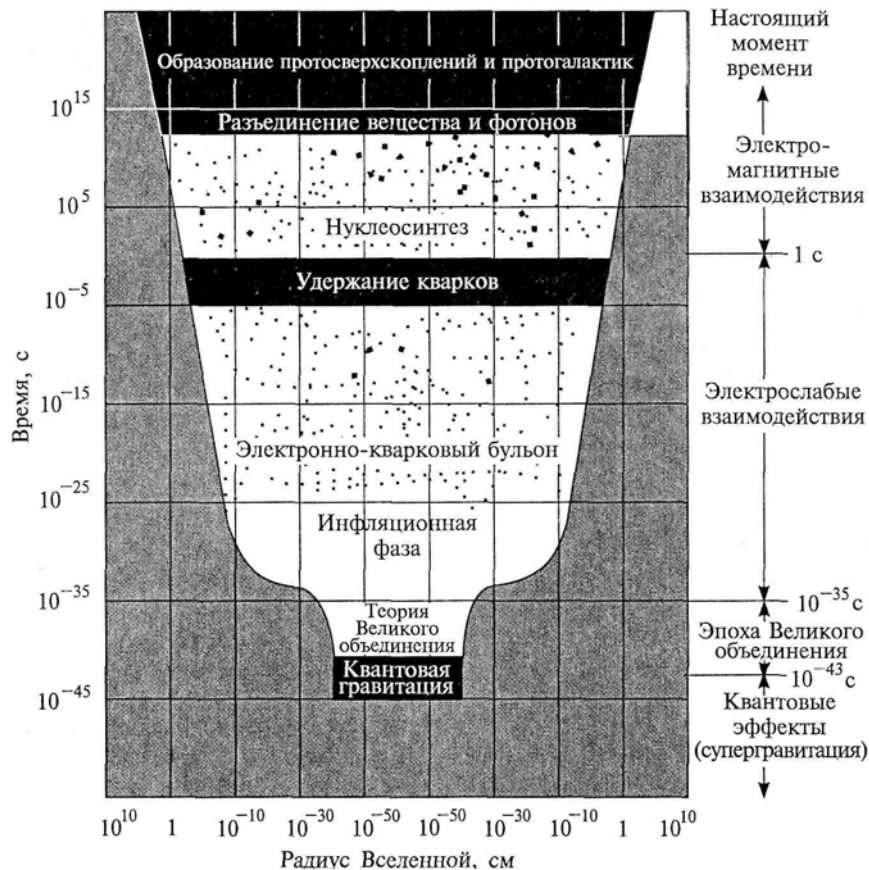
Эйнштейн ввел в теорию понятие силы гравитационного отталкивания, описываемой константой Л. Модель пустой Вселенной де Ситтера допускает, что космологическая постоянная вызывает ускоренный разлет частиц вещества. По оценкам в самом начале расширения плотность вещества во Вселенной была близка к критической. Причину этого называли «проблемой критической плотности». В теории элементарных частиц получено, что при сверхбольших энергиях возможно существование монополей, струн (см. 2.8). *Монополи* — это своеобразные частицы, которые в 10^{16} раз массивнее протонов, возникали в эпоху Великого объединения, но в процессе дальнейшей эволюции Вселенной они частично аннигилировали, но должны еще быть. Может, они входят в «скрытую массу» Вселенной, ведь ее плотность в 30 раз превосходит плотность обычной материи. Современная теория вакуума признает существование разных вакуумов, зависящих от способа его получения. Вообще, вакуум — это состояние с минимальным значением энергии, ниже которого уже нельзя опуститься. Если даже удалить все частицы и поля, остается состояние «кипения пустоты». Оказывается, вакуум в некоторых случаях может обладать положительной плотностью энергии, плотностью массы и отрицательным давлением (натяжением). Эти особые свойства вакуума и приводят к увеличению космологической постоянной, которая меняет ситуацию, вызывая гравитационное отталкивание.

По теории А. Гута и П. Сейнхардта, раздувание очень ранней Вселенной было сильным и кратковременным (рис. 9.13). Поэтому нас будет интересовать состояние вакуума, полученного при резком охлаждении Вселенной. Раздувание должно происходить по экспоненте, если силы вакуума становятся преобладающими во Вселенной.

Силы «антигравитации» становятся больше гравитационных, и это служит первотолчком к расширению с ускорением. В 70-е гг.

362

Рис. 9.13. Инфляционная модель развития Вселенной — последовательность событий в очень ранней Вселенной



советские физики Д. А. Киржниц и А. Линде показали, что такие условия могут возникать во Вселенной при больших давлениях и резком снижении температуры от очень больших значений, превышающих температуру эпохи Великого объединения. Эффекты квантовой гравитации, по теории Линде, приводят к возможности возникновения вакуумоподобных состояний, когда существует гравитационное отталкивание. Согласно теориям сверхплотной материи, такие состояния могут возникать по нескольким причинам. Плотности эти соответствуют энергиям почти планковским: 10^{19} ГэВ = 10^{32} К. Такую энергию частицы имели в момент порядка $3 \cdot 10^{-44}$ с. Можно вычислить, что в этот момент плотность материи $\rho = 10^{97}$ кг/м³ и тоже называется планковской. Таким образом, в это время при условиях, близких к планковским, существовало вакуумоподобное состояние, приведшее к инфляционному раз-

363

дуванию. Все локальные скупивания в течение фазы раздувания, или инфляции, сильно расширились, все микроскопические квантовые флуктуации превратились в макроскопические вариации плотности, из которой в будущем образовались структуры. Теория фазы инфляции основана на законах квантовой механики, но квантовые флуктуации настолько велики, что приходится подгонять ряд параметров модели.

Модель раздувающейся, или инфляционной, Вселенной точно совпадает с описанием наблюдаемого мира, начиная с 10^{-30} с после Начала. Даже в эти микроскопические доли секунды наблюдается отличие модели. В раздувающейся Вселенной сначала была фаза инфляции (раздувания), когда диаметр Вселенной очень быстро увеличился — в 10^{50} раз больше, чем предполагалось в модели Большого Взрыва. Последствия этого раздувания велики, они приводят к выводу, что наблюдаемая нами Вселенная — часть всей Вселенной. Модель полагает, что Начало было 10—15 млрд лет назад из сингулярного (сверхгорячего и сверхплотного) состояния, расширение пространства продолжается. Эти модели объяснили и реликтовое излучение, и красное смещение в спектрах далеких галактик, и первоначальное содержание легких элементов. Используя данные о мире элементарных частиц, космологи теперь пытаются подобраться почти к самому Началу, к моменту в 10^{-45} с после начала расширения. Приходится что-то предполагать о таком экзотическом состоянии, например, о существовании большого числа магнитных монополей.

Модель инфляционной Вселенной позволяет уменьшить число таких «экзотических» частиц. Считается, что в указанные времена законы физики не менялись, состояние описывалось квантовой гравитацией. Вещество было равновесно и однородно. Это был горячий газ элементарных частиц, заполняющий все пространство и расширяющийся вместе с ним. Этот газ отличается от идеального. В 1970 г. расчет Хайвели показал, что водород был в металлической фазе, т.е. его кристаллизация привела к возникновению не только упорядоченной решетки, но и металла, свойства которого похожи на свойства металлического натрия.

Открытие магнитного поля Юпитера навело в то время на мысль, что ядро этой планеты состоит из металлического водорода. В таком состоянии водород мог раскалываться на фрагменты. Возможно, что после фазового перехода могли появиться молекулярные кристаллы.

Подобные фрагменты с молекулярно-кристаллической структурой соответствуют по массе наиболее крупным спутникам Юпитера и Сатурна, а фрагменты, состоящие из металлического водорода, превосходят по массе Землю и на 1 — 2 порядка менее массивны, чем планеты-гиганты. Но изменения состояния вещества и излучения были много медленней, чем в исследуемые времена. Эта модель объясняет упомянутые события через 1 с после Нача-

364

ла, позволяя предсказывать и другие явления, которые можно проверить.

Изотропность реликтового излучения, или однородность наблюдаемой Вселенной в больших масштабах, пытается объяснить модель Большого Взрыва. Из-за конечности скорости света всегда существует горизонт — максимальное расстояние, на которое сигнал успел распространиться со времени начала расширения Вселенной. Расстояние между источниками реликтового излучения, находящимися в противоположных направлениях на небесной сфере, в 90 раз превышало расстояние до горизонта в момент излучения.

Спектр начальных неоднородностей задают для объяснения неоднородностей в малых масштабах. Это предположение введено для объяснения сгущения вещества в галактики, скопления галактик, сверхскопления скоплений и т. д. Еще одно слабое место теории, как указывалось выше, — это плотность энергии во Вселенной. По ОТО, тип кривизны пространства определяется плотностью энергии: если она больше критической, определяемой темпом расширения, то пространство замкнуто, если меньше — незамкнуто, если равна — пространство плоское. Последний случай соответствует неустойчивому состоянию, которое никогда не меняется в идеальных условиях. Если в начале она была хоть немного отличной от критической, то это отклонение быстро росло бы со временем. По современным данным, значение отношения плотностей энергии равно от 0,1 до 2. Чтобы попасть в этот диапазон значений параметра, в начале должно быть отличие от 1 с погрешностью до 10^{-15} с. Эти приближения заложены в начальные условия стандартной модели Большого Взрыва.

Электромагнитные силы, порождаемые плазмой, играют более существенную роль в формировании Вселенной, чем гравитация, считает шведский астрофизик Х. Альфен. Межзвездное пространство заполнено длинными «нитеями» и другими структурами, состоящими из плазмы. Силы, понуждающие плазму создавать такие фигуры, заставляют ее образовывать галактики, звезды и звездные системы. Он считает, что Вселенная расширяется под влиянием энергии, выделяющейся при аннигиляции частиц и античастиц, но расширение происходит медленней. Ряд идей Альфена, родившихся из экспериментов с мощными плазменными генераторами, подтвердились опытами на космических аппаратах в Солнечной системе. Космологические модели, основанные на идеях Альфена и данных о плазме, разрабатывает на суперкомпьютерах в Лос-Аламосе группа сотрудников под руководством Э. Ператта. Один из расчетов показал, как нитевидные структуры из плазмы могут дать равномерный микроволновый фон, открытие которого подтвердило модель Большого Взрыва. Есть расчеты, показывающие, как электромагнитные силы могут участвовать вместе с гравитацией в образовании галактик из облаков плазмы. При этом получаются все известные формы галактик без дополнительных предположений о существовании темного вещества, которое вводят в другие модели эволюции Вселенной.

365

Иначе истолковывает красное смещение и закон Хаббла американский астроном Х.Арп. Он называет соотношение Хаббла «единственным шатким предположением, лежащим в основе современной астрономии и космологии». Арп сообщает, что он наблюдал много объектов, которые не следуют закону Хаббла. Он считает, что квазары, обладающие наибольшим красным смещением, на самом деле находятся не на краю Вселенной, как следует из закона Хаббла, а не далее, чем все галактики, хотя их красное смещение много меньше. Ему даже кажется, что квазары могут быть «ответвлениями» галактик.

Идеи Великого объединения взаимодействий на основе симметрии, которая спонтанно может нарушаться, развивает современная теория элементарных частиц. В равновесном состоянии этих нарушений симметрии нет. Но при температурах порядка 10^{27} К возможны фазовые переходы среди барионов (протонов и нейтронов). Закон сохранения барионного числа исходит из стабильности протонов, поскольку время его жизни порядка 10^{31} лет, что известно из опытов. Из теорий Великого объединения *известно, что барионное число сохраняется не точно. При высоких* температурах закон нарушается, и этим объясняется зарядовая асимметрия нашей Вселенной. Наблюдаемый избыток вещества над антивеществом — следствие взаимодействия элементарных частиц при температурах чуть ниже критической температуры фазового перехода. При кристаллизации жидкости различные области — *домены* — могут кристаллизоваться с разным направлением осей. Домены растут, приходят в соприкосновение друг с другом, при этом энергетически выгодно совпадение осей на границах соприкосновения. Но это получается не всегда, и остаются «локальные дефекты». Точечным дефектам соответствуют магнитные монополи, а поверхностным — стенки доменов.

Модель инфляционной Вселенной Алана Гута (1980), детально анализирующая нарушение симметрии при фазовых переходах в столь необычных условиях, сумела уменьшить некий произвол с монополями. Андрей Линде исправил некоторые допущения модели, сохранив ее достоинства. Впервые была сделана попытка разрешить одну из основных проблем мироздания — возникновение всего из «ничего». Энергию Вселенной,

которая сохраняется, разделили на гравитационную и негравитационную части, которые имеют разные знаки, и тогда полная энергия Вселенной равна нулю. Если предсказываемое теориями Великого объединения несохранение барионного числа подтвердится, то тогда ни один из законов сохранения не будет препятствовать рождению Вселенной «из ничего». Пока же эти модели дают только предполагаемый механизм, который можно на основе фантазии и знаний рассчитывать на компьютерах.

366

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Поясните, что такое «галактика», каковы форма и строение галактик. Где находится Солнечная система в нашей Галактике?
2. Каковы источники энергии звезд? Дайте представление об эволюции обычных звезд и красных гигантов и поясните процессы, происходящие в их недрах. Какова перспектива эволюции Солнца?
3. Расскажите, что такое Вселенная, каковы ее размеры, какие объекты ее составляют и какие модели развития Вселенной Вам известны.
4. Назовите эмпирические подтверждения расширения Вселенной. Что означают понятия «стационарность» и «нестационарность» Вселенной, какова природа реликтового излучения?
5. Какие наблюдения подтвердили модель Большого Взрыва?
6. Как связаны общая теория относительности и модель расширяющейся Вселенной?
7. Почему в результате первичного нуклеосинтеза не могли образоваться химические элементы, существующие сейчас во Вселенной?
8. Каково содержание и значение закона Хаббла? Опишите эволюцию Вселенной от Большого Взрыва до начала первичного нуклеосинтеза.
9. Дайте представление об инфляционной теории рождения Вселенной.
10. Опишите процессы эволюции Вселенной от ее «просветления» до образования галактик и звезд.

Глава 10. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАРОЖДЕНИЯ СТРУКТУР В МИРЕ ПЛАНЕТ

10.1. Элементы планетной космогонии

За последние 300 лет было предложено несколько космогонических гипотез относительно ранней истории Солнечной системы. Нужно было объяснить: почему орбиты всех планет почти круговые и лежат почти в одной плоскости, совпадающей с экваториальной плоскостью Солнца; почему массы планет составляют 2 % массы Солнца, но обладают 98 % момента импульса Солнечной системы; почему направление обращения вокруг Солнца одинаково почти для всех планет и совпадает с направлением вращения Солнца и вращением вокруг собственных осей; почему все планеты делятся четко на две группы, отличающиеся физическими данными, и пр.

По теории Декарта, мировое пространство было заполнено эфиром — всепроницающей жидкостью, частицы которой участвуют в непрерывном вихревом движении. Эти вихри и закручивают планеты. И.Ньютон предложил теорию, согласно которой небесные тела возникли из разреженной материи из-за неравномерного распределения плотности. Но он не мог объяснить, почему планеты движутся по орбитам, и заявил, что здесь не обошлось без божественного вмешательства. Его сотрудник У. Уистон, стараясь не прибегать к религии, полагал, что сначала Земля была кометой, которая вращалась вокруг Солнца, потом столкнулась с другой кометой, и в результате она стала вращаться и вокруг своей оси. Вопрос о возрасте Земли и незаметных в короткие промежутки времени изменениях, которые могут накапливаться на больших интервалах времени, стал обсуждаться в XVIII в. Французский зоолог Жорж Луи Леклерк, граф Бюффон, считал (1745), как и Ньютон, что материя, из которой возникли все планеты, была выброшена из недр Солнца скользящим ударом кометы. Он использовал также идею Лейбница, согласно которой Земля ранее была светящимся телом, а потом остыла. Бюффон даже ставил опыты с раскаленными шарами и заключил, что Земле потребовалось бы для охлаждения примерно 75 тыс. лет, что противоречило Библии. Он сумел объяснить одинаковое направление вращения планет и расположение их почти в одной плоскости. В 1749 г. он написал работу «История и теория Земли», после чего на него начались гонения, заставившие его отречься от нее. Его идеи, еще наивные, вводили историзм в естествознание, заложили основу естественно-научной космогонии и вызвали первую небулярную гипотезу происхождения планет (от лат. *nebula* — туман, облако).

368

Естественно-научные взгляды философа И.Канта сформировались под влиянием идей Ньютона и Бюффона. Кант считал Вселенную (с центром на Сириусе!) подчиненной строгой иерархии, возникшей под действием сил притяжения и отталкивания в первичной туманности (холодном облаке пыли). Поэтому ее возникновение и развитие он описывал по уровням — от планет до туманностей. Главная сила — всемирное тяготение, но могут быть и другие, еще неизвестные силы. Такова, например, предложенная им сила отталкивания, действующая на уровне отдельных частиц и проявляющаяся на начальных стадиях образования. Из-за действия химических сил при соединении частиц материя в пространстве может распределяться неоднородно. Чем больше плотность, больше и притяжение, и возникшие сгустки укрупнялись. Это предположение при разработке теории гравитационной неустойчивости использовал Джинс. По Канту, орбитальное движение планет возникло «после нецентрального удара частиц как механизма возникновения первичной туманности». В этом философ ошибся — движение могло начаться только при косом ударе туманностей. Он не делал большой разницы между планетами и кометами, даже предполагал, что у Земли может возникнуть хвост. Кант обсуждал действия, которые может вызвать теплота недр планеты. Он считал причинами, противодействующими стремлению к «равновесию», химические процессы внутри Земли (1754), которые зависят от космических сил и проявляются в виде землетрясений и вулканической деятельности. В предисловии к книге «Общая естественная история и теория неба, или опыт об устройстве и механическом происхождении всего мироздания на основании ньютоновских принципов» (1755) Кант писал: «Дайте мне материю, и я построю из нее мир!».

Из анализа имеющихся данных Кант сделал удивительно верные выводы о возможности существования планет далее Сатурна и даже о том, что его кольца состоят из метеоритов, причем подобные кольца могут быть и у других планет. В одной из частей его книги была изложена позиция на возможность жизни на других планетах, для чего Кант собрал имеющиеся сведения о необходимых для жизни температуре, плотности веществ, силе тяжести. И хотя в обществе тогда были распространены идеи о жизни на звездах, планетах и кометах живых существ, он выделил в качестве пригодных для жизни только Венеру и Юпитер.

П.Лаплас исходил из горячей медленно вращающейся туманности, которая по мере охлаждения сжималась. По закону сохранения момента импульса при этом росла скорость вращения и центробежные силы отрывали от нее кольца. Материя в этих кольцах сжималась под действием тяготения, формируя компактные тела. Ученик Лапласа, французский математик Э.Рош, показал, что периоды центрального сгущения туманности должны чередоваться с периодами сокращения ее массы, во время которых про-

369

исходят отрывы экваториальных колец раскаленного вещества. Но причины отрывов оставались непонятными. Фактически эта гипотеза была разработана математиками как задача теоретической механики с неизменными параметрами. Она не объясняла размеров орбит планет-гигантов и медленности вращения Солнца, не отвечала на вопрос, почему момент импульса планет, масса которых составляет всего 0,13 % массы Солнечной системы, почти в 29 раз больше момента импульса Солнца, если Солнечная система изолирована. Это обстоятельство, казалось, требовало ввести в Солнечную систему вмешательство какой-то внешней силы.

Небулярная гипотеза Канта — Лапласа оставалась первой ротационной гипотезой о возникновении Солнечной системы вплоть до конца XIX в.

Приливная или планетозимальная, гипотеза стала популярной в начале XX в.: американцы Т. Чемберлен и Ф. Мультон рассмотрели идею встречи Солнца со звездой, вызвавшей приливной выброс солнечного вещества (1906), из которого и образовались планеты. Дальнейшее развитие происходило в соответствии с гипотезой Канта—Лапласа. С.Аррениус допустил и прямое столкновение Солнца со звездой (1913). В результате появилось некое волокно, распавшееся при вращении на части — основу для планет. Но близкое прохождение звезд — столь редкое явление, что может случиться раз в 10^{17} лет. Дж.Джинс предположил (1916), что какая-то звезда прошла неподалеку от Солнца и вызвала некие «приливные выступы», принявшие форму газовых струй, из которых и возникли планеты. Поэтому орбиты планет были сначала сильно вытянутыми, но из-за огромного сопротивления пылевой среды между двумя звездами постепенно приближались к круговым. Джинс выделил большую роль Солнца в развитии планет и подошел к решению проблемы перетока вещества в системе тесной двойной звезды как явления не случайного.

Б.Рассел подсчитал (1935) момент импульса приблизившейся к Солнцу звезды — он оказался на порядок меньше среднего момента импульса планет. Ему пришлось предположить, что Солнце в прошлом было двойной звездой. Спутник Солнца вращался от него на расстоянии орбиты Урана или Нептуна, какая-то внешняя звезда столкнулась с ним, отбросила его за пределы Солнечной системы и удалилась сама. Английский астроном Литтлтон высказал идею (1936) о принадлежности Солнца в прошлом к тройной звездной системе. Он рассчитал, что при движении двух звезд в разном направлении образующаяся между ними лента вещества могла быть захвачена Солнцем. Советский астроном Н. Н. Парийский, исследуя разнообразные возможности этого процесса при разных скоростях сгустка, вырванного из Солнца, получил, что только при скоростях 400 — 500 км/с возможно получить подходящие орбиты для планет.

370

В гипотезе шведского астрофизика Х.Альфена (1942) сделано предположение о захвате Солнцем облака **межзвездного газа**. Атомы газа ионизовались при падении на Солнце и стали двигаться по орбитам в его магнитном поле, поступая в определенные участки экваториальной плоскости. Расчет дал области расположения только внешних планет. Академик О. Ю. Шмидт, один из организаторов освоения Северного морского пути, отказался от изолированности Солнечной системы. Он считал, что если «обратиться к ее движению в Галактике, то отпадет затруднение с моментом количества движения, так как Солнце могло захватить из Галактики материю, обладающую достаточным моментом».

Если считать, что на Землю в сутки падает 1 т метеоритов, то для «вырастания» ее таким путем нужно около 7 млрд лет, а по геологическим данным возраст земной коры оценивается в 3 млрд лет (кора может быть моложе внутренних областей планеты). При образовании планет из метеоритов стало преобладать одно направление вращения планет, орбиты становились почти круговыми. Расчеты Шмидта дали верные расстояния планет от Солнца и определили направление осевого вращения планет; они показали период вращения Солнца в 20 сут (сейчас 25 сут), что считается хорошим результатом. Можно сказать, что Шмидт вернулся к небулярной гипотезе Канта—Лапласа на новом уровне науки, заменив газопылевое облако метеоритным роем. Слипание пылинок приводило к неким твердым фрагментам (**планетезиμαлиям**), которые дали начало протопланетам.

Академик В.Г.Фесенков, один из основоположников астрофизики, считал, что образование планет связано с переходом от одного типа ядерных реакций в глубинах Солнца к другому. Условия равновесия требовали выброса массы Солнца, и этот выброс соответствовал расчетам английского астронома и математика Дж.Дарвина (сына Ч.Дарвина) и русского ученого математика и механика А. М.Ляпунова. Они независимо рассчитали фигуры равновесия вращающейся жидкой несжимаемой массы. Согласно О.Струве, быстро вращающиеся звезды могут выбрасывать вещество в плоскости своих экваторов. В результате этого образуются газовые кольца и оболочки, а звезда теряет массу и момент количества движения. Гипотеза Фесенкова связала жизнь в Солнечной системе в единое целое и избавила космогонию планет от внешних случайных факторов.

Выяснение природы *планетарных туманностей*, начатое Гершелем, имеет особое значение в космогонии планет. Эти туманности возникают из отделившихся наружных оболочек красных гигантов, тогда как ядра этих звезд достаточно быстро, по космическим масштабам, превращаются в белые карлики. Эти чрезвычайно плотные звезды известны давно, но в последние 30 лет стало ясно, как они «вызревают» внутри «нормальных» звезд при

371

их эволюции. За последние годы удалось обнаружить за пределами нашей системы более 60 планет;

ближайшая планета обнаружена в августе 2000 г. в системе звезды эпсилон Эридана, и она имеет размеры, близкие к размерам Юпитера.

Эволюцию газопылевого комплекса по разным моделям при разных начальных условиях рассчитывают теперь на ЭВМ. При определенных значениях массы, плотности и температуры такой газопылевой комплекс начинает сжиматься; возникающие неоднородности разрывают его на фрагменты, из которых при сжатии образуются протозвезды (для Солнца это было около $5 \cdot 10^9$ лет назад). Под действием центробежных сил в экваториальной области Солнца возникли неустойчивые нестационарные потоки газа и пыли, и часть этого вещества оторвалась, унеся с собой избыточный момент количества движения. В экваториальной плоскости Солнца образовался и рос газопылевой диск, появились условия для рождения планет. Во вращающемся и сжимающемся фрагменте, потерявшем часть вещества на образование диска, росли температура и давление, препятствующие дальнейшему сжатию. Во внешних слоях возникли бурные процессы, вызывающие огромные токи в ионизованном газе и сильные магнитные поля. Когда температура достигла 10^6 К, начались термоядерные реакции, и наше Солнце «загорелось» (прошло 10^8 лет).

Протопланетное облако к этому времени представляло собой кольцо, в котором при уплотнении пылинки слипались между собой. Солнце нагревало внутреннюю часть этого кольца, вызывая испарение, выгоняя солнечным ветром более легкие элементы в более дальние части кольца, где они «замерзали» ($T = 50$ К). Так происходило образование двух групп планет (рис. 10.1). Планеты земной группы образовались почти за те же 100 млн лет. В зависимости от расстояния до Солнца разные части туманности остывали с разной скоростью, что привело к неоднородности протекания химических процессов, усиливающейся давлением солнечного излучения и корпускулярным излучением Солнца. В разных частях облака возникали неоднородности, отразившиеся на составе планет. Космологи Я.Б.Зельдович и И.Д.Новиков рассчитали, что сохранение некоторой вязкости (ее роль может играть магнитное поле) может обеспечить возможность усвоения теряемого звездой момента количества движения. Истекающее вещество, которое может коллапсировать к своему центру, при последующих охлаждении и конденсации может служить источником протопланетного материала. Из недифференцированного вещества внешних слоев Сверхновой звезды могут возникнуть внешние планеты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), в которых сохранились газы с преобладанием водорода, а из внутренних слоев — внутренние планеты (Меркурий, Венера, Земля, Марс).

Химическая эволюция протекала по-разному: сначала конденсировались наиболее тугоплавкие элементы и их соединения, потом — летучие. Аккумуляция конденсатов в планеты и метеоритные тела началась еще до завершения процессов конденсации. Агломерация твердых частиц и жидких капель в планетные тела связана, вероятно, с появлением первых конденсатов железа.

372

Рис. 10.1. Формирование планет из протосолнечной туманности



Сгущение их высокотемпературной части привело к образованию ядер планет, обогащенных железоникелевым сплавом. Вокруг них оседали магнезиально-силикатные породы, образовавшие первичные мантии. Поздние конденсаты — гидратированные силикаты, органические вещества и летучие соединения.

В настоящее время распространена кометная гипотеза происхождения планет А.А. Маркушевича (1992). В газопылевой туманности, имеющей вид дискообразного вращающегося облака и состоящей из мелких пылевидных железосиликатных частиц и газов — воды и водорода, при понижении температуры газы намерзали на пылинки, увеличивая их размер. Возникал состав, свойственный составу комет. Частицы сталкивались между собой, большие по объему концентрировались в центре туманности (на месте современного Солнца), а меньшие оттеснялись на периферию, дав начало планетам. Шло укрупнение и разрастание образующихся тел — астероидов, комет, планет. Центральная масса при своей концентрации способствовала выделению теплоты, и ее оказалось достаточно для развития термоядерных реакций горения водорода и гелия. При образовании планет происходила аккреция (стяжение кометной массы), выделялась

теплота, которая разогревала центр сгустка до расплавленного состояния и расслаивала водородную оболочку и железосиликатное ядро. Позже

373

оно расслоилось на железоникелевое ядро и силикатную оболочку, которая не позволяла рассеиваться теплоте в космическое пространство. Так планета приобрела почти сферическую форму.

За счет концентрации в ядре более тяжелых масс скорость ее вращения возрастала и часть расплавленного материала была выброшена центробежными силами за пределы планеты. Выброшенное вещество сформировалось в астероиды, метеориты и спутник — Луну. Оболочка Земли постепенно менялась и исчезала в космосе за счет солнечного излучения, обнажился железосиликатный расплавленный остов планеты. Начались геологические процессы формирования земной коры и остывания атмосферы.

Происхождение **регулярных спутников**, вращающихся в направлении вращения планеты, аналогично образованию планет. Спутники есть почти у всех планет. Если же спутник вращается в другую сторону, то его происхождение связывают с захватом газопылевого облака. С XVIII в. более пристальный интерес вызывали кометы и спутник Земли — Луна.

На больших расстояниях от Солнца кометы — это глыбы твердого вещества (обычного льда и льда из метана и аммиака) с вмороженными в них частицами метеорного вещества (силикаты и металлы). Масса комет невелика, самые крупные составляют $5 \cdot 10^{13}$ — $6 \cdot 10^{19}$ кг. При приближении к Солнцу лед начинает испаряться и вокруг ядра кометы образуется оболочка, которая под действием светового давления и солнечного ветра отталкивается в сторону от Солнца, образуя хвост кометы. Этот хвост может тянуться на сотни миллионов километров. Сейчас известно почти 1000 комет, некоторые из них возвращаются к Солнцу по нескольку раз, а другие, появившись раз, уходят в межзвездное пространство. Их орбиты сильно искажены притяжением больших планет, поэтому предполагают, что большие планеты окружены облаком из 100 млрд комет, которые вращаются вокруг Солнца по эллипсам с полуосьми около 150 000 а. е. Невооруженным глазом удастся увидеть около 6 — 7 комет за 100 лет, хотя их бывает 10 — 25 за год. Наименьший период обращения у кометы Энке-Баклунда — 3,3 года. Ее открыли в 1786 г. и потому наблюдали уже более 60 раз. Период кометы Галлея 76,03 года, последний раз она прошла перигелий 9 февраля 1986 г., ее наблюдали в Северном полушарии с середины ноября 1985 г. (см. гл. 8). Расчеты показывают, что в 9541 г. до н. э. она прошла от Земли на расстоянии, равном расстоянию от Луны до Земли.

Открытие все новых комет продолжается. В марте 1993 г. была открыта удивительная периодическая комета Шумейкер-Леви (ШЛ-9) — она имела вид цепочки-гирлянды из 21 вторичного ядра, расположенного вдоль прямой линии. Эта комета-поезд из 21 вагона образовалась из-за развала огромного «родительского» ледяного ядра при сближении его с Юпитером в 1992 г. до расстояния 40 тыс. км. Через год после открытия,

374

в июле 1994 г., эта комета столкнулась с Юпитером (выделив энергию в тротиловом эквиваленте 1 МТ) и закончила свое существование. Что-то подобное (меньших масштабов) произошло на Земле 30 июня 1908 г., когда снежный шар диаметром 120 м, вторичный фрагмент ледяного ядра кометы Энке, столкнулся с атмосферой Земли. В районе Подкаменной Тунгуски шар взорвался на высоте 8 — 9 км и получил название Тунгусского метеорита (но метеорита не нашли, поэтому более верное название — Тунгусское диво-комета). При этом выделилась энергия, эквивалентная 450 Хиросимам. Если бы это произошло на 4 ч позже, то взрыв произошел бы над Санкт-Петербургом. А 65 млн лет назад с Землей столкнулось ледяное ядро диаметром 10 км, в результате на полуострове Юкатан образовался ударно-взрывной кратер. Поскольку кометы несут до 30 % пыли, которая при взрыве поднимается вверх и закрывает Солнце, через 3 — 4 месяца температура на поверхности Земли снизилась до -50°C . Американские ученые Л. и В.Альваресы полагают, что с этой катастрофой связана гибель динозавров.

Изучение астероидов началось в XX в. Первый астероид — Церера — был открыт итальянским астрономом Лд. Пиацци 1 января 1801 г. Вскоре он «потерял» эту планету, и она вновь была открыта немецким астрономом Г. Ольберсом вместе с двумя новыми. Ольберс установил, что их орбиты более вытянуты, чем у известных планет, и пересекаются. Поэтому он предположил, что это — малые тела, оставшиеся от раскола планеты в прошлом (1804). Диаметр Цереры — 770 км, Паллады — 490, Весты — 380, Юноны — 170 км, а большинства других не превышает 10 км. Сейчас известно более 3000 малых планет, вращающихся вокруг Солнца в среднем на расстоянии 2,75 а. е. Структуру пояса астероидов определяет возмущающее влияние соседних планет, в основном Юпитера и Марса. Эксцентриситеты орбит малых планет достигают 0,83, тогда как у больших — около 0,25. Дальше всех от Солнца вращается Гидальго (до 5,72 а. е.), а ближе всех — Икар (до 28 млн км). Общая масса малых планет составляет 0,001 % массы Земли, они не имеют правильных форм, о химическом составе можно судить по выпадению метеоритов из этого пояса.

Астероиды диаметром более 1 км и с орбитами, пересекающими орбиту Земли, составляют 43 %, и они могут столкнуться с ней. При этом могут возникнуть один раз в 100 тыс. лет кратеры диаметром 10 км. В июле 1968 г. астероид Икар диаметром 1,5 км прошел на расстоянии 7 млн км от Земли. В 1998 г. несколько астероидов пролетали близко от Земли: на расстоянии 15 млн км 1 апреля пролетел астероид FX-2, на расстоянии 10 млн км 12 апреля пролетел астероид EP-4, а 8 мая на расстоянии 4,8 млн км находился астероид NT-31. 22 января 1999 г. астероид AM-10 пролетел от Земли на расстоянии 12 млн км, а 17 января астероид AO-10 находился на расстоянии всего 3 млн км. Астероид VB5 7 января 2002 г. пролетел на расстоянии всего 823 тыс. км, это, вероятно, самый опасный астероид для Земли. Над проблемой защиты от астероидной опасности работают многие ученые Европы, России, США и других

375

стран. В 1996 г. Парламентская Ассамблея Совета Европы приняла резолюцию 1080 «Об обнаружении астероидов и комет, опасных для человечества». Существуют различные проекты организации защиты Земли. Много ложной информации об открытии «опасных» небесных тел сообщают СМИ, прорицатели и Интернет, но такие пророчества не подтверждаются.

10.2. Формирование малых тел Солнечной системы, Луны и Земли. Движения Земли, строение геосфер и изучение процессов

К малым телам Солнечной системы относят спутники, кометы, астероиды, метеоритное вещество и т.д. Метеором называют световое явление, возникающее на высотах от 130 до 80 км при вторжении в атмосферу частиц — метеорного тела из космоса. Несколько раз в год наблюдаются целые метеорные потоки, когда за 1 ч регистрируется не 5—15 вспышек, а до 10 000. Это означает, что Земля проходит через рой метеорных частиц, и часто источником этих частиц является хвост кометы.

Некоторые из них люди наблюдали невооруженным глазом — «огненные шары» и «падающие звезды», например. Огненные шары появлялись внезапно на ночном небе и двигались по нему с большой скоростью, разбрасывая искры и неожиданно взрываясь с большим грохотом. Сначала считали, что они имеют земное происхождение, вероятно, отсюда истоки образов Бабы-Яги и Змея-Горыныча. Космическое происхождение этих крупных метеоритов было доказано лишь в XX в. За год на Землю падает и оседает на ней почти 50 тыс. т космической материи. В основном это небольшие пылинки размером около 1 мм. Входя в атмосферу с космическими скоростями (11 — 73 км/с), они быстро теряют свою энергию на ионизацию молекул атмосферы, и мы видим явление метеора или «падающей звезды». На высотах около 80 км и выше такая пылинки быстро испаряется и гаснет, оставляя на небе на несколько секунд тонкий светящийся след. Когда масса метеорного тела около 0,1 кг, его энергия, затраченная на ионизацию воздуха, нагревание и испарение минерального вещества, настолько значительна, что можно заметить даже его угловые размеры. В этом случае мы наблюдаем *болид*, или яркий метеор, блеск которого может превышать блеск Венеры (4,5 зв. вел.).

Иногда метеорное тело при движении в атмосфере не успевает испариться и достигает поверхности Земли. Этот остаток называют метеоритом. За год на Землю попадает около 2 000 метеоритов, что за 2 млрд лет дает слой поверхности около 10 см. Анализ метеоритного вещества показал, что они бывают каменные, железные и железокосмические. В некоторых каменных есть круглые серые **частицы** (от греч. **хондры** — **пшеничное зерно**), в которых содержатся почти все химические элементы в том же соотношении,

376

как и на Солнце. Окружающее хондры вещество, как и земные породы, состоит из силикатов и минералов. Железные метеориты почти целиком состоят из никелистого железа. Такой сплав мог образоваться лишь при плавлении первичного вещества, образующего достаточно массивное тело, чтобы в нем под действием силы тяжести могло произойти отделение металлов от магмы. Все попытки на Земле создать такое вещество не увенчались успехом. Расчеты показали, что такую структуру можно получить при охлаждении от 600 до 400 °С со скоростью 1 — 10 °С за миллион лет! Поэтому формирование таких метеоритов должно происходить в недрах объекта радиусом 100 — 200 км, окруженного каменистым слоем. Хондриты также должны были разогреваться столь же медленно до 600—1000 °С на глубинах 30 — 50 км. Значит, метеориты родились из астероидов. Считают, что источником теплоты в метеоритном веществе были быстротечные радиоактивные изотопы, которых сейчас почти нет. Например, Al-26 имеет период полураспада 720 000 лет, но проверить это предположение очень трудно. Радиоактивный метод показал, что возраст метеоритов достигает 4,5 млрд лет, что согласуется с данными о возрасте Земли и Солнечной системы в целом.

Следы падений комет и астероидов сохранились в виде кратеров на поверхностях Луны, Меркурия, Марса и спутников всех планет. Если масса тела около 1 кг, то торможение в атмосфере приведет его до остановки уже на высоте 10 — 20 км и дальше оно продолжит свободное падение до поверхности Земли. Если космическое тело имеет массу 100 т и скорость за атмосферой 30 км/с, то оно достигнет поверхности Земли со скоростью 20 км/с, при массе 1000 т — скорость при ударе достигнет 30 км/с. Такие столкновения могут вызвать катастрофический взрыв. Поверхность Земли покрыта метеоритными кратерами, заметны более 130 кратеров ударно-взрывного происхождения диаметрами до 400 км. С борта космической станции они похожи на кольцевые структуры. Аризонский кратер диаметром 1,2, км и глубиной 174 м образовался из-за падения 50 тыс. лет назад астероида массой 500 тыс. т, при взрыве которого выделилась энергия, эквивалентная взрыву 250 мегатонных водородных бомб. Крупнейший метеорит находится в пустыне Адрар (Западная Африка), его масса оценивается в 100 000 т. Масса метеорита Гоба (Юго-Западная Африка) — 60 т, Сихотэ-Алинского метеорита, упавшего в 1949 г. в Дальневосточной тайге, — 23 т.

Луна — естественный спутник Земли, расположенный на расстоянии 384 000 км. Это достаточно большой спутник: ее диаметр в 4 раза, а сила тяжести — в 6 раз меньше, чем на Земле. Поэтому систему Земля — Луна подчас называют двойной планетной системой. И естественно, что Луна стала важнейшим объектом космических исследований.

При изучении Луны ведущая роль отводилась автоматическим аппаратам, позволяющим передавать ценную информацию из труднодоступ-

377

ных районов наиболее экономически выгодно. Первая такая наша станция «Луна-1», преодолевшая земное притяжение в январе 1959 г., пролетев в непосредственной близости от ее поверхности (5 — 6 тыс. км), стала первой

искусственной планетой Солнечной системы. Она зарегистрировала практическое отсутствие у Луны собственного магнитного поля и наличие солнечного ветра — потоков плазмы в межпланетном пространстве. В сентябре того же года «Луна-2» достигла лунной поверхности в восточной части Моря Дождей в районе кратеров Архимед и Автолик. Так впервые произошел непосредственный контакт с иным небесным телом. Уже через месяц «Луна-3» сфотографировала обратную сторону Луны, недоступную ранее, и оказалось, что на ней мало морей и больше кольцевых образований. Глобальный обзор ее поверхности завершила станция «Зонд-3» в июле 1965 г., после чего были составлены карта и глобус Луны. Станции «Луна-4» — «Луна-9» исследовали окололунное космическое пространство, а «Луна-9», совершившая мягкую посадку в районе Океана Бурь, не провалилась в грунт (ранее считали, что Луна покрыта толстым слоем пыли). Она передала на Землю панораму лунной поверхности. Последующие станции «Луна-10», «Луна-П», «Луна-12» исследовали радиационные поля, они работали как спутники Луны и передавали снимки различных участков поверхности с небольших расстояний. Станция «Луна-13», «прилунившаяся» в районе Океана Бурь в 1966 г., провела ряд экспериментов — были измерены плотность лунного грунта и его механические свойства. Лунный грунт темно-серого цвета, он легко слипался в комки, как влажный песок, но отличался от земных грунтов чрезвычайно низкой теплопроводностью. В нем были обнаружены прозрачные и мутноватые шарики, в зависимости от угла падения света он приобретал различные оттенки цвета.

Эти исследования позволили СССР приступить к проектированию станций нового типа, позволяющих вернуться с Луны на Землю (станции «Зонд-5», «Зонд-6»). Затем «Луна-15» отрабатывала трассу полета и посадку в заданный район, а «Луна-16» — доставку на Землю лунного грунта. И такие образцы грунта с нашего спутника из северо-восточной части Моря Изобилия автоматически (без непосредственного участия человека) были доставлены в земную лабораторию осенью 1970 г. В них содержалось около 70 химических элементов и изотопов, по которым установили возраст пород и их происхождение. Тогда же станция «Луна-17» доставила на Луну «Луноход-1», который перемещался по поверхности Луны в течение почти 10 месяцев, обследовав район Моря Дождей и передав на Землю более 200 панорам поверхности. Были проведены анализы лунного грунта и химического состава пород. Затем заработал и «Луноход-2», который изучал зоны материк — море. Станция «Луна-24» отобрала образцы грунта с глубин до 2 м и доставила их на Землю. Так было получено и доставлено в земную лабораторию 420 кг образцов грунта из 9 районов Луны, определен химический и минералогический состав, установлено внутреннее строение спутника нашей планеты. А в 1969 г. на Луну ступила нога человека — американского астронавта Нейла Армстронга, вышедшего из посадочного модуля космического корабля «Аполлон-11».

Исследование образцов лунного грунта показало, что в период формирования Луна была разогрета до температуры 1000 К. Види-

378

мо, это связано с падением на нее огромного числа метеоритов, что отразилось на ее поверхности. На несколько метров вглубь образовался особый слой — лунный *реголит*, который составлен из спекшихся пород (большой частью базальтовых). Реголит — хороший теплоизолятор, не позволяющий проникнуть резким колебаниям температур глубже нескольких десятков сантиметров (из-за отсутствия атмосферы колебания температуры на поверхности составляют от +130 до -170 °С). Анализ структуры кристаллических пород позволяет сделать вывод, что они когда-то были полностью расплавлены, а потом быстро охладились. Присутствие базальтов свидетельствует об активной вулканической деятельности, которая почти прекратилась около $3 \cdot 10^9$ лет назад. Возраст пород находится в пределах $(3,23 — 4,65) \cdot 10^9$ лет, т.е. Луна образовалась почти одновременно с Землей. В некотором смысле Галилей оказался провидцем, когда назвал обширные темные территории на Луне морями: когда-то лава вытекала через отверстия в коре, заталивая эти участки. Истечение лавы длилось почти 10^9 лет, о чем известно из исследования лунных пород. Странно, что ее материал содержит повышенное количество тугоплавких литофильных элементов и очень малое число летучих. Недавно установлена возможность существования льда в глубинных частях кратеров, хотя у Луны нет ни воды, ни атмосферы. В отдельных местах лунной поверхности зафиксировано небольшое истечение вулканических газов.

Происхождение Луны — предмет ряда гипотез. Одна из них основана на теориях Джинса и Ляпунова — Земля вращалась очень быстро и сбросила часть своего вещества, другая — на захвате Землей пролетающего небесного тела. Наиболее правдоподобна гипотеза столкновения Земли с планетой, масса которой соответствует массе Марса, происшедшего под большим, «скользящим» углом, в результате которого образовалось огромное кольцо из обломков (железное ядро Земли при этом не пострадало), что и составило основу для Луны (железа на Луне очень мало). Похоже, что она образовалась вблизи Солнца за счет самых ранних дометаллических конденсатов при высоких температурах. Странными оказались аномалии магнитного поля, которые сильно менялись от точки к точке. При изучении его со спутников было получено значение, которое меньше земного в 1000 раз.

Земля — наиболее крупный и наиболее сложный динамический объект из всех внутренних планет. На Земле еще продолжают идти процессы формирования геосфер, особенно коры, происходит движение литосферных плит, меняется положение континентов. Расстояние Земли от Солнца оказалось оптимальным для развития биосферы в отличие от других планет. Изменение этого расстояния на 20 % от существующего сделало бы невозможным стабильное существование биосферы (или само появление жизни), а

379

при массе, меньшей на 25 %, наша планета не смогла бы удержать столь обширную атмосферу.

Процесс формирования планеты Земля, как и любой из планет, имел свои особенности. Земля зародилась

около $5 \cdot 10^9$ лет назад на расстоянии 1 а. е. от Солнца. Как показали исследования Луны, примерно 4,6 — 3,9 млрд лет назад происходила ее интенсивная бомбардировка межпланетными обломками и метеоритами. Вероятно, они бомбардировали и Землю, а при падении на Землю их вещество нагревалось и дробилось. Это указывает на существование особой неустойчивости в то время в Солнечной системе. Современные представления о значении резонансов в системе (см. 3.10) делают правдоподобным предположение о том, что именно в то время продолжался процесс синхронизации движения планет, уточнявший систему резонансов и современную согласованность динамики всей системы. В этот же период система наиболее чувствительна к внешним (галактическим) воздействиям (особенно в системе Земля — Луна — Солнце могли возрастать приливные силы). Первичное вещество сжималось под действием тяготения, принимало форму шара, недра которого разогревались. Происходили процессы перемешивания, шли химические реакции, более легкие силикатные породы выдавливались из глубины на поверхность и образовывали земную кору, тяжелые — оставались внутри. Разогрев сопровождался бурной вулканической деятельностью, пары и газы вырывались наружу. У планет земной группы сначала не было атмосфер, как на Меркурии и Луне. Иной была и светимость Солнца, а отсутствие атмосферы и гидросферы (а, значит, и облаков, закрывающих сейчас до 0,5 поверхности) сказывалось на отражательных характеристиках. Активизация процессов на Солнце вызывала увеличение вулканической деятельности, рождались из магмы *гидросфера* и *атмосфера*, появились облака, водяные пары конденсировались в *океанах*.

Образование океанов не прекращается на Земле до сих пор, хотя это уже не интенсивный процесс. Обновляется земная кора (и не только силами естественного происхождения!), вулканы выбрасывают в атмосферу огромные количества углекислоты и водяных паров. Первичная атмосфера Земли состояла в основном из CO_2 . Резкое изменение состава атмосферы произошло примерно 2 млрд лет назад, его связывают с созданием гидросферы и зарождением жизни. Растения каменноугольного периода поглотили большую часть CO_2 и насытили атмосферу O_2 . Последние 200 млн лет состав земной атмосферы практически остается неизменным. Доказательством этого служат залежи каменного угля и мощные пласты отложений карбонатов в осадочных породах. Они содержат большое количество углерода, ранее входившего в состав атмосферы в виде CO_2 и CO . В образцах, образовавшихся 3,5

380

млрд лет назад, содержится примерно 60 % CO_2 , а оставшиеся 40 % — это соединения серы, аммиак, хлористый и сернистый водород. Совсем ничтожно содержание азота и инертных газов. Свободного кислорода тогда не было — обнаружены легкоокисляемые вещества в не окисленном состоянии. Под действием солнечного света из водяного пара освобождалось небольшое количество кислорода, но он окислял в атмосфере аммиак, сероводород, метан. Выделялся азот, постепенно накапливающийся в атмосфере; около 600 млн лет назад доля кислорода достигла 1 %, тогда появились и примитивные одноклеточные организмы. За 200 млн лет содержание кислорода быстро увеличивалось, этому способствовали зеленые растения. По словам Вернадского, «наша планета два миллиарда лет раньше или позже — это химически разные тела».

Земля участвует в двух движениях: вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите. Большая полуось орбиты, равная $149,6 \cdot 10^6$ км, принята за *астрономическую единицу* расстояния (1 а. е.). Расстояние в перигелии (3 января) больше этого расстояния на $2,5 \cdot 10^6$ км, а в афелии (3 июля) — меньше на $2,5 \cdot 10^6$ км. Вращение Земли вокруг своей оси приводит к смене дня и ночи. *Осью* названа воображаемая линия, проходящая через центр Земли и одну неподвижную на небосводе звезду, называемую Полярной. Ось Земли перпендикулярна экваториальной плоскости. Экватор делит Землю на Северное и Южное полушария. Точки пересечения оси Земли с поверхностью называются *полюсами*. Плоскость земного экватора наклонена к плоскости орбиты Земли вокруг Солнца на $23,5^\circ$ и перемещается параллельно самой себе, поэтому в одних участках орбиты земной шар наклонен к Солнцу Северным полушарием, а в других — Южным (см. рис. 2.2). Из-за этого наклона происходит смена времен года и существуют климатические пояса.

В дни *равноденствий* (21 марта и 23 сентября) оба полюса Земли освещены одинаково, Солнце там видно лишь на горизонте. После 21 марта — дня весеннего равноденствия, принятого за начало астрономического года, область около Северного полюса более обращена к Солнцу, день увеличивается и устанавливается полярный день — Солнце не заходит за горизонт. В Северном полушарии — весна. В это время у Южного полюса — полярная ночь, в полушарии — осень. Границы полярных дня и ночи определены полярными кругами на $66,5^\circ$ соответственно северной и южной широты. В это время Солнце в полдень достигает своего самого высокого в Северном полушарии (низкого — в Южном) положения над горизонтом, и начинается лето (самый длинный день в Северном полушарии) и зима (самый короткий день — в Южном) — 21 июня. В этот день летнего *солнцестояния* Солнце находится в зените на так называемом тропике Рака ($23,5^\circ$ северной широты). Далее все происходит в обратном порядке. Когда после дня осеннего равноденствия в Северном полушарии наступит осень, день станет меньше ночи, будет убывать до самого короткого дня — 22 декабря (зимнее солнцестояние), в Южном полушарии после весны наступит лето, а в этот день — самый длинный — оно будет в зените на тропике Козерога ($23,5^\circ$ южной широты).

381

ты). Пояс между тропиками Рака и Козерога называют *тропическим* (жарким). В этом поясе Солнце

дважды в год проходит через зенит, а на самих тропиках — только раз в году. *Умеренные пояса* лежат между полярными кругами и тропиками. Там не бывает полярных дней и ночей, но и Солнце никогда не бывает в зените.

Суточное вращение Земли происходит почти с постоянной угловой скоростью, определяемой периодом 23 ч 56 мин 4,1 с, что равно одним звездным суткам. Ради удобства жизни поверхность разделили на 24 часовых пояса по меридианам (15° по долготе). *Среднее солнечное время* в часовом поясе названо поясным, в каждом соседнем часовом поясе оно отличается на 1 ч. За начало выбран меридиан Гринвичской обсерватории около Лондона, отсчет ведется с запада на восток. Линия перемены дат — 12-й часовой пояс (см. гл. 2). Удлинение суток вызывает возникающая из-за приливных сил сила трения, замедляющая вращение Земли вокруг оси. На это впервые указал Кант (1754) и даже попытался оценить. Удлинение суток составляет 0,002 с за 100 лет, его можно обнаружить по рубцам на теле некоторых кораллов. Прирост меняется в течение года, каждому году соответствует своя полоска, как кольцам на срезе дерева. Изучая кораллы, возраст которых $4 \cdot 10^8$ лет, геологи обнаружили, что тогда год состоял из 400 суток, каждые сутки — из 22 ч. По окаменелостям более древних форм было установлено, что $2 \cdot 10^9$ лет назад сутки составляли всего 10 ч.

Форма Земли близка к шарообразной, но при детальном исследовании оказывается более сложной, даже если ее обрисовать поверхностью океана и мысленно продолжать эту поверхность под континентами. Неровности поверхности поддерживаются неравномерным распределением массы внутри земного тела. Эту форму называли *геоидом*.

Геоид — это почти эллипсоид вращения; его полярный радиус меньше экваториального на 21,4 км из-за влияния центробежной силы, возникающей в результате вращения Земли вокруг своей оси. Земля на 70 % покрыта водой, 98 % водной оболочки — это Мировой океан, и только 30 % ее поверхности составляет суша. В настоящее время форма Земли уточняется с использованием спутников. Величина сжатия $1/298,2$. Известно, что рельеф поверхности очень неровный: наибольшую высоту поверхности имеет гора Эверест в Гималаях, а наибольшая глубина под уровнем океана — 11,022 км (Марианский желоб в Тихом океане). Перепад — 20 км. В середине XIX в. по результатам градусных измерений был получен ряд значений размеров земного эллипсоида. В 1873 г. немецкий ученый И. Листинг ввел понятие о геоиде и наметил пути его изучения, а в 1888 г. русский ученый Ф. А. Слудский внес эти уточнения в теорию фигуры Земли. Ныне *геодезия* получила прочную теоретическую базу. Развивается и наука о рельефе земной поверхности — *геоморфология*.

Геофизика — концентрические оболочки Земли, по которым рассматривать строение нашей планеты предложил австрийский гео-

382

лог Э. Зюсс, давший в своем трехтомном труде «Лик Земли» историю земной коры на основе своей гипотезы, объяснявшей тектонические процессы и образование складчатости охлаждением и сжатием планеты. Некоторый собранный им материал еще не потерял ценности.

Земля окружена обширной *атмосферой*, давление у поверхности равно 0,1 МПа.

Земная атмосфера очень изменилась за свою историю. Верхняя ее граница лежит на высоте более 2000 км. Граница эта нечеткая, так как газы постепенно рассеиваются в космическое пространство. Поскольку с высотой атмосфера становится все более разреженной, основная ее масса сосредоточена в довольно узком слое: 50 % массы находится между уровнем моря и высотой 5 — 6 км, 90 % — на высоте до 16 км, 99 % — на высоте до 30 км. Так что с высотой над поверхностью Земли не только уменьшаются плотность, давление и температура воздуха, но меняются электрическое состояние и состав. Поэтому в ней выделяют несколько сфер. *Тропосфера* — нижний слой атмосферы, простирается в высоту на 8—12 км, а в тропиках — на 16—18 км. Она содержит почти весь водяной пар, поэтому в ней возникают облака, выпадают осадки, наблюдаются грозы. Примерно через каждый километр происходит понижение температуры на 1°C . Это связано с прозрачностью воздуха для солнечных лучей, поэтому нагрев идет только от земной поверхности. Верхняя граница следующей области — *стратосферы* — располагается на высоте 50 — 55 км. В ней температура растет с высотой, хотя ее значение остается ниже нуля по Цельсию; в ней находится озоновый слой и почти нет водяного пара. Эти области разделены тонким слоем в несколько сот метров — *тропопаузой*. *Мезосфера* расположена выше и достигает высоты 80 км. Температура в ней с высотой вновь падает до -80°C ; образуются тонкие серебристые облака. *Ионосфера* (термосфера) расположена выше и достигает высоты 800 км. Где-то на высоте около 100 км температура поднимается до 0°C , на высоте 150 — 200 км достигает 500°C и растет далее. Данные, полученные со спутников, показали, что температура может колебаться в пределах 100°C . Здесь газы находятся в ионизованном состоянии из-за действия ультрафиолетового и корпускулярного излучения Солнца. Ионизованный газ становится электропроводным, поэтому корпускулярное излучение Солнца под влиянием магнитного поля Земли отклоняется в сторону высоких широт, где наблюдается свечение — полярные сияния. Ионосфера влияет на распространение радиоволн, испытывающих отражение от ионизованных слоев. Самая верхняя часть атмосферы — *экзосфера* — сильно разреженная, но достаточно горячая.

Твердую оболочку Земли называют *литосферой*. Верхняя часть литосферы — это *земная кора*, достигающая толщины 35 — 65 км

383

на континентах и 6 — 8 км — под дном океанов. Под корой расположена *мантия*, границей между этими слоями служит так называемый слой Мохоровичича. В этом слое скачкообразно возрастает скорость распространения сейсмических волн. На глубине 120 — 150 км под континентом и 60 — 400 км под океаном залегает слой мантии — *астеносфера*. Это — область с очень низкой вязкостью. Земная кора растрескалась на части, и литосферные плиты, плаывая в астеносфере, медленно перемещаются относительно друг друга. Ниже астеносферы, примерно с глубины 410 км, давление на минералы становится очень велико, плотность сильно увеличивается. Сейсморазведка показывает, что на глубине 2920 км плотность становится 10 080 кг/м³, тогда как до нее была 5560 кг/м³. Начинается область *внешнего земного ядра*, внутри которого находится *внутреннее ядро* радиусом 1250 км. Внешнее ядро — жидкое, так как через него не проходят поперечные волны. Кстати, с наличием жидкого ядра связывают существование магнитного поля Земли. Принято считать, что внутреннее ядро твердое. Возможно, что температура в центре достигает 10⁵ К, а у нижней границы мантии — не выше 5000 К.

Академик Ф.У. Эпинус, известный своими работами по теории электричества и магнетизма, исследовал возможность столкновения кометы с Землей, а также распределение тепловых потоков по земному шару (1761). Он впервые связал тепловые факторы с распределением суши и океанов, утверждая, что океаны в течение лета накапливают теплоту, возвращая ее атмосфере зимой, в отличие от суши, которая быстро нагревается и остывает. На основе своих исследований он предположил, что должен существовать шестой, южный материк. Антарктида была, действительно, открыта через 60 лет экспедицией М. П. Лазарева и Ф. Ф. Беллинсгаузена. Эпинус, выделяя роль вулканов в процессе образования гор, заинтересовался причинами образования на Луне кольцевых гор. Таких гор на Земле не было, и это приводило ученых в замешательство. Эпинус сравнил их с вулканами и сделал вывод об активной вулканической деятельности на Луне в прошлом (1781). Кольцевая форма гор сохранилась из-за отсутствия атмосферы. Так Эпинус первым заявил о том, что на Земле и Луне происходят одинаковые геологические процессы.

Как видно из приведенных фактов, наряду с *геологией* — наукой о строении, составе и эволюции земной коры — сформировалась *геофизика*, наука о физических свойствах Земли и о происходящих в ней процессах. Кроме того, в ней исследуют и воздушную, и водную оболочки. Выделилось еще ряд дисциплин. Бурно развивалась *стратиграфия* — наука о пространственном взаимоотношении и возрасте горных пород и соответственно геологических эпохах. Науки о веществе земной коры — *кристаллография* и *минералогия* — становились все более точными.

Под влиянием эволюционного учения Дарвина на смену идеям, объяснявшим изменения в облике планеты и населявших ее

384

животных и растений всякого рода катастрофами, стали выдвигаться гипотезы, рассматривающие геологические явления в их развитии и взаимосвязи. К 1880 г. В.О.Ковалевский заложил основы *эволюционной палеонтологии*. Изучая ископаемых животных, он установил связь эволюции организмов с изменениями среды. В этом же направлении работали С. Н. Никитин, А. П. Карпинский, А. П. Павлов. Идей дарвинизма в геологии придерживались английский ученый Т.Хаксли, австриец Э.Зюсс и бельгийский палеонтолог Л.Долло. Эволюционная палеонтология оказала большое влияние на развитие естествознания.

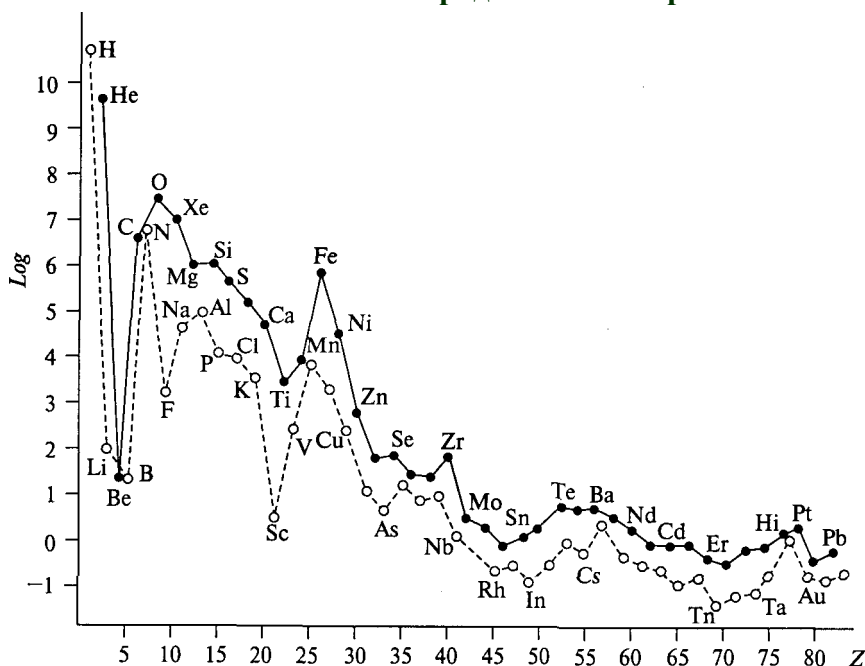
10.3. Распространенность и круговороты химических элементов на Земле

Наблюдения небесных тел ведутся уже несколько тысяч лет. Но только сочетание телескопов с методами спектрального анализа, фотографии и методов регистрации излучений в разных областях спектра позволили получить сведения о строении и химическом составе космических тел. История химических элементов, в течение которой сложились определенные пропорции количественных соотношений атомов, определила развитие планет Солнечной системы и нашей Земли. По своему составу (по плотности почти вдвое) внутренние планеты сильно отличаются от внешних. Основными источниками сведений о распространенности химических элементов служат данные о составе Солнца, полученные с помощью спектрального анализа, и результаты лабораторных химических анализов материала земной коры, метеоритов, пород поверхности Луны и планет. Свойства химических элементов, как известно, упорядочены в Периодическую таблицу элементов, и место элемента в таблице Менделеева определяется зарядом его ядра. Известные элементы характеризуются набором изотопов — атомов и тем же зарядом ядра, но с разными массами. Масса изотопа определяется суммой числа протонов и нейтронов в ядре и называется *массовым числом*. Вещество Земли и планет состоит из 300 изотопов, из которых 273 стабильны. Еще В.И.Вернадский подчеркивал, что в космических телах «распределение атомов зависит от строения их атомов».

Распространенность элементов с ростом порядкового номера убывает неравномерно, причем элементы с четным порядковым номером более распространены, чем с нечетным (в геологии этому соответствует правило Гаркинса — Оддо), особенно элементы с массовым числом, кратным 4, например He, C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca. На долю таких изотопов в земной коре приходится 86,81 % массы земной коры. Содержание элементов с четными порядковыми номерами составляет 60 % от числа всех

385

Рис. 10.2. Относительная распространенность химических элементов в Солнечной системе в зависимости от порядкового номера



стабильных изотопов (рис. 10.2). Особенно резко эта закономерность проявляется в группе редкоземельных элементов. Эти элементы, имея одинаковое строение наружных электронных оболочек, обладают также близкими химическими свойствами. Ряд максимумов соответствует элементам с ядрами, у которых число протонов или нейтронов равно 2, 8, 20, 50, 82, 126. Этим «магическим» числам соответствуют заполненные ядерные оболочки, характеризующие устойчивые ядра.

Изотопы железа обладают относительно большой энергией связи на нуклон, и они энергетически устойчивы. Один из самых устойчивых изотопов железа — Fe-56 — наиболее распространен в космических телах. Академик А. Е. Ферсман отметил (1935), что в земной коре железо занимает четвертое место по массе и восьмое — по числу атомов, а в метеоритах — второе место по массе и четвертое — по числу атомов. Как отметили космохимики Г. Юри и Э. Зюсс, распространенность элементов и их изотопов определяется ядерными свойствами и что окружающее нас вещество похоже на золу космического ядерного пожара, в котором оно было создано.

Большинство газов (или летучей части солнечного вещества) составляют H, He, CH₄, CO, O, N, NH₃, CO₂ и все инертные газы. Основная часть внутренних планет и метеоритов состоит из

386

нелетучих элементов солнечного вещества — Si, Fe, Vg, Ca, Al, Ni, Na. Сравнивая их, советский геохимик А. П. Виноградов показал (1962), что эти пороодообразующие элементы планет и метеоритов выброшены Солнцем, а не захвачены из других областей Галактики. Некоторые различия в составе планет связаны с вторичными процессами и с тем, что элементы входят в разные соединения, находясь в разных агрегатных состояниях. Особенно близок состав нелетучей части элементов Солнца и каменных метеоритов — хондритов. Летучая часть солнечного вещества, существующая в виде газов при $T > 0$ °C, при низких температурах затвердевает, а атомы газов вступают в соединения. Инертные газы в соединения не вступают, оставаясь газами и при низких температурах. Земля и метеориты сохранили летучие элементы в той степени, в какой они проявляли свою активность, и инертные газы в них редки. Изотопный состав элементов C, O, Si, Cl, Fe, Ni, Co, Ba, K, Cu одинаков на Земле и в метеоритах. Относительно Солнца таких широких исследований не проведено, но соотношение изотопов $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ такое же, как и на Земле, и равно 0,011. Исследования *инертных газов показали идентичность изотопного состава в Солнечной системе*, тогда как на других звездах он другой. По свидетельству советского астронома Г. А. Шайна, для некоторых углеродных звезд он меняется от 1 до 50, а для межзвездного газа — 0,2. Эти различия важны для определения происхождения химических элементов, их синтеза в звездах и последующей эволюции.

Итак, все тела Солнечной системы построены из небольшого числа элементов (с 28-го номера распространенность резко падает) и имеют единое происхождение. Метеориты, большинство которых оказались очень древними, дали ценную научную информацию об истории возникновения отдельных тел Солнечной системы. По оценкам, основанным на законе радиоактивного распада урана, тория, рубидия и калия, их возраст около 4,5 — 4,6 млрд лет, т.е. совпадает с возрастом Земли и Луны. В них насчитываются примерно 66 минералов, большинство из них похожи на земные. Вероятно, метеориты образовались тогда же, когда и планеты земной группы.

По геохимическим свойствам все элементы разделены на четыре группы. Это разделение связано с определенной электронной структурой атомов, проявляющейся в смеси веществ при охлаждении и

нагревании. *Атмофильные элементы* склонны накапливаться в атмосферах (это — все инертные газы, кислород, азот, водород); *литофильные* образуют твердые оболочки планет; *халькофильные* создают соединения с серой, подобные ионам меди (от греч. «халькос» — медь); *сидерофильные* способны растворяться в сплавах железа (от греч. «сидерос» — железо).

Химический состав земной коры, общая масса которой составляет только 0,5 % массы всей Земли, исследовали крупнейшие геохимики: Ф.Кларк, В.И.Вернадский, А.Е.Ферсман,

387

А. П. Виноградов, супруги И. и В. Ноддак и др. Чтобы доказать наличие элемента рения в земной коре и определить его среднее содержание, супруги Ноддак провели 1600 анализов разнообразных минералов и пород. В литосфере наибольшее распространение сейчас получил кислород — 50 % массы всей литосферы; 26 % составляет кремний, 7 — 8 % — алюминий, 4% — железо; суммарное содержание магния, калия, кальция и натрия — порядка 10 %, а на долю оставшихся (более 80) элементов приходится несколько процентов.

Существенно, что кремний расположен в таблице Менделеева в том же столбце, что и важнейший элемент для живого вещества — углерод. Это подобие свойств отразилось и в истории биосферы. По одной из гипотез, первые формы живого вещества создавались на мокрых глинах. На основе окиси кремния образованы многие минералы, в том числе содержащие алюминий. По подсчетам Вернадского, земная кора (до глубин 16 км) состоит на 85 % из силикатов. Если в сложных алюмосиликатных кислотах водород замещается металлами, то соли этих кислот — алюмосиликаты — становятся основой довольно сложных по составу минералов. Кристаллическую основу алюмосиликатов составляет замкнутая система атомов, содержащая алюмокислородные и крем-некислородные группы — комплексы. В зонах выветривания под действием внешних факторов (воды, солнечного излучения, газов) из них выносятся металлы и остается каолин (состав: кремний, алюминий, водород, вода или группа OH). Эту конструкцию Вернадский назвал каолиновым ядром. Кольцевая структура ядра обеспечивает ему высокую устойчивость.

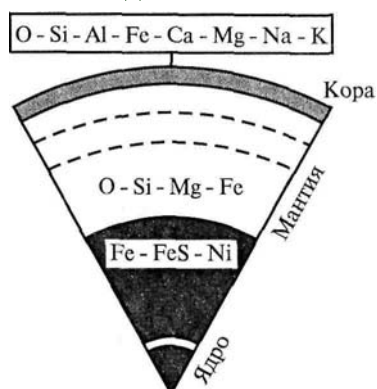
В составе **атмосферы** сейчас преобладают азот и кислород (98,6% массы всей атмосферы), это соотношение практически неизменно до высот 150 км. Водорода почти в миллион раз меньше, чем кислорода. На высоте 160 км и выше состав атмосферы меняется и, как показали данные, полученные со спутников, водород становится преобладающим на высотах 1500 км.

В морской воде на долю кислорода, водорода, хлора и натрия приходится 99,5 %. Переход к гидросфере — это резкое изменение организации геосфер, вызванное переходом от плотных внутренних геосфер к значительно более подвижным внешним геосферам Земли.

Внутри Земли, по данным А.Е.Ферсмана, доля железа — 37 %, затем следуют кислород и кремний; более тяжелые элементы (около 0,5 % массы Земли) и элементы легче железа. Сравнение химического состава Земли и Солнца показывает, что относительное содержание элементов тяжелее натрия почти одинаково в атмосферах Земли и Солнца, содержание кислорода, углерода, азота, гелия в солнечной атмосфере в десятки раз больше, чем на Земле, а водорода — даже в 100 000 раз (рис. 10.3).

388

Рис. 10.3. Схема внутреннего строения Земли с указанием ведущих химических элементов в каждой оболочке



Радиоактивность — важнейшее свойство Земли, определяющее ее происхождение и химическую эволюцию. Первичные планеты были сильно радиоактивны, и, подвергаясь радиоактивному нагреву, они испытывали химическую дифференциацию, в результате которой у планет земной группы сформировались внутренние металлические ядра. Остатки металлической и сульфидно-металлической фаз, сохранившиеся в первичных мантиях, постепенно стекали к центру и формировали четкие границы ядер. Литофильные элементы переходили вверх, дегазация мантий при выплавлении легкоплавких фракций приводила к базальтовым расплавам, которые изливались на поверхности планет. Газовые компоненты, вырывавшиеся вместе с ними, дали начало первичным атмосферам, которые смогли удержать только крупные планеты. Наиболее массивная среди внутренних планет, Земля, прошла сложнейший путь химической эволюции. На последних стадиях остывания солнечной туманности возникли сложные органические соединения,

обнаруженные в метеоритном веществе, которые были усвоены нашей планетой и привели к развитию жизни.

Самопроизвольный распад неустойчивых атомов отражает эволюцию вещества Земли и события эпохи рождения химических элементов, как устойчивых, так и неустойчивых. При распадах выделяется теплота Q . Для Земли сейчас важны радиоактивные изотопы урана, тория и калия, которые распадаются с выделением теплоты:

$U-238 \rightarrow Ph-206 + 8a + Q$; $U-235 \rightarrow Ph-207 + 1a + Q$; $Th-232 \rightarrow Ph-208 + 6a + Q$; $K-40 \rightarrow Ca-40 + b + Q$.

Тепловой баланс Земли определяется в основном теплотой, выделяемой при распаде этих изотопов. Для объяснения теплового режима земной коры достаточно имеющегося количества радиоактивных элементов в ее толще до глубин 0,9 м (по расчетам (1937) радиохимика академика В.Г.Хлопина). Аллюмосиликатная кора Земли более радиоактивна, чем мантия. Считая равными в среднем радиоактивности планеты и метеоритов, можно оценить выделяемую Землей радиогенную теплоту от $9,66 \cdot 10^{27}$ до $43,68 \cdot 10^{27}$ Дж/год. Земля теряет теплоту в окружающее пространство путем *излучения* и *теплопроводности*. Геотермические

389

измерения показали, что величина тепловых потоков одинакова и на дне океанов, и на материках: за год около $7,98 \cdot 10^{27}$ Дж, что меньше количества радиогенной теплоты. По словам Вернадского, «количество создаваемой радиоактивным процессом тепловой энергии не только достаточно для того, чтобы объяснить потерю Землей тепла и все динамические и морфологические воздействия внутренней энергии планеты на ее поверхность — земную кору, но и для того, чтобы поднять ее температуру». В конце 50-х гг. обнаружили, что верхние слои атмосферы излучают избыточную энергию в инфракрасном диапазоне. Это связано с взаимодействием атмосферных газов с коротковолновым излучением Солнца, существенно влияющими на погоду.

Сверхглубокая скважина, пробуренная на Кольском полуострове, позволила проникнуть в недра Земли на глубину 12 км и получить непосредственные данные о составе и условиях внутри Земли. Давление в земных недрах растет с глубиной, причем при глубине 3 км — резко растет, а при глубине 8 км — резко падает. Температура из-за приближения к мантии тоже растет, сначала на 1 °С каждые 100 м (до глубины 3 км), затем по 2,5 °С, а на глубине 10 км достигает 180 °С. Пробуренные толщи Земли показывают, что в этих областях идут активные процессы рудообразования, на глубине 4—11 км обнаружены крупные зоны раздробленных пород, образованных при относительно низких температурах и сцементированных сульфидами Fe, Ni, Co, Cu. К настоящему времени определены горизонты, на которых преимущественно находятся те или иные важные для жизни полезные ископаемые. Так, благородные металлы чаще всего находятся на глубинах 300 — 800 м, цветные металлы — 600—1200 м, железные руды — 300 — 2000 м, каменный уголь — 700 — 1500 м, нефть и газ — 2500 — 6000 м. Процесс формирования полезных ископаемых тесно связан с историей планеты.

Из законов радиоактивного распада следует, что в прошлом радиоактивность была выше. Так, 4,5 млрд лет назад урана-238 на Земле было вдвое больше, чем сейчас, и энергии он выделял больше. Высокая радиоактивность ранней Земли повышала ее температуру, способствовала плавлению веществ и была ведущим фактором химической дифференциации. По данным геохимика Г. В.Войткевича, свыше 5 млрд лет назад этой теплоты было так много, что вся масса Земли могла находиться даже в газообразном состоянии. Кроме тория, урана и калия существовали радиоактивные изотопы с периодом полураспада менее 10^8 лет. Они возникли в эпоху ядерного синтеза тяжелых элементов и вошли в состав молодых тел Солнечной системы. Примером может служить йод-129 с периодом полураспада 17,2 млн лет, превращающийся в ксенон-129.

В докембрийском редкоземельном минерале бастиезите обнаружены (1971) долгоживущие радиоактивные элементы плуто-ний-244 и кюрий-247, имеющие своим конечным продуктом рас-

390

пад ксенон-131 — 136. Значит, при «варке» тяжелых элементов были и сверхтяжелые трансурановые ядра, пока не полученные в лаборатории (так как с ростом номера элемента неустойчивость трансурановых ядер резко растет). Группа индийских ученых во главе с С.Бандари обнаружила в некоторых метеоритах и лунной пыли следы более 300 треков, которые могли быть вызваны такими трансурановыми элементами, присутствовавшими при затвердевании породы. Большинство «вымерших» радиоактивных изотопов при распаде выделяли много больше энергии. Так, если при распаде урана выделяется 2,98 Дж/год, то плутония-244 — 50,5 Дж, кюрия-247 — 160,3 Дж и йода-129 — 5,54 Дж/год.

Все земные геосферы связаны между собой кругооборотах вещества, глобальными потоками энергии и момента импульса. В результате образуется сложная система, состояние которой, во многом похожее на состояние динамического равновесия, создает условия для динамической эволюции планеты. Для всех геосфер характерны многочисленные и закономерные отклонения от однородного (симметричного) состояния, наличие градиентов температур, давлений, потенциалов и т.д., которые и направляют потоки вещества, энергии и информации. Хотя каждая из геосфер имеет свою специфику динамики, обменов, систем обратных связей, многие особенности регулируются взаимодействиями между этими огромными подсистемами. В. И. Вернадский описал минералы и их жизнь, природные геологические тела, в которые соединяются минералы, а также сферы Земли, составленные из этих сфер. Эти знания необходимы в поиске месторождений полезных ископаемых. Совместное рождение минералов, образующих природные тела, называют *парагенезисом*. Парагенезис минералов мало менялся на обозримых промежутках времени, но

глобальные изменения условий на нем отразились. Например, оловянный камень (каситерит) накапливался в наибольших количествах в древнем эрхее и в третичный период. Вернадский, изучавший геологическую историю, насчитывающую многие миллионы лет и огромные пространственные области Земли, писал: «Все реакции земной коры, насколько их можно проследить до сих пор, представляют собой определенные циклы, определенные круговые системы химических изменений, которые постоянно вновь повторяются».

10.4. Модели появления геологических структур на поверхности Земли

Нептунической (по имени бога морей Нептуна) была названа теория немецкого геолога и минеролога А. Г. Вернера, основавшего (1775) институт для изучения минералов и полезных иско-

391

паемых. Он разработал первую систему классификации горных пород и ландшафтов по внешним признакам. Вернер исходил из того, что Земля была покрыта океаном («всемирный потоп»).

Когда вода отступила, из осевших в воде отложений минералов на протяжении более миллиона лет образовались слои пород, например граниты, путем осаждения кристаллов на дне океана. Ошибочность такого представления стала ясна, когда появились убедительные доказательства того, что граниты возникли в результате охлаждения и затвердевания силикатных расплавов — магм, поднимающихся из земных недр. Эти факты послужили основой для другой, плутонической гипотезы.

Плутонической (по имени бога подземного царства Плутона) названа теория шотландского геолога Дж. Геттона (1795). Он, отказавшись от идеи о потопе, выдвинул версию о медленной эволюции Земли. Под действием ветра, воды, вулканов, землетрясений земная кора разрушалась, а продукты разрушения образовывали на поверхности планеты слои. Теплота земных недр перемещала породы и формировала континенты. Эту теорию поддержал профессор геологии Ч. Лайель, считая, что геологические явления вызваны природными факторами, действующими длительные промежутки времени, и что всюду природные факторы действуют одинаково. Лайель сформировал геологию как научную дисциплину, а его теория, получившая название теории «единообразных изменений», поддерживается современными учеными.

Земная кора делится на *океаническую* (плотную и однородную) и *континентальную* (более легкую и гетерогенную по минеральному составу). Верхние слои состоят преимущественно из горных пород, которые образовывались в результате осаждения частиц, разрушенных ветром и водой. В них захоронены остатки окаменевших древних флоры и фауны. В пластах прослеживается история планеты. Осадочный слой достигает толщины 10—15 км, но покрывает не всю поверхность Земли, до 70 % всех его пород составляют глины. Кора состоит из осадочного, гранитного и базальтового слоев. Это деление условно из-за постоянных движений в литосфере. Среди пород океанического дна важна роль магматических глубинных пород, но их состав более однообразен, чем пород континентов. Геофизические методы исследования показали, что океаническая кора значительно тоньше, в ней нет гранитного, богатого кремнеземом и глиноземом, слоя, имеющегося в континентальной коре.

Возраст осадочных пород — важный параметр в эволюции планеты, как и ископаемые останки. Одноклеточные организмы (размером от 40 мкм до 1 мм) — радиолярии — появились в океанах около 500 млн лет назад, а 160 млн лет назад были распространены так же, как сейчас. Они занимают в океанах верхние горизонты, но их скелеты, состоящие из кремнезема, слабо растворимы,

392

и встречаются на всех глубинах. Кислотой из пород выделяют останки вымерших червеобразных, живших 570 — 200 млн лет назад. Исследуя их, удалось доказать, что разрезы более древних пород иногда залегают поверх молодых, т.е. большие скопления слоев могут перетасовываться. Расшифровать историю помогает и палеомагнетизм пород.

Химическая эволюция континентальной части земной коры проходила от основного, базальтового состава, характерного для океанического типа коры, к кислому, гранитному, и океаническая кора постепенно (примерно 2,5 млрд лет назад) превратилась в континентальную. Этому способствовало несколько факторов:

при формировании ядра планеты в одном из полушарий выделилось больше базальтов;

состав продуктов извержения вулканов менялся, изменяя толщину континентальной коры. Базальтовые магмы обогащались SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , соответственно уменьшая долю MgO , FeO , CaO ;

начался мощный круговорот веществ, включающий переработку первичной коры под действием солнечной энергии, гравитации и всей биосферы (рис. 10.4, а).

Огромные массы земной континентальной коры прошли через состояние осадочных пород, были перемыты водой и изменились под действием многих компонент. Длительный круговорот воды вымывал из коры некоторые базальтовые элементы (наиболее растворимые Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++}), сохраняя малоподвижные типа SiO_2 , Al_2O_3 . Натрий попадал в океан в большом количестве, находился там в растворенном виде, но его значительная часть возвращалась в континентальную кору в виде осадков. Калий задерживался в тонкодисперсных глинах и растительных остатках, поэтому его больше в континентальной коре, чем в океанической (рис. 10.4, б).

В лабораторных условиях моделировали глобальные изменения только последнего геологического

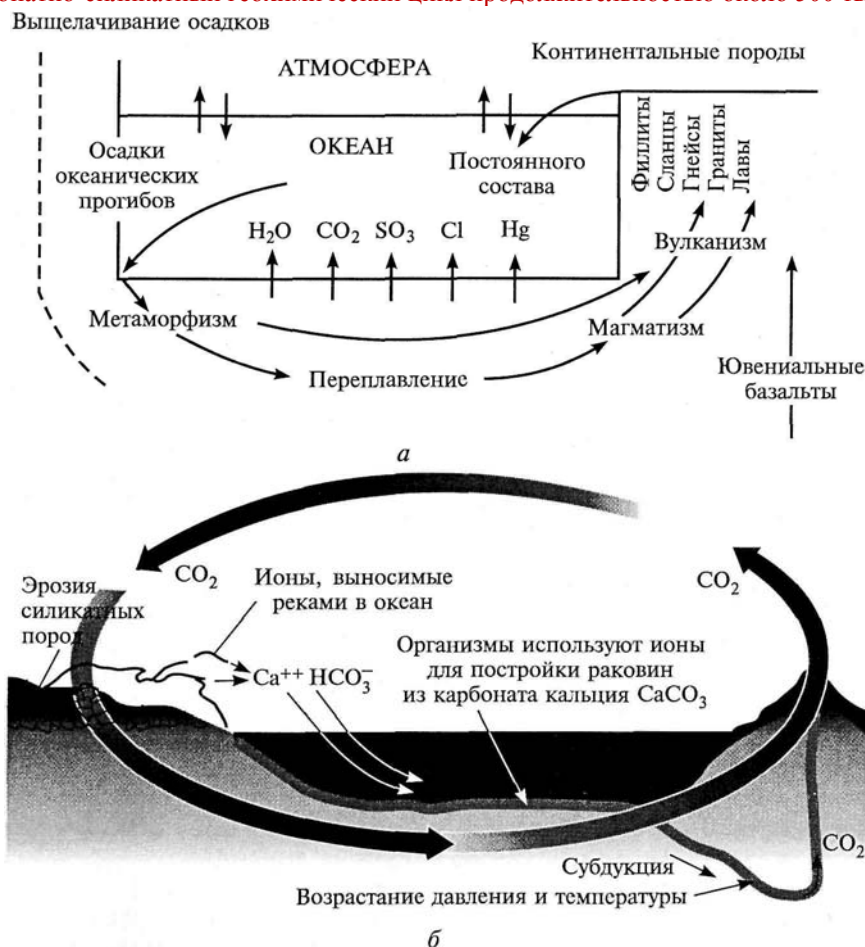
периода. Для изучения взаимодействия пар земных слоев изготовили двухслойные модели: лист резины толщиной 1,5 см залили тонким слоем (3 — 4 мм) легкоплавкого материала (воска или парафина), сцепляющегося с резиной. После остывания модели растянули домкратами. В верхнем слое резины появилась сеть трещин и возникла блоковая структура, характерная для верхнего слоя земной коры. При сильном измельчении от подложки отслоились мельчайшие «блоки», и дробление прекращали. Так проверили идею Вернадского об определенной организованности процессов в земной коре и энергонасыщенности геологической среды.

Гипотезу дрейфа континентов развивал немецкий ученый А. Вегенер (1912), хотя она казалась необоснованной. Сходство очертаний западного берега Африки и восточного берега Южной Америки издавна считали свидетельством разделения еди-

393

Рис. 10.4. Геохимические циклы Земли:

a — полный (средний) состав основных континентальных пород (%): Si — 29,4; Al — 8,3; Fe — 4,4; Mg — 1,8; Ca — 3,0; K — 2,6; *b* — карбонатно-силикатный геохимический цикл продолжительностью около 500 тыс. лет



ного материка. Вегенер назвал его **Пангея** (от греч. *παν* — все + *гайя* — земля). Итальянский ученый Синднер-Пеллегрини указывал на сходство не только очертаний, но и ископаемых растений и месторождений угля в Америке и Европе. Примерно в это же время гляциолог Ф.Б.Тейлор связывал образование молодых гор третичного периода вокруг Тихого океана с «раскрытием» дна Атлантического океана. Причину он видел в приливных силах Луны

394

после ее захвата Землей в меловом периоде, что и вызвало дрейф континентов. А.Холмс в 1927 — 29 гг. выделил силы конвективного течения в верхней мантии Земли как способные переместить континенты (верхнюю оболочку толщиной 50 — 100 км). Измерения силы тяжести на море и на суше свидетельствовали в пользу гипотезы дрейфа континента.

Район землетрясений образуют узкие и длинные зоны, разделяющие сейсмически активный верхний слой Земли на **литосферные плиты** — стабильные участки. Плиты (толщиной 75 — 150 км) включают в себя значительную часть верхней мантии. Зоны, ограничивающие плиты, образованы срединно-океаническими хребтами и глубокими и широкими океанскими желобами. По ним расположено большее число действующих вулканов. Плиты перемещаются по поверхности мантии Земли, края плит раздвигаются или сходятся. При раздвижении образуется трещина, в которую поступает вещество мантии; у поверхности оно затвердевает, образуя кору. Этот процесс назван **спредингом**. Выход вещества — один из процессов рудообразования. Оценка скорости приближения этих элементов к поверхности позволила бы уравнивать потребление металла со

скоростью формирования руд для достижения устойчивого развития человечества. Если плиты сходятся, их края погружаются в мантию, плита попадает как бы на переплавку.

Гипотеза Вегенера возродилась под влиянием сведений о строении океанического дна и новых данных палеомагнетизма. Оказалось, что континенты в ходе истории Земли испытывали смещения относительно магнитных полюсов, причем по сравнению с концом палеозоя (230 млн лет назад) расположение континентов изменилось. Для понимания процессов потребовалось провести магнитные измерения в океанах. В толще земных осадков установили несколько уровней смены векторов намагниченности пород. Мы живем в эпоху, которая началась около 730 тыс. лет назад, сменив эпоху обратной полярности. Но за этот период бывали и кратковременные смены магнитных полюсов. Исследования геофизиков показали, что возраст пород коры меньше возраста осадочных пород на дне океана и растет в зависимости от расстояния до хребта. Значит, на оси хребта создается новое вещество коры, а образованное ранее смещается от зоны раздвиг со скоростью несколько сантиметров в год.

Гипотеза литосферных плит основана на их способности скользить по поверхности астеносферы (расплавленным глубинным породам), чем поверхность Земли приводится в состояние, близкое к гидростатическому равновесию. Эта теория получила признание в 60-е гг. XX в. Считается, что верхний слой коры состоит из 15 жестких плит, из них 50 % — крупные (до 1000 км), которые плавают на горячем, пластичном слое мантии Земли по поверхности астеносферы. При этом плиты могут сталкиваться,

395

погружаться друг под друга и надвигаться одна на другую. Вместе с плитами могут перемещаться и континенты. Эту гипотезу называют *гипотезой новой глобальной тектоники*, поскольку впервые попытались объяснить развитие Земли с помощью данных, полученных при изучении развития континентов и океанов. Литосферу моделируют системой плит, перемещающихся относительно друг друга со скоростями несколько сантиметров в год. Так, Гималаи, Памир и Тянь-Шань — результат надвигания одной плиты на другую.

При росте плит расширяется океаническая котловина, магма поднимается, застывает и образует вдоль подводного хребта океаническую кору. При замедленном процессе сокращается протяженность спрединговых центров. В настоящее время длина такой системы около 56 тыс. км, а скорости развития порядка 5 см/год (в Атлантике — почти вдвое ниже, в Тихом океане — в 3 раза выше). Умножая среднюю скорость роста на длину спрединговых центров, получим скорость формирования коры — 2,8 км²/год. Средняя площадь океанов — 310 млн км², т.е. они сформировались за 110 млн лет. Средством проверки гипотезы тектоники плит служила программа бурения с судна «Гломар Челленджер». Результаты бурения дна подтверждают, что океаны более «молоды», чем считали ранее. Возраст западной части Тихого океана — до 180 млн лет, т.е. за последние 2 млрд лет могли возникнуть и исчезнуть до 20 океанов. Если дно и континент принадлежат к одной и той же плите, то континент перемещается вместе с ней. Океаническая кора может погрузиться под континент, присоединяясь к мантии (*субдукция*). Кора поднимается на хребте, перемещается поперек котловины и погружается вдоль желоба, отделяющего зону субдукции. Породы охлаждаются в океане, растекаются по оси хребта и в стороны от него, и кора постепенно погружается. Некоторые горы на океаническом плато настолько велики, что поднимаются, как острова. Подводные горы чаще всего базальтовые и появляются из «горячих точек», расположенных под плитой. Если плита скользит по магме, возникает целая цепь быстро растущих вулканов, как на Гавайских островах. Скопления минерального сырья по всем границам плит подтверждает существование таких процессов.

Горизонтальные перемещения плит преобладают с 60-х гг. XX в., хотя ранее считалось, что крупные прогибания земной коры заполняются осадками, вызывая вздымания, создающие молодые горные цепи. В местах раздвижения плит развиваются рифты, образуются океанические котловины. Так, в рифтовых впадинах Красного моря обнаружен ил, насыщенный Fe, Mn, Mo, Co, Cu и Zn. Аналогичный ил найден и вблизи всех гребней срединных хребтов в океанах. Повышенной активностью обладает и узкая часть Южноамериканского континента, ограниченная Андами. Перу, Боливия и Чили очень богаты рудами металлов, как и

396

восточное побережье Азии. В эти области миллионы лет поддвигается океаническое дно, порождая потоки раскаленной магмы, насыщенной металлами. Вдоль линий столкновения и параллельно им возникают зоны вулканов, вдоль линий скольжения — цепь землетрясений. Структурные элементы, порождаемые тектонической активностью, недолговечны и подвержены самосогласованным изменениям, так как новые блоки коры возникают и при вулканических процессах. Как показали керны, около 11 млн лет назад Африканская и Европейская плиты сблизились и перекрыли Гибралтар, Средиземное море высохло, отложились толщи соли и гипса. Потом пролив открылся, и на сотни лет в нем установился водопад (почти как Ниагарский), заполняя бассейн моря.

Литосферные плиты состоят из фрагментов коры и новых «кусков», называемых *экзотическими блоками*. При сближении плит одна может поддвинуться под другую и погрузиться в мантию. При этом большая часть коры углубляется в астеносферу, а верхние слои как бы соскабливаются с нее верхней плитой, образуя призму **аккреции** (от лат. *accretio* — **приращение, увеличение**). Так, близ Венесуэлы Карибская плита поддвигается под Южно-Американскую. При столкновении плит несколько увеличивается объем континентальной коры.

Вдоль линии столкновения более плотная плита погружается, подвергаясь действию все более высокой температуры. Она несет на себе и осадки, и воду, захваченную пористыми породами. На глубинах 100—150 км эта вода инициирует ряд процессов — частичное плавление пород, образование магмы, обогащенной Al, K, Na, и др. Эта магма содержит до 50 — 70 % кремнезема и отличается от океанической базальтовой своей большей вязкостью и густотой. В этих местах растет давление, вызывающее повышенный вулканизм.

В настоящее время известно несколько сотен действующих вулканов, и большая их часть расположена по берегам Тихого океана. Действующий вулкан Ключевская сопка извергает огромные потоки лавы с периодичностью в 6 — 7 лет. Вулкан Безымянный пробудился в 1956 г., и сила извержения была такова, что туча пепла поднялась на высоту 40 м. Этот пепел выпал на площади 500 км², растопил снег и достиг за двое суток Северного полюса. Раскаленный поток лавы шириной до 30 м имел длину 18 км. В 70-е гг. бурно «заговорил» вулкан Толбачек. Вулкан на одном из Антильских островов при своем извержении в 1902 г. уничтожил целый город за несколько минут, при этом погибли 30 тыс. человек.

Вулканы по краям плит расположены над огромными, поднимающимися вверх «занавесами» мантии, параллельными маркирующим желобам. Длина цепей вулканов достигает 37 тыс. км. На 1 км за 1 млн лет извергается 20 — 40 км³ нового силикатного материала, который присоединяется к коре (континентальной) со скоростью 0,75^{1,5} км³/год, а сама океаническая кора почти ничего к ней не добавляет. Но над ней возвышаются острова, возникшие за счет спокойного базальтового вулканизма над горячи-

397

ми точками и в результате вулканизма в областях, параллельных зонам субдукции. На дне океанов имеются целые блоки осадков (до 170 млн км³), принесенные реками или оставленные вымершими организмами. Часть этого океанического чехла сублимируется, но большая часть составляет основу экзотических блоков.

Полуостров Индостан — один из самых больших таких блоков. Последние 100 млн лет он был единым, хотя некоторые его части имеют возраст более 1 млрд лет. Считается, что он был частью огромного континента Гондваны, впоследствии разорванного на куски, и дрейфовал на север до столкновения с южной окраиной Азии. Другие экзотические блоки, которые не являются осколками древних материков, имеют возраст до 200 млн лет. Они состоят в основном из гальки, песка и алеврита, их очертания складывались под влиянием столкновений и глубинных деформаций. На Аляске, к примеру, блоки хребта Брукс — огромные, насланые друг на друга пластины. В Кордильерах они имеют вытянутую форму, а в Китае сместились в субширотном направлении, так как Индостан давит на Азию с юга. История формирования блоков не всегда восстанавливается, но свидетельства движений существуют.

Объем континентальной коры сейчас составляет $7,6 \cdot 10^9$ км³, а древнейшие породы имеют возраст 3,8 млрд лет, т. е. средняя скорость роста континентов составляет около 2 км³/год, или 65 м/с, что явно завышено, так как на неостывшей Земле она была больше. До 70 % коры образовалось более 2 млрд лет назад, а 30 % формировались 2 млрд лет со скоростью 1 км³/год. С этой скоростью образования коры модель рассчитывалась вплоть до фанерозоя (этапа в 600 млн лет), для которого существует ископаемая летопись жизни. По данным палеомагнетизма, в начале периода континенты были изолированы и сосредоточены в области экватора, в последующие 350 млн лет из-за движения континентов возник агломерат Гондваны и Лавразии, затем (250 млн лет назад) при объединении последних сформировался суперконтинент, ориентированный в субмеридианном направлении. Древние ядра континентов увеличивались за счет экзотических блоков, которые наращивались уже 200 млн лет, и Пангея начала распадаться вдоль системы рифов, напоминающих очертания современных океанических центров спрединга, опоясывающих земной шар (на 56 тыс. км).

Какие движения континентов предстоят? По одной из моделей через 10⁸ лет может возникнуть новый континент из Азии и Америки. Атлантический океан будет расширяться, а Тихий закроется из-за субдукции Восточно-Тихоокеанского спредингового центра. По другим моделям могут быть отличия. При столкновении размеры континентов возрастут. Площадь континентов, окружающих Тихий океан, сейчас около 290 млн км², она вырастет на 9 % за счет экзотических блоков со скоростью 1 км³/год. Большую роль играют в этом процессе осадки. Сей-

398

час самым большим источником сноса осадочного материала является вздымающаяся масса суши, возникающая за счет столкновения Индостана с Азией. Кора почти удвоила свою мощность и образовала Гималаи и Тибет. Шесть крупных речных систем дренируют регион, составляющий 4 % общей площади поверхности Земли, и выносят в океан до 40 % общего количества осадков, переносимых реками.

Северо-западная часть Тихого океана (Япония, Азия, Филиппины) имеет континентальную кору из фрагментов древнего континента, каждый из которых окружен поясами экзотических комплексов, выросших за 600 — 250 млн лет в течение палеозоя. Стержнем служила Сибирская платформа, вокруг нее наращивались блоки. Вдоль ее южной границы в раннем палеозое сгрудились вулканические дуги и другие поднятия коры, сформировался Байкальский складчатый пояс. Затем, от 300 до 60 млн лет назад, когда Индостан подошел к Азии, формировались другие районы (Индокитай, Янцзы). Континенты юго-западной части Тихого океана (Антарктида, Австралия и Новая Зеландия) возникли при распаде части Гондваны 120—100 млн лет назад,

когда развилась рифтовая система, состоящая из трех частей. Одна из них образовала Тасманово море, а две другие отделили Антарктиду от Австралии и плато Кэмпбелл от Новой Зеландии. Вероятно, восточная часть Антарктиды и западная часть Австралии являются более молодыми надстройками коры.

Движения плит — это периодический процесс, в котором главная движущая сила — *тепловая конвекция* в нижней мантии, а источник энергии — *радиоактивный распад*. Здесь важна особенность распространения теплоты через земную кору и ухода ее в окружающее пространство: океаническая кора проводит теплоту вдвое более эффективно, чем континентальная. Если часть поверхности занимает суперконтинент, под ним должна накопиться теплота мантии, ведущая к его вздыманию и разрушению. После раздвижения осколков теплота уходит под образующиеся между ними новые океанические бассейны. Поэтому при непрерывном подведении теплоты к поверхности из-за малой теплопроводности континентов она «прорывается» через нее в отдельные и достаточно короткие отрезки времени. Сначала в недрах континента образуются «горячие точки» вулканов, потом они соединяются в рифтовые долины, вдоль которых происходит раскол континента. Через рифты вещество мантии поступает к поверхности, готовя океанское дно. Дно уплотняется, охлаждается, опускается вниз, углубляя океан, и этот процесс длится примерно 200 млн лет. Затем самая древняя часть нового океанического дна континента, примыкающая к осколкам, уплотняется и погружается под континентальную кору — начинается процесс субдукции. Далее океан закрывается, континенты сближаются, а силы сжатия порождают горы.

Суперконтинентальный цикл длится около 440 млн лет. Суперконтинент устойчив около 80 млн лет, накапливающаяся теплота вызывает зарождение рифтов. Через 40 млн лет континент

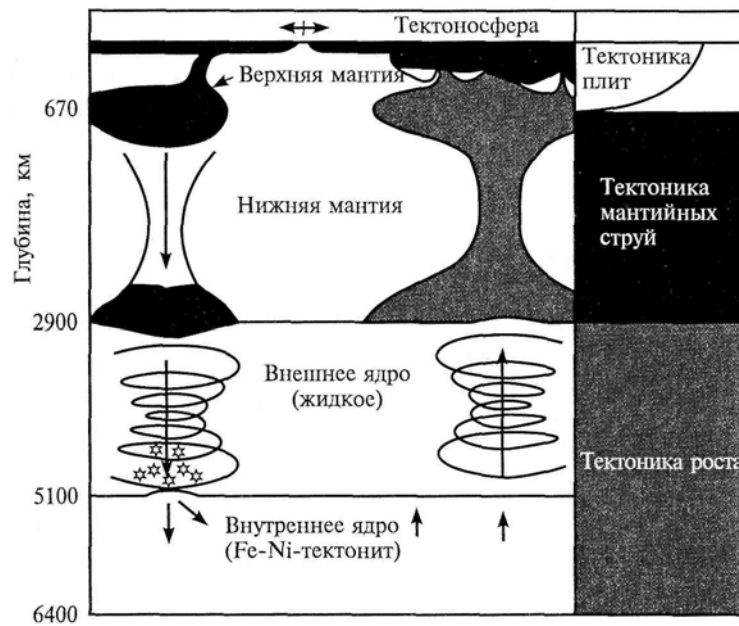
399

раскалывается. Через 160 млн лет дрейфующие континенты максимально удаляются, а затем начинают сближаться, и суперконтинент восстанавливается. Если сейчас Атлантический океан находится еще в стадии раздвижения, то потом, когда его кора состарится и начнет погружаться под соседние континенты, он может закрыться.

Удивительные закономерности обнаруживаются при сопоставлении времени развития рифтов и времени интенсивного горообразования. Середины периодов горообразования приходятся примерно на 2600, 2100, между 1800 и 1600, 1100, 650 и 250 млн лет назад. Интервалы между ними порядка 400 — 500 млн лет. Примерно через 100 млн лет после каждого из них наступала пора рифтогенеза. Возрасты большого числа вынесенных из мантии пород группируются на отрезки времени со средними значениями 2500, 2000, 1700—1500, 1000 и 600 млн лет. Период образования гор, протекавший около 250 млн лет назад, сменился рифтогенезом и разрушением Пангеи, т.е. период эволюции суперконтинента 400 — 500 млн лет. Эта периодичность отражается в колебаниях уровня океанов, что является проверкой модели. Кроме этого, в океанической коре непрерывно возникают периодические структуры — «твердые волны». Полоса плотных и тяжелых пород у берегов нагружается осадками с континента, прогибается и уходит вниз. Ее место занимают осадочные породы, в них вновь проникают растворы и цементируют их. Так цикл повторяется. Такие застывшие волны сейчас наблюдаются в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах. Эти волны медленные, проходят миллионы лет, пока навстречу этой волне придет аналогичная с другого берега. Когда волны встретятся, возникнет поднятие, называемое *срединным хребтом*.

Глобальная тектоника литосферных плит — это еще один механизм обменного характера, позволяющий понять эволюцию земных глубин. Расчеты на ЭВМ показали, что под действием теплоты вещество Земли осуществляет кольцеобразное движение, сосредоточенное в верхней зоне на областях порядка 700 км. Эти кольцеобразные звенья играют роль неких ячеек: верхние, наиболее холодные части и являются плитами. Теория позволяет объяснить с позиций механики и химии многие геологические явления. Теория дренажной оболочки, например, находит свое применение при объяснении эволюции материков, что показывает огромную взаимосвязь систем Земли. Темпы развития геофизических исследований позволяют надеяться, что вскоре удастся разрешить многие несогласованности в развитии отдельных концепций о процессах на границе коры с мантией под океанами и создать единое представление о кругообороте вещества в Земле — от первого попадания лучистой энергии на ее поверхность до настоящего времени. На больших глубинах все находится

400

Рис. 10.5. Схема глобальной тектоники Земли (движение вещества показано стрелками)

в движении, хотя детали процессов не выяснены. Эта теория создала представление об упорядоченном, детерминированном характере развития верхней оболочки Земли. Нелинейная геодинамика позволила бы включить в рассмотрение «особенности неупорядоченного проявления во времени и пространстве структурообразующих движений в пределах тектоносферы». Создание такой теории позволит описать характер движения вещества в недрах в прошлом и будущем (рис. 10.5).

Метод интерферометрии со сверхдлинной базой (ИСДБ) дал возможность измерить колебания Земли, изменения скорости ее вращения и дрейф материковых плит, используя наблюдения за слабыми радиосигналами от квазаров, расположенных на краю Вселенной. Квазары служат как бы маяками, тем более что их удаленность не позволяет засечь их собственное передвижение в пространстве, да и распределены они по небу достаточно равномерно. Радиотелескопы на Земле, разнесенные на тысячи километров, должны следить за одним и тем же источником радиоизлучения. Метод ИСДБ позволяет засечь изменения положения в мантии или колебания земной коры с амплитудой в несколько сантиметров относительно оси вращения Земли или изменения ориентации оси в пространстве на величину около 10^{-3} угл. с при ускорении или замедлении вращения. Таким путем, например, установили, что Красное море расширяется со скоростью 1 см/год.

401

Возможности изложенных выше гипотез и теорий существенно бы возросли при учете действия природных физических полей, тем более что горные породы являются носителями электрических зарядов.

10.5. Геохронологическая шкала эволюции Земли

Установление продолжительности отдельных периодов и эпох, как и возраста Земли в целом, заставило обратиться к равномерному процессу, протекающему с известной скоростью в течение исследуемого периода и позволяющему делать количественные измерения. Эти соображения высказали Ломоносов («О слоях земных», 1763) и Ламарк («Гидрогеология», 1802). С этой целью пытались исследовать накопления солей в океане и другие ученые. Они получили оценки, не противоречащие расчетам, полученным другими методами.

Возрасты химических элементов и тел Солнечной системы определили по соотношению изотопов свинца Pb-206 — Pb-208 в метеоритах и земной коре и рассчитали: возраст Земли — 4,55 млрд лет. Возраст радиоактивных ядер в Солнечной системе примерно 4,8 млрд лет, и считают, что тяжелые ядра образовались непосредственно перед формированием планет примерно за 200 млн лет. Академик А. Е. Ферсман разделил время существования атомов Земли на три эпохи: эпоху звездных условий существования, эпоху начала формирования планет, эпоху геологического развития.

Термин «геохронология» принят в науках о Земле для обозначения времени и последовательности образования горных пород, слагающих земную кору. Относительный возраст пород оценивается достаточно просто в одном геологическом разрезе, поскольку каждый налегающий пласт образовался позднее того пласта, на который он ложится. Этот *стратиграфический метод* применяют и при сравнении возраста пород в разных разрезах, хотя приходится привлекать и данные палеонтологии для сопоставления возраста слоев.

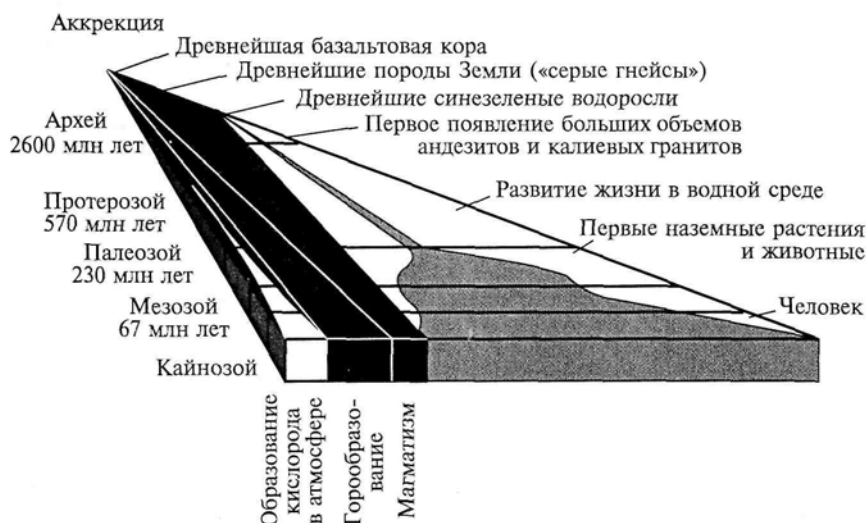
Геохронологическая шкала принята в 1881 г. на Международном геологическом конгрессе, на котором были введены термины: *эра, период, эпоха, век, время*. Хотя это разделение условно, но на рубеже соседних эр или периодов происходили существенные геологические преобразования, а каждое подразделение обладало

качественным своеобразием. Эры — наиболее крупные промежутки времени, включающие **катархей** (от образования Земли до зарождения жизни); **архей** (3,5 — 2,6 млрд лет); протерозой (2,6 млрд — 570 млн лет) и **фанерозой** (570 млн лет — наше время) (рис. 10.6).

По степени изученности вся история планеты делится на две части. Более древняя охватывает огромный интервал времени от

402

Рис. 10.6. Биогеологическая история Земли



570 до 3800 млн лет назад. Ее назвали **криптозоом**, или периодом со скрытым развитием жизни. Хотя он изучен недостаточно, геологи установили необратимый характер осадкообразования и основные тенденции эволюции Земли под влиянием развивающейся жизни.

Более молодая эра, составляющая 570 млн лет и названная **фанерозом** (от греч. *phaneros* — **явный** + *zoe* — **жизнь**), изучена лучше. К ней относятся формации палеозоя, мезозоя и кайнозоя. **Палеозой** (570 — 230 млн лет) включает периоды: **кембрий** (570 — 500 млн лет), **ордовик** (500 — 440 млн лет), **силур** (440 — 410 млн лет), **девон** (410 — 350 млн лет), **карбон** (350 — 285 млн лет), **пермь** (285 — 230 млн лет). К мезозою относят периоды: **триас** (23—195 млн лет), **юра** (195—137 млн лет) и **мел** (137 — 67 млн лет). Кайнозой разделяют на периоды и века. Период **палеогена** состоит из веков **палеоцена** (67 — 27 млн лет), **эоцена** (54 — 38 млн лет) и **олигоцена** (38 — 27 млн лет). Период **неогена** (27 — 3 млн лет) делят на века: **миоцен** (27 — 8 млн лет) и **плиоцен** (8 — 3 млн лет). Последний период назвали четвертичным. Он состоит из веков **плейстоцена** (3 млн—20 тыс. лет) и **голоцена** (20 тыс. лет — наше время).

Согласно обобщениям академика Н. М. Страхова в настоящее время в истории Земли выделяют четыре этапа химико-биогенного осадкообразования.

Первичные океан и атмосфера, когда живое появлялось в ограниченных масштабах. В ранний архей формировалась водная оболочка Земли, в океанах были растворены выделяемые вулканами

403

продукты: сероводород (H_2S), метан (CH_4), углекислый газ (CO_2), соляная (HCl), плавиковая (HF) и борная (H_3BO_3) кислоты, различные углеводороды. Сульфатов тогда, как и свободного кислорода для их образования из сернистого водорода, почти не было. В атмосфере преобладали CO_2 и NH_3 , присутствовали и HCl , H_2SO_4 , CH_4 и несколько инертных газов. Кислотность воды (pH) была порядка $\sim 1 - 2$. Температура на поверхности Земли составляла $65 - 80^\circ\text{C}$.

Началось образование первичных осадочных горных пород. Поверхность Земли была похожа на современную лунную: площади между вулканами занимал неглубокий океан, а вулканы выступали в виде островов. Климат был влажный, вулканогенно-осадочный, и климатических поясов в современном понимании не было. Наличие углекислоты в атмосфере способствовало выветриванию изверженных пород, образовывались карбонаты калия, натрия, магния, кальция и коллоидные частицы Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 . Попадая в кислую среду океана, они превращались в хлориды калия, натрия, магния и кальция, что меняло состав первичного океана, уменьшая его кислотность. Вулканические породы поверхности подвергались выветриванию, на них осаждались кремнезем и сульфиды тяжелых металлов. Это происходило в катархейскую эру.

Появление первых организмов вплоть до фотосинтезирующих. К концу **архея** состав морской воды изменился. Благодаря воздействию силикатов осадочных отложений и карбонатов K, Ca, Na, Mg, образовавшихся на поверхности суши при выветривании минералов вулканических пород под действием углекислой атмосферы, кислоты моря нейтрализовались. Кислотность воды уменьшалась, карбонаты вступали в реакцию с соляной кислотой, образуя хлориды. Менялся состав атмосферы. С суши поступали растворенные карбонаты, они не только преобразовывали хлоридную воду в хлоридно-карбонатную, но и выпадали в

осадок. Так наряду с песчано-глинистыми осадками и продуктами вулканической деятельности на дне океанов начали формироваться карбонатные отложения — доломиты и известняки. Усиленно отлагались хемогенный кремнезем и окислы железа с образованием илов (позже превращенных в железистые кварциты — источники современных месторождений железных руд). Сложившиеся толщи пород архея достигают огромной мощности (10—12 км). Они подвергались метаморфизму и складчатости, происходила гранитизация пород. Гранитные тела поднимались вверх в виде гранитных куполов, деформируя другие породы. Возник метаморфический слой с континентальным типом земной коры; на некоторых территориях современных материков, образуя их ядра, появились древние щиты, выступающие над водой.

С возрастанием роли азота атмосфера очищалась от аммиака и метана. Во время образования обширных континентальных мас-

404

сивов стали зарождаться климатические зоны — сухого, холодного (ледникового) и влажного климата. В морской воде начали выделяться доломиты $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, оседающие химическим путем на океаническое дно, где в основном в илах с прослойками минералов накапливались кремнезем, железо и марганец. Возникли многочисленные глинистые минералы, давшие начало образованию кристаллических сланцев. Все эти следы **седиментации** (от лат. *sedimentum* — оседание) расшифровываются с большим трудом.

Большая часть докембрийского периода — третий этап (от 3 млрд до 0,6 млрд лет до нашего времени). Протерозой представлен большим числом сильно метаморфизованных пород на нарастающей земной коре. В раннем протерозое на окраинах сложившихся щитов началось развитие первых геосинклинальных зон, где происходили процессы прогибания коры, накопление мощных вулканогенно-осадочных толщ, а затем внедрение гранитных массивов, метаморфизм, складчатость, поднятие этих участков — горообразование и поднятие континентов. Но были участки с медленным развитием этих процессов, и образовались крупные платформы жесткой стабилизации. В геосинклинальных зонах с мощными отложениями осадочных пород возникала складчатость. Процессы регулировались тектоническим развитием литосферы. Земная кора разрасталась по поверхности и в глубину. При этом осадочные породы погружались на глубины, подвергаясь процессам гранитизации и метаморфизма, теряя легкоподвижные компоненты, которые перемещались в верхние горизонты. Большая часть карбонатных материалов разрушалась, переходя в силикатные с выделением углекислоты. То же происходило и с водой.

Затем на окраинах платформ возникли новые геосинклинальные пояса — Тихоокеанский, Средиземноморский, Атлантический, Урало-Монгольский и Арктический; их развитие расширяло площадь континентальной коры. Усиливалось отложение доломитов и известняков, что было связано с появлением сине-зеленых водорослей и изменением состава атмосферы. Выделяющиеся при вулканических процессах сера и водород при наличии кислорода образовывали сульфаты, которые вытесняли из морской воды CO_2 в осадок, и наряду с чисто химическими явлениями, за счет связывания карбонатов микроводорослями, большую роль начали играть и органогенные известняки. От этого периода до нас дошли ледниковые отложения. Возникали континенты.

Первичные живые организмы были анаэробными, т. е. жили без кислорода, питаясь готовыми органическими веществами. Но резерв органики, возникающей из смеси неорганических веществ под влиянием жесткого солнечного излучения и грозových разрядов, иссякал. Поэтому природе следовало бы выработать способы

405

формирования крупных молекул иными способами. Преимущество получили те клетки, которые могли сами использовать энергию солнечного излучения. Некоторые простые соединения способны к этому, если в их состав входят атомы магния (как в хлорофилле). Усвоенная солнечная энергия ускоряла реакции обмена, необходимые для появления органики; она накапливалась, а затем расщеплялась с высвобождением энергии.

Решающие изменения произошли с появлением **фотосинтеза**. Он обеспечил независимость жизни от внешних питательных веществ. Появились **автотрофные организмы**. Их следы найдены в отложениях. Даже в породах архея находят остатки зеленых водорослей (3 млрд лет назад). В гидросфере и затем в атмосфере появился свободный кислород, быстро меняющий состав атмосферы; метан и аммиак почти исчезли благодаря окислению, стал убывать и CO_2 . Кислород был ядом для анаэробных организмов, они «прятались» в болота, где выделяли метан, или приспособлялись к дыханию, или вымирали. Переход к фотосинтезу длился долго. К кембрию атмосфера стала почти современной — азотно-кислородной по составу. Океан терял углекислоту, обогащаясь кислородом. Вулканическая сера и сероводород стали переходить в сульфатную форму H_2SO_4 . Серная кислота, взаимодействуя с растворенными карбонатами, вытесняла углекислоту, а вода обогащалась сульфатным ионом $(\text{SO}_4)_2$. Металлы стали менее подвижны, в кислородной среде они осаждались уже в высших стадиях окисления, накапливались толщи пород, содержащих железо в окисной, карбонатной и сульфидной формах, например Курская магнитная аномалия, Кривой Рог, Нама-Трансвааль (Южная Африка), Хамерсли (Австралия), Верхнее озеро и Лабрадор (Северная Америка) и другие, относящиеся к залеганию пород, которое произошло 3 — 2 млрд лет назад. Возросшая масса органического вещества присутствует в отложениях третьего периода докембрия, появляются горючие сланцы и множество рассеянных органических отложений.

Фанерозой — последний этап развития верхних геосфер. Возникают две обширные платформы — Гондвана и Лавразия (Лаврентьевский щит + Азия), развиваются все известные формы осадочных пород внутри континентов в пониженных местах. Существенно изменяется биосфера из-за быстрого развития жизни и «кислородной революции». Произошел переход от *прокариотов* к *эукариотам*. В начале палеозоя живое вещество переходит на сушу, занимая области с влажным климатом, формируя наземные флору и фауну. Масса живой материи резко растет, жизнь проникает и в более глубокие области океанов. Меняется качественный состав живого, организмы начинают усваивать минеральные вещества для формирования своего скелета. Развивающаяся жизнь меняет и мир вокруг себя. Морская вода становится все более хло-

406

ридно-сульфатной, такие элементы, как Fe, Mn, P, Co, Va, Cu, стали существовать в виде малорастворимых, сильно окисленных соединений, и концентрация их в морской воде резко упала. Обилие кислорода снизило подвижность Fe, Mn, P, Va, Cr, Co, Cu, Ni и др., они оказались только в виде взвесей, поэтому их залежи могут быть вблизи берегов моря. На суше процесс накопления солей происходил периодически. В океанах формировались битуминозные глины, горючие сланцы, а на суше — угли.

Для образования углей более подходящими были каменноугольный и пермский периоды, а после ослабления процесса в триасе — юрский, меловой и палеогенный периоды. Организмы стали использовать для образования скелетов CaCO_3 и SiO_2 , что сделало состав морской воды щелочным. Начали осаждаться фосфориты, что привело к появлению их месторождений. Так, под влиянием живого вещества океан стал иным, и осадочные породы из закисно-окисных стали углисто-карбонатно-галогенными. Эволюция Земли как планеты и эволюция живого на ней были взаимосвязаны и взаимозависимы. На весь ход миграции химических элементов в верхних оболочках Земли все сильнее — и прямо, и косвенно — влияло живое вещество биосферы.

Изменение облика нашей планеты можно оценить при изменении масштаба восприятия. Для наглядности геолог и путешественник князь П.Н.Кропоткин создал «сценарий» такого «фильма», когда каждая секунда экранного времени соответствует миллиону лет жизни Земли. Первые 2 — 3 мин идут «кадры» сотворения мира: из сгустка космической пыли, газа и обломков погибших миров формируется шарообразное тело планеты. Следующие 40 мин «фильма» — рассказ о древнейшем этапе геологической истории (архейская эра), Земля обрела первичную атмосферу, на ней появилась жизнь. Но развивалась жизнь очень вяло, и почти ничего не изменилось за 2 млрд лет, или 33,3 мин. Только в протерозое всего за 17 мин (1 млрд лет) растительность распространилась из океанов на прибрежные участки суши; появились черви, моллюски, трилобиты. Все развитие жизни (фанерозой) промелькнет за 10 мин — «кадры» будут меняться с огромной скоростью, будут меняться контуры материков, растительность, рельеф, виды животных и т.д. Меняются физические поля и атмосфера. И из этих 10 мин история человека займет лишь 2 с.

10.6. Самоорганизация при образовании планет и взаимодействии геосфер

До недавнего времени считалось, что можно рассматривать моря, леса, горы, атмосферу не только отдельно друг от друга и от всего живого мира, но и по частям или слоям. Тесная взаимосвязь между ними делает такой подход подчас бессмысленным, требует единого подхода. В какой-то степени это следствие успе-

407

хов аналитического естествознания. В.И.Вернадский, разрабатывая модель биосферы, неоднократно отмечал, что Гете мыслил синтетически, не признавая возможности деления природы на части и считая, что ее можно изучать как целое. И Вернадский внес количественные оценки в качественную модель Гете. Для описания природы (особенно в биологии и геологии) практически нельзя пользоваться моделями, которые «отрицают стрелу времени».

Окружающий нас мир, от элементарных частиц до галактик и биосферы, существенно далек от равновесия. В галактиках идет постоянный обмен веществом и излучением между звездами и межзвездными облаками. Внутри звезд протекают грандиозные неравновесные процессы, особенно сильные в пульсирующих звездах типа цефеид. В недрах звезд происходят мощные термоядерные реакции с выделением огромной энергии. На конечных стадиях жизни в звездах типа белых карликов вещество как бы конденсируется в одну гигантскую «молекулу», находящуюся в нижнем квантовом состоянии, резко уменьшающем энергетические потери. В нейтронных звездах возникает упорядоченное состояние вещества, которое похоже на явление сверхтекучести.

Явление самоорганизации было обнаружено в кольцах Сатурна — шестой по порядку от Солнца и второй по величине планете Солнечной системы. По массе она в 3 раза меньше Юпитера, так как ее плотность всего $0,7 \text{ г/см}^3$, и состоит она в основном из водорода и гелия. Колец у Сатурна несколько, их толщина менее 3,5 км, а диаметр внешнего из них 275 тыс. км. Они охватывают планету по экватору, никогда не соприкасаясь с ее поверхностью, и вращаются вокруг нее под углом 27° к экватору, поэтому можно видеть кольца то с одной, то с другой стороны. Внутренние кольца вращаются с большей скоростью, чем внешние. Было установлено, что кольца — это плоская система из огромного числа мелких спутников планеты. Их спектры содержат линии,

характерные для чистого льда и водяного инея. Среди 24 «настоящих» спутников Сатурна один из самых больших спутников в Солнечной системе по размерам и массе — Титан — имеет атмосферу, состоящую в основном из метана и водорода.

Когда Гюйгенс догадался, что Сатурн окружен «тонким и плоским кольцом», это было столь неожиданно, что он зашифровал свою идею. Кольца Сатурна исследовал Ж.Д.Кассини (1675), установивший промежуток между кольцами А и В (щель Кассини), а его сын, Ж. Кассини, высказал идею метеоритного строения колец. Сквозь щели между тремя кольцами просвечивают звезды. И.Кант описал (1755) кольца как послыбно вращающийся разреженный диск сталкивающихся частиц, который из-за этих соударений разбивается на узкие колечки. Исследования Лапласа по устойчивости колец продолжил Максвелл. Он показал, что кольцо не может быть плотным и привел уравнение (называемое сейчас дисперсионным), определяющее собственные частоты колебаний колец.

408

Среди колец Сатурна есть кольца, названные именами Гюйгенса и Максвелла.

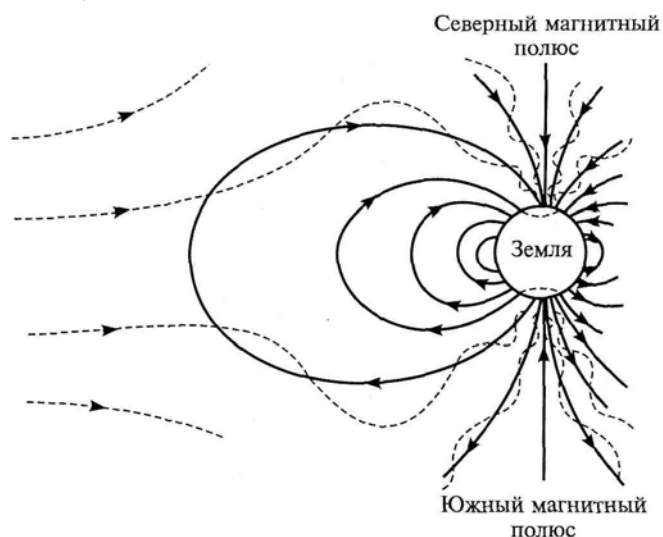
Американскими астрономами с борта «Боинга» были открыты 9 колец Урана (1977). Эти кольца оказались очень четко очерченными, без всякой диффузии на краях. В 1986 г. космический аппарат «Вояджер-2» впервые приблизился к Урану, открыв 10 новых спутников и еще 2 кольца. В середине 80-х гг. обнаружили кольца возле Нептуна. Открыты кольца шириной 1 000 км и у Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы, радиус которой больше земного в 11 раз. Изучение планетных колец показало, что наблюдаемые явления могут быть объяснены столкновениями и коллективными взаимодействиями частиц. Эти пространственные структуры образуются благодаря тому, что в энергетическом отношении они — открытые системы, способные к самоорганизации. Эти выводы проецируются на явления в протопланетном облаке и раскрывают космогонию планет.

В строении колец были обнаружены **различные неустойчивости**: *гравитационная* — делит диск на кольца, ширина которых примерно одного порядка с их толщиной; *аккреционная* (от лат. *accretio* — **приращение, увеличение**) — влияет на крупномасштабное расслоение колец; *энергетическая* (или тепловая) — перемешивает частицы так, что возможны эффекты типа «отрицательной диффузии» — продвижение частиц в более плотные области. В силу действия последней кольца работают как тепловая машина, или открытая система, — энергия орбитального движения из-за вязкого трения превращается в теплоту, уносимую в пространство. Математически прирост плотности кольца описывается так же, как возникновение молекул и радикалов в химических реакциях. Внешние спутники вызывают ряд резонансных явлений в дисках. Так, наблюдаемые щели в кольцах имеют резонансную природу. Щель Кассини в кольцах Сатурна вызывается мощной спиральной волной спутника Мимас, коллективные свойства которой позволяют ей распространиться далеко от точки резонанса. Пыль стабилизирует вихревые процессы внутри спиральной волны. Общая картина взаимосвязей внутри Солнечной системы столь многообразна, что Солнце, планеты, спутники, кольца, околосолнечное и межпланетное пространства образуют целостную и существенно неравновесную нелинейную систему. Конечно, энергетический вклад Земли, например, по сравнению с энергетическими характеристиками солнечных процессов очень мал, но в системах, далеких от равновесия, и малые величины могут при определенных обстоятельствах привести к значительным последствиям.

За счет изменений солнечной активности в Солнечной системе становится переменным поток излучаемой энер-

409

Рис. 10.7. Земля как большой магнит (траектории заряженных частиц показаны штриховыми линиями, магнитные силовые линии — сплошными)

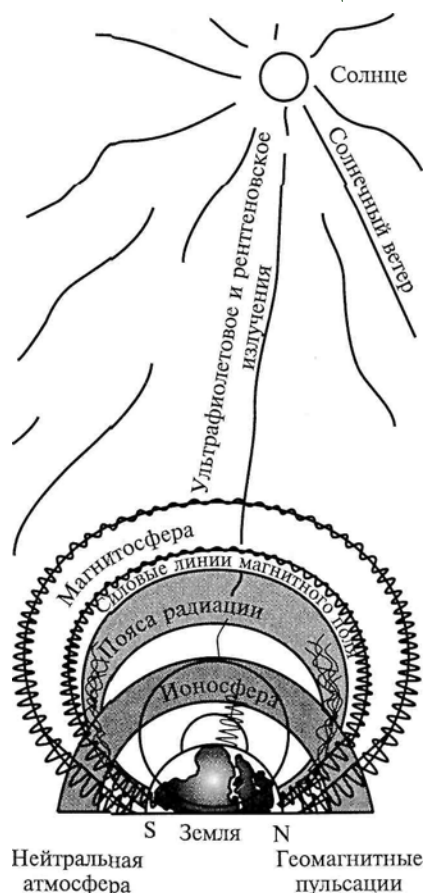


гии. Хотя возникающие вариации излучений малы (порядка 0,1 % общей энергии излучения Солнца), порождаемый ими солнечный ветер может колебаться в интервале двух порядков величины, существенно влияя на планетные магнитосферы и процессы в атмосфере. При этом интенсивность излучения в оптическом «окне прозрачности» атмосферы почти не зависит от солнечной активности, а интенсивность проникающего радиоизлучения, зависящего от нее, очень мала. Ускоренные во вспышках частицы (солнечные космические лучи) преодолевают магнитные поля в атмосфере Солнца, межпланетном и околоземном пространствах (рис. 10.7). Вблизи Земли они вступают в непосредственное взаимодействие с частицами ионосферы и атмосферы, вызывая геофизические явления типа усиленного поглощения коротких радиоволн, приходящих из космоса.

Достаточно устойчивые радиационные пояса Земли, занимающие огромное пространство, которое заполнено заряженными частицами, защищают Землю. Магнитное поле Земли удерживает и перераспределяет потоки космических лучей. Эти области остро реагируют на магнитные бури, происходящие на Солнце. Исследователи земного геомагнетизма С.Чепмен и В.Ферраро показали (1940), что магнитное поле Земли начинает чувствовать воздействие внешнего потока заряженных частиц при плотностях, больших 10^4 м^{-3} . Критическое значение плотности связано со скоростью частиц v простым соотношением: $n = 6,8 \cdot 10^{-11} v \text{ (м}^{-3}\text{)}$, где v в

410

Рис. 10.8. Наглядное представление системы Солнце — межпланетная среда — Земля



($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$). Отсюда можно вычислить плотность и спокойного солнечного ветра ($E = 10 \text{ эВ}$, $v = 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), $n = 10^{-6} \text{ м}^{-3}$, и возмущенного ($E = 10^3 \text{ эВ}$, $v = 4,35 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), $n = 10^{-5}$. Для солнечных космических лучей $E = 10^7 \text{ эВ}$, $v = 4,35 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $n = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, плотность частиц в солнечном ветре заведомо превышает критическое значение, что имеет важные последствия для магнитосферы.

Магнитное поле Земли напоминает поле плоского магнита с двумя полюсами и представляет собой некоторое препятствие для потока солнечной плазмы. Скорость этого потока больше скорости звука в солнечном ветре, поэтому имеет место явление, соответствующее сверхзвуковому обтеканию препятствия в гидродинамике, и перед препятствием образуется ударная волна. Ее фронт имеет форму параболоида, и при прохождении через него солнечной плазмы замедляются ее движения и переход *кинетической энергии в тепловую*. Такая «разогреваемая» плазма обтекает геомагнитное поле и оказывает на него давление. Но последнее не может сжиматься безгранично. Границей сжатия является *мезопауза* — область магнитосферы, расположенная на расстоянии примерно 10 земных радиусов от поверхности. Наблюдения с космических аппаратов подтвердили эту картину (рис. 10.8).

Изменения солнечной активности влияют на формирование циклонов. Из-за неравномерного, хотя и малого по величине, нагревания верхних слоев атмосферы начинается слабая горизонтальная подвижка верхних слоев воздуха — *адвекция* (от лат. *advectio* — *доставка*), вызывающая небольшой вертикальный

подъем воздуха. Если воздух влажный, при таком подъеме будут конденсироваться водяные пары, выделяться теплота, что усиливает нагрев,

411

а с ним и адвекцию. Рост массы поднимающегося воздуха увеличивает конденсацию. Начинается раскручивание неустойчивости, порог которой сильно зависит от влажности воздуха. В устойчивом состоянии атмосфера может пребывать долго, но вблизи неустойчивого состояния изменение любого малого параметра может сыграть роль «спускового крючка». Тем самым нарушается глобальная циркуляция воздуха, и все течения в атмосфере, связанные с конвекцией, существенно меняются даже от слабых воздействий. Расчеты показали, что близкие в начальный момент решения для неустойчивой гидродинамической модели атмосферы очень быстро расходятся и приводят к сильно отличающимся результатам. Такие расхождения не позволяют сделать надежный прогноз погоды более чем на 5 — 7 дней (расхождение параметров почти вдвое).

Процессы, происходящие в земной атмосфере, сложны и связаны с множеством действующих факторов. С помощью модельных экспериментов удалось получить интересные результаты, объясняющие сходные явления в метеорологии, океанологии и астрофизике. Например, обращает на себя внимание факт преобладания западных ветров в Северном полушарии Земли. Казалось бы, атмосфера должна вращаться вместе с твердой оболочкой Земли, но она вращается быстрее — *суперротация*. Энергия общего упорядоченного движения атмосферы поддерживается в основном за счет крупномасштабных вихрей, или хаотического движения (отрицательная вязкость). С точки зрения обычной термодинамики энергия должна рассеиваться, но тут возникает масштабное явление, соответствующее как бы обратной диффузии, направленной в сторону понижения энтропии.

При исследовании периодичности взаимодействия системы «атмосфера — океан» американские ученые К. Россби и Х. Виллетт обнаружили (1944), что в атмосфере чередуются состояния с повышенной скоростью упорядоченного западно-восточного переноса, при котором энергия вихревого движения понижена, с противоположной ситуацией, когда преобладают неупорядоченные вихревые процессы — *циклоны и антициклоны*. Был открыт основной закон формирования колебательного процесса циркуляции атмосферы. Среднюю скорость западно-восточного переноса характеризуют индексом Россби, а открытые Россби и Виллеттом колебания — циклом индекса. Все процессы в тропосфере описали в новых терминах и связали с изменением типа циркуляции. На погодных картах обратили внимание на упорядоченные образования — планетарные волны давления, захватывающие огромные пространства и связанные с атмосферными фронтами и зонами осадков и струйных течений, формирующих погоду, которые управляют непонятным механизмом, связанным с циклом индекса. От него зависят амплитуда и длина планетарных волн.

412

Английский ученый Р. Хайд поставил опыт (1953), имитирующий гидродинамические процессы в земном ядре, во многом напоминающие процессы в атмосфере. В кольцевом сосуде вращалась жидкость, причем разница температур между внутренним и внешним цилиндрами могла задаваться извне. При возрастании температурного градиента, как и при увеличении скорости вращения жидкости, в ней возникали упорядоченные структуры (вихри Тейлора), напоминающие планетарные волны. Они более заметны, если к жидкости примешивали порошок. При достижении критических значений разницы температур эти структуры внезапно исчезали, движение становилось хаотическим. Очевидно, что эти явления важны в астрофизике: во многих случаях звезды можно рассматривать как вращающиеся жидкие массы, внутри которых имеются температурные градиенты. Хайд обнаружил явление «качания» вблизи границы перехода от порядка к хаосу, уловив возникновение собственных колебаний системы в передаче энергии от упорядоченного движения к хаотическому и обратно. Эти «качания» метеорологи сопоставили с циклом индекса и придали ему более широкий смысл, считая эти явления общими для всех вращающихся жидкостей и газов. Динамика атмосфер других планет похожа на земную, там тоже есть струйные течения, планетарные волны, цикл индекса. Все они нашли объяснение в особенностях вращения неравномерно нагретой жидкости.

Циркуляция в океанах напоминает атмосферную — обнаружены «синоптические» вихри, подобные циклонам и антициклонам. В океанических течениях (Гольфстриме, Антарктическом, Курошио) также выделены колебания с периодом 1 — 3 года между упорядоченным и хаотическим типами течения. Все эти явления — примеры диссипативных структур. Их возникновение связано с неравномерностью нагревания планеты солнечными лучами, при котором возникают условия для роста упорядоченности в атмосфере и океане и уменьшения энтропии. Эксперимент Хайда и другие аналогичные опыты показывают, что явление цикла индекса в атмосфере, как и аналогичное ему явление осцилляции в океане, наблюдается в точке фазового перехода между двумя различными режимами вращения неравномерно нагретой жидкости или газа.

Сходства между колебаниями жидкости в лабораторных опытах, колебаниями в планетарных атмосферах и циклом солнечной активности оказались и количественными. Между циклом солнечной активности в 11 лет и циклом индекса в атмосферах также есть подобие. Возможно, эта периодичность солнечной активности связана с существованием индекса в солнечной атмосфере или аналогичным явлением. Чтобы наблюдать структурирование в эксперименте, нужно подобрать соотношение между скоростью вращения и разницей температур. Это еще раз показывает, что наша планета находится в уникальных условиях, а изменения малых параметров, влияющие на климат, могут привести к быстрым и катастрофическим последствиям. Это

подтверждают расчеты на ЭВМ, проведенные с целью выяснения последствий ядерного конфликта.

413

На неустойчивость солнечной атмосферы некоторое влияние оказывает и приливное действие со стороны планет. Существуют теории связи расстояний планет от Солнца с волновыми процессами в плазме солнечного ветра, заполняющей Солнечную систему. Эти процессы носят нелинейный неравновесный характер и связаны со многими весьма малыми параметрами системы. Аналогичные процессы с развитием неустойчивостей происходят и в океанах, и в мантии Земли. Тектоника литосферных плит, разрастание дна океанов, формирование желобов объясняются конвекционными процессами. Движение плит земной коры вызывает напряжения, которые создают неустойчивые состояния, зачастую чреватые землетрясениями, извержениями вулканов и т.п.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Какие гипотезы происхождения Земли Вам известны? Какие закономерности движения нашей планеты они могут объяснить? Что общего в эволюции планет земной группы?
2. Какие гипотезы о происхождении Луны Вы знаете? Почему средняя плотность пород Луны меньше, чем пород Земли? Как определяют возраст горных пород?
3. Перечислите в порядке распространенности четыре-пять химических элементов, составляющих земную кору. Какую роль при образовании планетных тел сыграли соединения железа?
4. Почему существует некая закономерность в распределении элементов, связанная с порядковым номером в таблице Менделеева?
5. Что доказывает единое для всех тел Солнечной системы распределение химических элементов?
6. Поясните геохронологическую шкалу. С чем связано такое разделение? Как Вы можете описать первичную атмосферу и океан Земли?
7. Какие изменения происходили на Земле в эру палеозоя? Поясните, что изменилось на Земле с появлением первых организмов.
8. Назовите основные отличия континентальной коры от океанической по составу. Как можно изучать взаимодействие между ними? Какие процессы при этом происходят?
9. В чем суть гипотезы литосферных плит? Как она связана с дрейфом континентов?
10. Поясните процессы роста континентальной коры. В каких областях наблюдается повышенная магматическая активность? Каковы перспективы будущего дрейфа континентов?
11. Объясните, почему состояние протопланетного облака было далеким от равновесия. Какие факторы послужили толчком к образованию планет?
12. Назовите условия, способствующие процессу самоорганизации в атмосфере. Почему не удастся осуществлять долгосрочный прогноз погоды?

Глава 11. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ, СВОЙСТВА И УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ УРОВЕНЬ

11.1. Общая характеристика науки о живом и развитие традиционной биологии

Биология (от греч. *bios* — жизнь + *logos* — понятие, учение) — это наука о живом, его строении, формах активности, связях организмов с неживой природой и друг с другом, имеющая определенные объективные закономерности. Ее цель — познание феномена жизни. Биология занимается изучением различных видов живой природы и их взаимоотношений друг с другом и с внешней средой. Можно выделить три направления биологии, имеющих одну цель и один объект исследования: традиционная, или натуралистическая, физико-химическая и эволюционная. Это условное деление не связано с историей развития науки. Ведутся поиски объединительного начала для создания теоретической биологии, и весьма вероятно, что оно будет найдено с помощью системного подхода в рамках единого естествознания.

Базу накопления биологических знаний и аграрной культуры заложили приемы селекции, стимулированные становлением земледелия и скотоводства. Древние цивилизации накопили много сведений о растениях и животных, одомашнили овец, свиней, уток, крупный рогатый скот. В эпоху образования классов выделилась медицина, требующая специальных знаний и навыков, и изменилось отношение к самому человеку. Формировались традиции лечебного использования трав, цветов, отваров плодов, коры деревьев, минералов, животных жиров и пр. Совершенствовались хирургические приемы, массаж и иглоукалывание. Книдская школа испытывала влияние восточной медицины, часть ее трудов вошла в «Свод Гиппократов». Алкмеон Кротонский начал анатомизировать трупы животных, описал зрительный нерв и развитие куриного эмбриона. Он считал мозг органом мышления и ощущений, изучал роль ведущих к нему нервов. Гиппократ отделял медико-биологические знания от магии, знахарства, колдовства и пр. Он считал жизнь единым процессом, выделяя роль среды и наследственности в возникновении болезней, а его ученик, Герофил, выше всего ставил наблюдения и опыт. Проводя в Александрии опыты по вивисекции над преступниками, он установил диагностическое значение пульса и различия между венозной и артериальной кровью. Изучив анатомию печени, глаза и других органов и сопоставив их с анатомией животных, Герофил внес большой вклад в создание терминологии. Прекрасным анатомом был К. Гален, но так как в Риме в то время вскрытие трупов было запрещено, он изучал анатомию животных, центральную и периферическую нервную системы.

415

Гален доказал, что артерии наполнены кровью, связывал с деятельностью спинного мозга процессы дыхания и сердцебиения. В практической медицине уделялось внимание фармакологии, действию растительных лекарственных препаратов. Уже тогда люди задумывались о том, как особенности живых организмов передаются потомкам.

Традиционная биология, соответствующая классической направленности познания, явилась во многом источником конкретных знаний о живой природе. Пока успехи физики, химии и техники не открыли возможности для ученых, она была описательной наукой о формах и видах растительного и животного царства. Совокупность растений называют *флорой*, а совокупность животных — *фауной*. Объект изучения традиционной биологии — живая природа в ее естественном состоянии. Э. Дарвин ввел даже отдельный термин «Храм природы», отражающий благоговение перед совершенством ее созданий и ее Создателем. В современное время вклад традиционной биологии в биологию и все естествознание растет, ведь она изучает нерасчлененную природу во всем многообразии связей.

Проявления жизни на Земле чрезвычайно многообразны, образуя ее живую оболочку. Первые живые организмы на Земле появились, по разным оценкам, 2 — 4 млн лет назад, а более 1 млрд лет назад растения и животные начали раздельное существование и развитие от единого предка. Между животными и растениями много и сходств, и отличий. Но растения и животные объединены во взаимозависимые сообщества, в которые помимо них входят производители, потребители и разрушители живой материи, а также некоторые компоненты неорганической природы. Для изучения такого огромного мира живой природы нужно произвести классификацию по каким-либо сходным группам. Этим занимается часть биологии, называемая *систематикой*, и ее значение трудно переоценить. На Земле идентифицировано почти 2 млн видов животных и растений, из которых большая часть уже вымерла, но есть еще не открытые.

Основы биологической классификации заложил еще Аристотель. Его учение о материи и форме основано на *наблюдениях* за живой природой. Организм — законченное целое, реализация формы. Каждая часть организма выполняет функцию, составляющую цель его существования. Вещества органов — это материя, а рост — реализация скрытых в ней возможностей. Аристотель исследовал строение более 500 животных, отметив общий план строения высших животных и описав их внешний вид, рассказал об их образе жизни,

нравах. Вместе со своим учеником Теофастом он разделил животных на водные, земные и воздушные, а растения — на травы, деревья и кустарники. Такую классификацию называют *естественной*. Теофаста считают основоположником ботаники, он выделил однодольные и двудольные растения, от него пошла тер-

416

мины — плод, сердцевина, околоплодник. Аристотель высказывался о единстве живой природы и возможности ее развития, хотя отрицал эволюцию органического мира. Он одним из первых высказал догадку о существовании переходных форм между растениями и животными и ввел в биологию идею о *расположении существ (от минералов до человека) на определенной шкале*.

С упадком античной цивилизации отношение к природе и человеку изменилось. Христианство рассматривало тело человека только как ничтожную оболочку души, а к X—XI вв. латинская церковь ввела даже безбрачие. Арабский ученый Ибн Сина (Авиценна) искал причинные закономерности в мире природы. На Руси сведения о живой природе были обобщены в «Поучении Владимира Мономаха» (XI в.). Устами Фомы Аквинского церковь провозгласила: «Философия — служанка богословия». Расцветали магия, астрология, колдовство. Натурфилософию арабов, освоивших античные знания и соединивших их с достижениями индусской и китайской культуры, представляет Аверроэс. Альхазен, изучив физиологию зрения и строение глаза, строит ход лучей в нем. Английский мыслитель Р.Бэкон, знакомый с достижениями арабской оптики, советует людям со слабым зрением прикладывать чечевицу к глазам, пишет о камере обскуре. Бэкон выступил против схоластики и призвал не только к освоению античного наследия, но и к добыванию знаний через наблюдения и опыт. Но его труды стали известны лишь через столетие, а сам он был брошен в тюрьму. После упадка знаний в Средние века данные о растениях и животных были собраны в энциклопедии немецкого монаха Альберта Великого (XIII в.), но мир живой природы еще предстал в качестве символов, выражающих идеи творца.

В эпоху Возрождения формировались *стандарты, критерии и нормы изучения* живой природы.

Реформация способствовала возрождению эллинических взглядов на бытие и природу человека, новая нравственность основывалась на развитии естественных свойств человека вне зависимости от религиозных убеждений. Поскольку человек — «венец творения», алхимия настроилась на поиск и изготовление лекарств; развивалась медицина; создавались «аптекарские сады», конезаводы и зоопарки. Леонардо да Винчи описал поведение птиц в полете, способ соединения костей суставами, деятельность сердца и зрительной функции глаза, открыл щитовидную железу. А.Везалий заложил основы научной анатомии, В.Гарвей открыл кровообращение, Дж. Борелли, описав механизмы движения животных, выделял большую роль нервов в осуществлении движения и заложил основы физиологии, а Дж. Майов сравнивал горение и дыхание.

Изобретение микроскопа дало сильнейший импульс развитию биологии. Биологические знания с XVII в. стремительно дифференцировались — последовательно выделялись анатомия, физиология, ботаника, зоология. А. Ван Левенгук обнаружил *мир мик-*

417

поорганизмов. В трудах Р. Гука, Н. Грю, Я. Гельмонта и других ученых получила развитие *анатомия растений*, были открыты *клеточный* и *тканевый уровни* организации растений, сформулированы первые догадки о роли листьев и солнечного света в их питании. Совершенствование методов искусственного опыления закладывало предпосылки *генетики*. В XVII в. сложился своеобразный синтез анатомии и физиологии, предвосхищающий структурно-функциональный подход. Начинали формироваться научная методология и методики исследования органического мира. Накопленный материал требовал обобщения.

Первый этап натуралистической биологии завершился в XVIII в. созданием **систем классификации животных и растений**. В начале века английский биолог Дж. Рей описал более 18,6 тыс. видов растений, введя понятия *род* и *вид*. Он считал, что «один вид никогда не зарождается от семян другого вида», т.е. к одному виду относится группа сходных организмов, происходящих от сходных предков. Сходные признаки — строение рогов или копыт. Шведский ученый К.Линней уточнил понятие «вид», добавив способность «детям» давать плодovitое потомство. Он описал более 10 тыс. видов растений и более 4 тыс. видов животных, ввел терминологию и иерархический порядок описания видов и наименования — *класс, отряд, род, вид*. Так, класс включает несколько отрядов, отряд — несколько родов, род — несколько видов. В животном мире Линней выделил 6 классов (млекопитающие, птицы, амфибии, рыбы, насекомые, черви). Эти группы он назвал *таксонами*. С той поры вид — важнейший таксон, хотя сначала в основу разграничения видов были положены морфологические различия — определенный план строения. Сам Линней считал эту классификацию поверхностной, но его бинарная номенклатура (вид, род) практически сохранилась. Вслед за бинарным обозначением вида (род и вид) обычно указывают первооткрывателя вида и год открытия.

При создании естественной классификации выявляли некое «сродство» растений, но организация живого долго не связывалась с зависимостью от истории его развития, так как считалось, что живой мир неизменен и создан Богом. К.Линней считал, что меняться могут только разновидности, а виды неизменны, поскольку «видов столько, сколько различных форм сотворила предвечная сущность». Ж.Бюффон изложил свою *концепцию трансформизма* (на уровне ограниченной изменчивости видов под влиянием окружающей среды) животного мира в своей «Естественной истории» — 36-томной энциклопедии.

После К.Линнея Ж.Кювье ввел понятие о *типе* животных и описал несколько типов. Ламарк выделил в

природе тела организованные, живые и неорганизованные, неживые. В «Естественной истории растений» (1803) он обращал внимание на происхождение-

418

ние и выделение родственных групп растений. Отметив существование промежуточных разновидностей, сходство ряда черт у животных разных видов, изменение видовых форм при переходе в новые условия и изменения при окультуривании или одомашнивании, Ламарк распределил их по классам несколько иначе, чем Линней. Он разделил животных на позвоночных и беспозвоночных, выделил в отдельные классы паукообразных и кольчатых червей, обосновал идею о путях происхождения человека от обезьяноподобных предков (1809). Затем, после введения понятия «*семейство*», виды стали объединять в роды, роды — в семейства, семейства — в отряды, отряды — в классы, классы — в типы, типы — в царства. Немецкий ученый Э. Геккель разделил живой мир на *царства* — простаты, животные и растения. Затем таксоны «дифференцировались» — появились *надцарства* и *подцарства* и т. п. После работ Геккеля стали говорить и о *генеалогических древах* и *стволах*. Из одного ствола происходят классы, отряды, семейства, роды.

Так сходство строения и эволюционные связи постепенно входили в систематику мира живой природы. Для классификации существуют различные методы, сейчас широко применяют молекулярно-генетические методы с использованием ЭВМ. В традиционной биологии противостоят целостный подход и редукционизм, соответствующие витализму и механицизму, а также телеология и механистический детерминизм. В настоящее время значение натуралистической биологии вновь возросло в связи с экологическими проблемами.

Физико-химическая биология включает в себя изучение тех же объектов живой природы, но с использованием физико-химических методов. В первой половине XIX в. эти методы стали использовать для изучения жизни (Г. Дэви, Ю. Либих), и *физиология* отделилась от *анатомии*; тогда же возникла *бактериология*, которая благодаря трудам Л. Пастера, Р. Коха, И. И. Мечникова впоследствии выросла в самостоятельную науку — *микробиологию*. В течение века сформировались смежные дисциплины — *биохимия*, а в конце — и *биофизика*. В 1865 г. появилась работа Г. Менделя «Опыт над растительными гибридами», в которой было установлено существование генов и сформулированы закономерности, относимые теперь к законам наследственности. После повторного их открытия в 1900 г. появилась и *генетика*. В 40—50-е гг. XX в. в качестве объектов стали использовать микроорганизмы, и поток новых знаний скачкообразно привел к изучению явлений жизни на молекулярном уровне. Возможности исследований существенно выросли после открытия нуклеиновых кислот, в частности дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой (РНК) кислот, а также соединений, содержащих фосфорную кислоту (например, аденозинтрифосфат — АТФ), гормонов, ферментов, ви-

419

русов, биосинтеза белка и т. д. В 1944 г. была открыта генетическая роль ДНК, в 1953 г. — выяснена ее структура, в 1961 г. — расшифрован генетический код, в 2001 г. — расшифрован геном человека. Так происходило объединение молекулярной биологии и молекулярной генетики, называемое физико-химической биологией.

В своем большинстве биологические специализированные дисциплины развивались путем *редукции* (дробление сложных явлений на простые, в основе которых лежат физические и химические законы). Физико-химическими методами пользовались Л. Пастер, И. М. Сеченов, И. П. Павлов, сумевшие проникнуть в суть многих процессов жизнедеятельности. Арсенал методов существенно расширился, обеспечив резкий взлет биологической науки. Ныне широко используют рентгеноструктурный анализ, метод меченых атомов, электронную микроскопию, спектральные и хроматографические методы, различные зондирования, томографию и др.

Эволюционная биология активно развивается и выводит биологию на лидирующее положение в естествознании. И. Ламарк и Бюффон считали неорганическое вещество умершим, т. е. прошедшим через воздействие жизни. Ламарк отмечал важность длительности истории планеты для образования жизни (1809) и, утверждая связь организации живого и истории его развития, стал использовать эволюционный подход к классификации животного мира. Позже стали появляться и эволюционные идеи не только в систематике, но и в эмбриологии, созданной трудами К. Вольфа, К. Бэра и др. Переход от трансформизма к эволюционизму в биологии происходил в конце XVIII в. Во второй половине XIX в. благодаря Ч. Дарвину в биологию вошел исторический подход, который превращал биологию в науку, способную объяснять происхождение и функционирование многообразных живых систем. Идея естественного отбора как механизма, позволившего «отбраковывать ненужные формы» и образовывать новые виды, нанесла смертельный удар по телеологии в естествознании и утвердила рациональный смысл в биологии. Содержание эволюционной биологии стремительно расширяется. Этому способствуют знания, полученные в других научных дисциплинах. В последние годы наблюдается мощный всплеск построения и исследования самых разнообразных кибернетических моделей, используемых для постижения эффективно функционирующих живых организмов, формируется научная дисциплина — *эволюционная кибернетика*.

В настоящее время биология представлена комплексом биологических наук. Различие наук может быть по *объектам исследования* — вирусология, бактериология, ботаника, зоология, антропология. С позиции

проявлений свойств живой материи различают морфологию (науку о функционировании организмов), молекулярную биологию (изучающую микроструктуру тканей и клеток), генетику (науку о законах наследственности и изменчивости), экологию

420

(науку о взаимосвязи растений и животных с окружающей средой). Уровень *организации исследуемых объектов* отражен в отдельных науках — анатомии (макростроение организмов), гистологии (строение тканей), цитологии (строение клеток). Использование методов смежных дисциплин привело к созданию физико-химической биологии, биофизики, биохимии, астробиологии и др.

11.2. Основные свойства живой материи

Биологический уровень организации материи очень сложен, его нельзя свести к закономерностям других естественных наук, и принципы живого нельзя вывести из принципов физики и химии. Существует несколько подходов к определению живого вещества.

1. Сторонники витализма — учения, основанного на признании наличия в организмах управляющей ими нематериальной сверхъестественной силы («души»), считают жизнь явлением уникальным, которое невозможно объяснить физико-химическими процессами. В основе такого взгляда — удивительная сложность строения и целесообразность поведения живых организмов.

От древности идет представление об *энтелехии*, одушевляющей «грубую материю тела» и обеспечивающей организмам целенаправленное поведение. Древние египтяне и греки предполагали наличие нескольких «одушевляющих» начал, часть из которых продолжает существовать и после смерти тела. Долгое время люди считали, что эти начала обеспечивают «грубой материи тела» память, мышление и целенаправленные действия. *Гомеостаз* — одна из целенаправленных реакций, если считать поддержание механизма жизнедеятельности целью, тогда как внешние и внутренние силы этому противодействуют. Разные способы поддержания жизни у разных живых существ — это разные механизмы гомеостаза. Эволюция этих механизмов, направленная на большую независимость жизни от внешних условий, — это развитие организмов. Но объяснения особенностей живого через поиск цели остались достоянием истории науки, они равноценны объяснению: «Луна светит, чтобы освещать мне путь» или «Растения и животные существуют для того, чтобы обеспечивать нас пищей».

2. Представители редукционного подхода считают возможным использовать законы физики и химии для объяснения процессов жизнедеятельности. Было проверено многократно, что эти законы не нарушаются в биологических системах, но это не означает, что все свойства живого могут быть ими описаны. Они, наоборот, отрицают целенаправленность строения и поведения.

И гомеостаз — основу жизни — они объясняют на основе законов неживой природы. Так, терморегуляция теплокровных осуществляется по принципу обратной связи (выделение пота при по-

421

вышении температуры). Аналогом такого поведения считают управляемое радаром зенитное орудие. Согласно Н.Винеру, определенный тип целенаправленной деятельности обеспечивается контролируемым использованием и переработкой информации, поэтому не так важны детали этих перерабатывающих устройств. Сходство между человеком и машиной в этом отношении было отражено и в названии книги Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» (1949), существенно изменившей мировоззрение.

Сторонники этого подхода изучают клеточное строение и функционирование организмов. Бактерии и синезеленые водоросли относят к *протокариотам* (от греч. *protos* — **первый**), так как их клетки не имеют оформленного ядра, а ДНК находится прямо в цитоплазме и не окружена мембраной. Зеленые растения, грибы, слизевки и животные относятся к группе *эукариот* (от греч. *eu...* — **хорошо, полностью**) и **имеют ядро**, т.е. их генетический материал окружен двойной мембраной и образует определенную клеточную структуру. Первые эукариоты, по-видимому, произошли от протокариот около 3 млрд лет назад, или в конце докембрийского периода.

Диаметр клетки *бактерий* около 10^{-6} м, поэтому их часто называют микробами. Они освоили самые разные среды обитания и широкий диапазон температур. Численность бактерий даже в очень небольшом объеме вещества очень высокая, например, в 1 г парного молока их более 3000 млн. Бактерии, как и грибы, разрушают органическое вещество и участвуют в круговороте веществ, играя особую роль в биосфере. Они важны для плодородия почв и в очистных сооружениях, участвуют в процессе пищеварения, применяются в производстве антибиотиков, используются с различными целями в биотехнологии и генной инженерии. ДНК бактерий представлена одиночными кольцевыми молекулами длиной около 10^{-3} м, каждая из молекул состоит примерно из 5 млн пар нуклеотидов, или нескольких тысяч генов (в 500 раз меньше, чем у человека).

3. Живая клетка — это элементарная организованная часть живой материи и сложная высокоупорядоченная система. Опытным путем установлено, что в ней непрерывно совершаются синтез крупных молекул из мелких и простых — *анаболические* (от греч. *anabole* — **подъем**) реакции, на которые затрачивается энергия, и их распад — *катаболические* (от греч. *katabole* — **сбрасывание вниз**) реакции.

Совокупность этих реакций в клетке и есть процесс *метаболизма*. Для его поддержания необходим непрерывный приток энергии, и для живого более важна химическая форма энергии. Биологи часто выделяют основные наблюдаемые свойства, отличающие живое от неживого и отражающие специфику биологической формы движения материи.

422

Самовоспроизведение (репродукция) может производиться многократно, а генетическая информация о нем закодирована в молекулах ДНК. На молекулярном уровне самовоспроизведение происходит на основе матричного синтеза ДНК, программирующей синтез белков, которые определяют специфику организма, на других уровнях — огромным разнообразием форм и механизмов, вплоть до образования клеток. Именно разнообразие поддерживает существование видов, определяет специфику жизни.

Иерархичность организации отражает возможности системного подхода к пониманию строения и жизнедеятельности. Клетки как единицы организации специфически организованы в ткани, ткани — в органы, органы — в системы органов. Организмы сорганизованы в популяции, популяции — в биоценозы, а биоценозы — в биогеоценозы, являющиеся элементарными единицами биосферы.

На молекулярном уровне **упорядоченность структуры** приводит к образованию молекулярных и надмолекулярных структур, отличающихся упорядоченностью в пространстве и во времени. В отличие от объектов неживой природы упорядоченность живого происходит за счет внешней среды, в которой уровень упорядоченности снижается. И процессы, ведущие к упорядоченности живого, идут с локальным уменьшением энтропии. Живые системы в развитии способны к самоорганизации, упорядочиванию структур, росту разнообразия.

Регуляция процессов осуществляется в химических реакциях при помощи механизма обратной связи. В регуляции активности клеток принимают участие гормоны, обеспечивающие химическую регуляцию. Внутри клеток реакции синтеза и распада идут с участием ферментов, синтезируемых внутри самих клеток.

Рост организмов происходит путем увеличения их массы за счет размеров и числа клеток. Развитие представлено индивидуальным (*онтогенезом*) и историческим (*филогенезом*) развитием, и одинаково важны *наследственность* и *изменчивость*. Развитие, сопутствующее росту, проявляется в усложнении структуры и функций. В онтогенезе формируются признаки в процессе взаимодействия генотипа и среды. В филогенезе появляется большое разнообразие организмов и целесообразность. Эти процессы регулируются и подвержены генетическому контролю. В отличие от объектов неживой природы — кристаллов, которые растут, присоединяя новое вещество к поверхности, живые организмы растут за счет питания изнутри, причем живая протоплазма образуется при ассимиляции питательных веществ. Выживание вида или его бессмертие обеспечивается сохранением признаков родителей у потомства, возникшего путем размножения. Передаваемая следующему поколению информация закодирована в молекулах ДНК и РНК.

423

Гомеостаз (от греч. *homoios* — подобный, одинаковый + *stasis* — **неподвижность**, состояние) заключается в том, что живые организмы, обитающие в непрерывно меняющихся внешних условиях, поддерживают постоянство своего химического состава и интенсивность течения всех физиологических процессов с помощью *авторегуляционных механизмов*, при этом сохраняется необходимая ритмичность в периодических изменениях интенсивности.

Обмен веществ и энергии обеспечивает гомеостаз и является условием поддержания жизни организма. Первоначально из внешней среды получается энергия в форме солнечного света, затем химическая энергия преобразуется в клетках для синтеза ее структурных компонент, осмотической работы по обеспечению транспорта веществ через мембрану и механической работы по передвижению организма и сокращению мышц.

Питание является источником энергии и веществ, необходимых для жизнедеятельности. Растения усваивают солнечную энергию и самостоятельно создают питательные вещества в процессе фотосинтеза. У грибов, животных (и человека), некоторых растений и большинства бактерий — *гетеротрофное* (от греч. *heteros* — другой + *trophe* — **пища**) питание: они расщепляют с помощью ферментов органические вещества и усваивают продукты расщепления. Выделение — это выведение из организма конечных продуктов обмена с окружающей средой. Общее свойство открытых систем — обмен энергией и веществом с внешней средой — имеет свои особенности.

С помощью дыхания высвобождается энергия высокоэнергетических соединений, которая запасается в молекулах АТФ, обнаруженных во всех живых клетках. Дыхание относится к процессам *метаболизма* (от греч. *metabole* — **перемена, превращение**), или обмена веществ и энергии.

Раздражимость — избирательная реакция живых существ на изменения внешней и внутренней среды, обеспечивающая стабильность жизнедеятельности. Так, расширение кровеносных сосудов кожи млекопитающих при повышении температуры среды ведет к рассеиванию теплоты в окружающее пространство и восстановлению оптимальной температуры тела. Раздражителями могут быть пища, механические воздействия, свет, звук, температура окружающей среды, яды, электрический ток, радиоактивность... **Подвижность**, или **способность к движению**, свойственна и животным, и растениям, хотя скорости их существенно различаются. Многие одноклеточные могут двигаться с помощью особых

органов. У многоклеточных к движению способны как клетки, так и органы в них. В животных организмах движение осуществляется путем сокращения мышц.

Асимметрия — созидательный и структурообразующий принцип жизни. Неживые системы работают по законам симметрии —

424

рии. В классической физике имеют место законы сохранения (энергии, импульса, момента импульса, заряда и пр.), которые связаны со свойствами симметрии пространства и времени. В изолированных системах происходят обратимые процессы, т. е. имеет место симметрия между прошлым и будущим. Замкнутые системы самопроизвольно и необратимо стремятся к равновесию, процессы идут с ростом энтропии. Законы квантовой физики — проявление более глубоких симметрий. Все функционально важные биомолекулы асимметричны: белки состоят из левовращающих аминокислот, а нуклеиновые кислоты содержат правовращающие сахара, закручена и сама молекула ДНК — двойная спираль. Все процессы происходят с учетом киральности, установлена даже функциональная асимметрия мозга человека. Живое — это открытая система, использующая для сохранения упорядоченности внешний поток энергии и вещества. Жизнь связана с непрерывным нарушением симметрии в отличие от неживых систем.

Дискретность и целостность — два фундаментальных свойства организации жизни на Земле. Нуклеиновые кислоты и белки — целостные соединения, но в то же время дискретны, так как состоят из нуклеотидов и аминокислот. Репликация ДНК — целостный непрерывный процесс, но она дискретна во времени и пространстве, так как в ней участвуют различные ферменты и генетические структуры. Живые объекты в природе относительно обособлены (особи, популяции, виды). Любая особь состоит из клеток, а клетка и одноклеточные существа — из отдельных органелл. Органеллы состоят из дискретных, высокомолекулярных, органических веществ, которые, в свою очередь, состоят из дискретных атомов, а те — из элементарных частиц. Все эти части и структуры находятся в сложных взаимодействиях, и целостность живой системы отличается от целостности неживой тем, что она поддерживается в процессе развития. И среди живых систем нет двух одинаковых особей, популяций и видов. Жизнь на Земле проявляется в дискретных формах, причем все формы и части образуют структурно-функциональное единство.

В определении понятия «жизнь» к 80-м гг. XX в. сложилось две позиции. **Функциональный подход** объединял сторонников представлений об организме как о своеобразном «черном ящике» (с неизвестной внутренней структурой или с не особенно важной), своеобразии которого заключается в наличии «управляющих процессов» передачи информации. Лидеры этого подхода — математики А. А. Ляпунов и А. Н. Колмогоров — использовали средства высшей математики в определении специфики жизни, они рассматривали гомеостатические процессы. Их больше интересовали процессы преобразования информации, и они допускали возможность и небелковых форм жизни. Сторонники другого, **субстанционального**, подхода признавали ключевым наличие

425

определенных субстанций и определенных ее структур. К лидерам этого подхода относился и Опарин, для которого важнейшим было признание наличия обмена веществ, и выдающийся советский биолог В. А. Энгельгардт. Они считали, что изучение проблемы жизни должно основываться на данных химии, а не математики. В организации живого все указанные свойства проявляются на всех уровнях. Но каждый из них имеет и свои особенности.

11.3. Уровни организации живой природы на Земле

Проявления жизни чрезвычайно разнообразны. Структурные уровни организации живой материи отражают критерий масштабности мира живой природы. Вслед за известным генетиком И. В. Тимофеевым-Ресовским выделим четыре уровня организации живой материи: молекулярно-генетический, онтогенетический, популяционно-видовой и биогеоценозный. При этом критериями должны быть элементарные структуры и явления, которые проявляются на данном уровне. Деление живой материи на уровни весьма условно, но отражает системный подход в изучении природы.

1. Молекулярный, или молекулярно-генетический, уровень — предмет молекулярной биологии и генетики. Рождение этих наук отражает интеграционные процессы в естествознании. В них изучаются механизмы передачи генной информации, проблемы генной инженерии и биотехнологий. Любая живая система проявляется на уровне взаимодействия молекул.

Основные структуры — коды наследственной информации — представлены молекулами ДНК. Они разделены по длине на элементы кода — триплеты азотистых оснований (гены). **Элементарные явления** — процессы передачи информации внутриклеточным управляющим системам и связанные с генами мутации. Основные управляющие системы используют **матричный принцип**, т. е. служат матрицами, рядом с которыми строятся соответствующие макромолекулы. Матрицей при синтезе белков в клетках служит заложенный в структуре нуклеиновых кислот определенный код. Знание этого уровня обеспечивает понимание процессов и на других уровнях.

Было показано, что живое вещество обладает способностью к саморегуляции, поддерживающей

жизнедеятельность и препятствующей неуправляемому распаду структур и веществ и рассеянию энергии, тогда как мертвое органическое вещество подвержено самопроизвольному распаду. В то же время организму присущи свойства, отличные от свойств составляющих его частей.

2. Онтогенетический уровень — следующий уровень организации жизни, на котором изучается организм как целост-

426

ная сложная саморегулирующая система, способная самостоятельно существовать. Внутри него выделяют организменный и органно-тканевый подуровни, отражающие признаки отдельных особей, их строение, физиологию, поведение, а также строение и функции органов и тканей живой материи. *Онтогенез* — процесс реализации наследственной информации, закодированной в зародышевой клетке. Проверяется согласованность ее с работой управляющих систем особи в пространстве и времени жизни на Земле. Этот термин ввел Э.Геккель (1866) для рассмотрения структурной и функциональной организации отдельных организмов.

Особь, индивид — элементарная неделимая единица жизни на Земле. Элементарной структурой является *клетка* — структурная и функциональная единица, а также единица размножения и развития всех организмов. Клеточный, субклеточный подуровни отражают процессы специализации клеток и внутриклеточных внедрений. Процессы в самой клетке происходят в специализированных органоидах. Живая клетка — это сложная высокоупорядоченная система. Установлено, что в клетке непрерывно совершается синтез крупных молекул из мелких и простых (анаболические реакции, на которые тратится энергия) и их распад (катаболические реакции). Совокупность их в клетке есть процесс метаболизма. Особи, изучаемые на этом уровне, не существуют абсолютно изолированно в природе, они объединены на более высоком уровне организации — на уровне популяции.

3. Популяционно-видовой — следующий уровень организации жизни на Земле — образуется, когда относящиеся к одному виду особи сходны по структуре, имеют одинаковый *кариотип* (от греч. *karyon* — **орех, ядро ореха**; здесь — **ядро клетки**) и единое происхождение, способны к скрещиванию и дают плодovitое потомство. *Популяция* — совокупность особей одного вида, занимающих одну территорию и обменивающихся генетическим материалом. Популяция — часть вида, т.е. все составляющие ее особи принадлежат к одному виду. Она более однородна по составу, поскольку между ее особями происходит непрерывный обмен генами. Популяция — элементарная единица в современной теории эволюции. Элементарное явление — *мутация*. На популяцию могут оказывать давление и вызывать ее изменение *мутационный процесс, популяционные волны, изоляция и естественный отбор*. При нарушении изоляции между различными популяциями происходит скрещивание или обмен генами. Этот уровень важен при определении численности популяций и эволюции живого.

Вид — генетически замкнутая система. Поскольку между видами не может быть скрещивания, то возникшая мутация не выйдет за пределы вида. Организмы, обитающие на изолированных островах, образуют *подвид*, иногда подвид образуют группы популяций.

427

Число видов на Земле пытались подсчитать многие ученые. Генетик Т.Добжанский насчитал (1953) 1 млн видов животных, 265,5 тыс. видов растений (по современным оценкам, видов животных — от 1,5 до 2 млн, видов растений — около 500 тыс.). Среди животных 75 % приходится на долю *членистоногих*, но не все виды еще открыты, *позвоночных* — менее 4%, из них 1/2 составляют виды рыб, а *млекопитающих* — еще на порядок меньше. Из 3500 видов млекопитающих 2500 составляют грызуны. В растительном мире около 150 тыс. видов *покрытосеменных* (цветковых) растений, развившихся из *голосеменных* (семенных папоротников или близких к ним растений). Часть папоротников вымерла. К голосеменным относятся и хвойные растения, которые вместе с покрытосеменными — деревьями, кустарниками, травами — образуют растительный покров Земли. *Водоросли* (14 тыс.) идут после *грибов* (70 тыс.) и *мхов* (15 тыс.). Такое распределение численности видов на Земле сформировалось путем длительной эволюции. Из соотношения сухопутных (93 %) и водных (7 %) видов можно заключить, что возможность видообразования на суше была выше, чем в воде, и выход на сушу, носивший выборочный характер, открыл перспективы прогрессивной эволюции. Попутно отметим, что на суше преобладают растения, в воде — животные.

Обратимся к соотношениям их общих масс видов живой природы, или *биомасс*. Мировой океан занимает около 70,8 % земной поверхности, но его биомасса — всего 0,13% суммарной массы живых организмов. Масса живого вещества сосредоточена в основном в сухопутных растениях. Организмов, не способных к синтезу, менее 1 %, хотя по числу видов они составляют 1/5 всех организмов. На 79 % видов животных приходится 1 % всей биомассы Земли. Отсюда: чем выше уровень видовой дифференциации, тем меньше соответствующая ему биомасса, и наоборот.

4. Биогеоценозный уровень — следующий уровень структуры живой материи. Популяции разных видов, населяющие участок земной поверхности или водоем с определенными природно-климатическими условиями (среда обитания, или *геоценоз*), и связанное с ними сообщество растений, животных и микроорганизмов образуют неразделимый взаимообусловленный (с динамичными обратными связями) комплекс — *биоценоз*. Это понятие ввел В.Н.Сукачев (1940). Рациональное использование природы невозможно без знания

структуры и функционирования биогеоценозов. Биогеоценоз автономен и саморегулируем, поэтому является элементарной единицей этого уровня и служит средой для входящих в него популяций.

Биомы — крупнейшие наземные сообщества, тесно связанные с определенными природными зонами и поясами. Растения и животные существуют в тесной зависимости от окружающей неживой природы и от других организмов, испытывают на себе их

428

воздействие и приспосабливаются к ним. В процессе исторического развития и естественного отбора на Земле под влиянием конкретных природных факторов сложились различные группы организмов — сообщества, взаимодействующие со своей средой обитания. Вместе с конкретными участками поверхности, занимаемыми биоценозами, и прилегающей атмосферой они называются **экосистемой**. По определению А.Тенсли, экосистема — взаимообусловленный комплекс живых и косных компонентов, связанных между собой обменом веществ и энергии. Изучением взаимоотношений совместно живущих организмов и их зависимости от внешней среды занимается отрасль биологии — **экология**. Этот термин предложил в 1866 г. немецкий биолог-эволюционист Э.Геккель, сторонник и пропагандист учения Дарвина.

Совокупность биогеоценозов составляет земную **биосферу**, они связаны круговоротом вещества и энергии. В этом круговороте жизнь выступает ведущим фактором. И биогеоценоз — открытая система, имеющая энергетические «входы» и «выходы», которые связывают соседние биогеоценозы.

Биосфера — самый высокий подуровень организации жизни на Земле (термин введен в 1875 г. Э.Зюссом). Эта область активной жизни охватывает нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы. Вернадский создал учение о биосфере как об активной оболочке Земли, в которой совокупная деятельность живых организмов, включая человека, является геохимическим фактором планетарного масштаба и значения. Он выделял в биосфере **живое, косное** (солнечная энергия, почва и т.д.) и **биокосное** (органическое) вещества. На уровне биосферы решается такая глобальная проблема, как изменение концентрации углекислого газа в атмосфере. Установлено, что она растет на 0,4 % в год, что создает опасность «парникового эффекта». Рациональное использование природы не мыслимо без знания структуры и функционирования биогеоценозов.

11.4. Молекулярно-генетический уровень организации живой материи. Строение и структура макромолекул белков

Молекулярный уровень в организации живой материи — самый глубинный. В XX в. экспериментальная биология вышла на этот уровень. На нем начинаются и осуществляются важнейшие процессы жизнедеятельности: дыхание, обмен веществ и энергии, кодирование и передача наследственной информации и др. На молекулярном уровне теперь исследуются и проблемы происхождения жизни, и эволюция, и механизмы преобразования энергии. На этом уровне происходят химические реакции, обеспечивающие энергией клеточный уровень.

429

Знание закономерностей молекулярно-генетического уровня живой материи — необходимая предпосылка понимания всех жизненных процессов. Молекулярный уровень представлен молекулами **белков, углеводов, липидов, нуклеиновых кислот и стероидов**. Хотя в состав живого входят 24 химических элемента, основными являются кислород (65%), углерод (18%), водород (10%) и азот (3 %). Из этих четырех элементов в основном образуются молекулы, формирующие сложные органические соединения с разным строением и функциями. На долю остальных элементов приходится 3 — 4 %, но они также важны для жизни. Так, хотя йода в организме всего 0,01 %, при его недостатке нарушается деятельность щитовидной железы, развиваются болезни, ограничивающие рост и развитие организма. Кроме того, в состав живого входят простые неорганические соединения — вода (в теле человека занимает 60 %), соли, образованные катионами калия, натрия, магния и других металлов, а также анионами угольной, соляной, фосфорной и серной кислот.

При диссоциации их в воде появляются соответствующие катионы и анионы, обеспечивающие многие важные процессы. Биомолекулы синтезируются из таких простых молекул, как вода, окись углерода и атмосферный азот. Уникальные свойства молекул углерода и воды представлены в гл. 7 — 8. В процентном отношении к сырой массе вода занимает 75 — 85 %, белки — 10 — 20 %, липиды — 1 — 5 %, углеводы — 0,2 — 2 %, нуклеиновые кислоты — 1 — 2 %. Такой состав живого не случаен — жизнь зародилась в океанах, и потому живые организмы построены из элементов, образующих растворимые в воде соединения.

В процессе метаболизма эти молекулы через промежуточные соединения превращаются в строительные блоки — большие **макромолекулы**. Большинство таких соединений в живых клетках представлены нуклеиновыми кислотами и белками, их макромолекулы — полимерами (соединения мономеров в строго определенном порядке). Мономеры имеют в одном соединении одинаковые группировки, которые соединены химическими связями.

Нуклеотиды, сахара и аминокислоты — одни из самых маленьких биомолекул. Белки существенно больше и разнообразнее. С помощью специальных приборов и методов их умеют различать, отделять друг от друга, концентрировать и изучать по отдельности. Диаметр молекулы гемоглобина человека, например, составляет 6,5 нм. Все макромолекулы универсальны, так как построены по одному плану, и уникальны, так как

неповторима их структура. Например, в состав белков входят аминокислоты, расположенные в определенном порядке, что делает их уникальными и обеспечивает их специфические биологические свойства. Белки — структурные элементы живых клеток, регулирующие процессы метаболизма и играющие роль катализаторов во многих

430

важных процессах жизнедеятельности. Углеводы и липиды являются источниками энергии, а стероидные гормоны регулируют некоторые процессы обмена веществ.

Белки — основа жизни животных и растительных клеток. Они выполняют различные функции. В обмене веществ участвуют белки, называемые *ферментами*, которые могут ускорять реакции в сотни тысяч раз; известно более 1000 ферментов, и каждый из них действует сугубо избирательно — только на определенную реакцию, не затрагивая иные. Белки выполняют строительную функцию, когда входят в состав мембран и органоидов клетки. Белки, попадающие с пищей в организм, расщепляются в процессе пищеварения до аминокислот, в том числе и незаменимых, а потом при попадании в клетки вновь строятся в структуры. Движение организма обеспечивают в мышечных волокнах белки *миозин* и *актин*, транспортную — *гемоглобин* (доставляет кислород). Многие *гормоны* — тоже белки (гормон поджелудочной железы — *инсулин* — активизирует захват молекул глюкозы и по необходимости либо запасает их внутри клетки, либо расщепляет их). Гормоны управляют деятельностью ферментов. Есть и резервные белки, предназначенные для питания плода или для выработки защитных белков — антител. Они распознают чужеродный белок возбудителя заболеваний, связываются с ним и подавляют его активность. Белки выполняют защитную функцию, обеспечивая свертывание крови, входят в состав иммунной системы. Они служат и источниками энергии: при распаде 1 г белка выделяется 17,6 кДж. При недостатке жиров или углеводов аминокислоты могут окислиться с выделением энергии. Огромное разнообразие живого определяется различиями в составе белков.

Белки — это сложнейшие органические соединения, состоящие из мономеров — аминокислот. В клетках и тканях — свыше 170 аминокислот, но в состав белков входят только 20 из них. Из элементов помимо углерода, кислорода, водорода и азота в некоторых белках содержится еще и сера. Белки — большие молекулы, нерегулярные полимеры, в которых аминокислоты «нанизаны, как бусинки, на нить» (их может быть до 1000). Все макромолекулы — цепи более мелких единиц, причем описать последовательность аминокислот, каждая из которых имеет свое название и обозначается одной из 20 букв алфавита, это значит и описать белок. Разные белки образуются при соединении аминокислот в разной последовательности, составить которую из 1000 по 20 можно огромным числом способов. И каждое такое распределение — определенный белок. Растения могут синтезировать все аминокислоты из более простых веществ, а животные — только часть. Оставшиеся аминокислоты, называемые «незаменимыми», организм животного должен получать с пищей.

431

У каждой аминокислоты есть *карбоксильная группа* ($-\text{COOH}$) и *аминогруппа* ($-\text{NH}_2$), присоединенные к одному атому углерода. К нему присоединена и одна из многих возможных белковых групп, которыми и отличаются все 20 аминокислот. Обычно это бесцветные кристаллические вещества, растворимые в воде, но не растворимые в органических растворителях. В нейтральных водных растворах они ведут себя как амфотерные соединения (проявляют свойства и кислот, и оснований) и существуют в виде биполярных ионов. Потому аминокислоты препятствуют в растворах изменению кислотности: при увеличении pH они — доноры положительных ионов водорода, при понижении — акцепторы. Каждая аминокислота характеризуется своим значением pH, при которой она электрически нейтральна (в Е-поле не перемещается ни к аноду, ни к катоду). Момеры принято обозначать какой-либо буквой латинского алфавита, поэтому полимер представляется длинным сочетанием букв.

Биополимерами являются не только белки, но и полисахариды, и нуклеиновые кислоты. Строение молекул (число и разнообразие различных звеньев, их порядок расположения) во многом определяет их свойства. При этом часто бывает, что какая-то группа мономеров периодически повторяется, такой полимер называют регулярным. Но есть и нерегулярные полимеры.

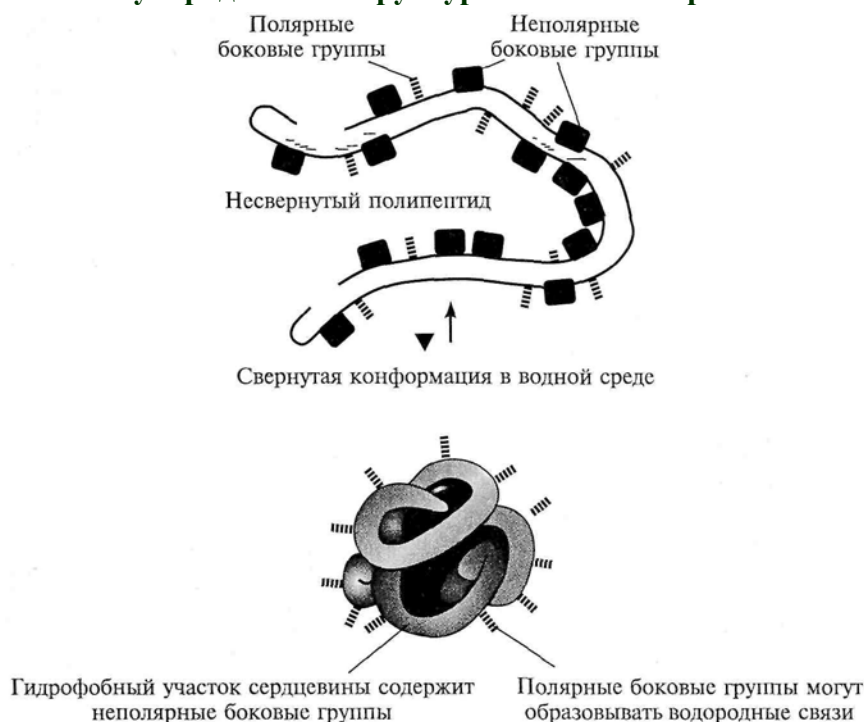
Полипептид — длинная цепь, содержащая от 100 до 300 аминокислот, связанных пептидной связью. Молекулы гемоглобина, например, состоят из четырех полипептидных цепей, включающих по 145 аминокислот каждая. Для правильного функционирования такие цепи должны быть скручены и определенным образом ориентированы в пространстве. Полимерную цепь в растворе заставляет самопроизвольно скручиваться второе начало термодинамики. Белки функционируют в водном растворе, их скрученность противодействовала бы их точности и специфичности действия, поэтому они все время флуктуируют, и в них происходят повороты вокруг разных связей. Но эта внутренняя свобода является ограниченной и структура белков строго упорядочена.

Возможные структуры белковых цепей изучили с помощью рентгеноструктурного анализа. Полинг и Корн установили, что имеется несколько устойчивых конфигураций, и прежде всего форма α -спирали. В водном растворе группы NH- и CO- пептидных связей соединяются между собой, причем первое звено цепи соединено водородной связью с пятым, а второе — с шестым и т.д., поэтому и α -спираль устойчива в водном растворе.

Между положительно и отрицательно заряженными боковыми группами аминокислот устанавливается *ионная связь*, между атомами, несущими частично положительные и частично отрицательные заряды, — *водородная связь*, между атомами серы и двумя молекулами аминокислоты цистеина — *ковалентная связь*. Неполярные боко-

432

Рис. 11.1. Схема упорядочения структуры белка — свертывание в глобулу



вые цепи стремятся объединиться друг с другом и не раствориться в воде, образуя *гидрофобное объединение*. Таким образом, при расправлении этой определенной цепи она вновь скрутится единственным, присущим только ей образом. Если заменить хотя бы один атом или одну аминокислоту в полипептиде, получится молекула с другой структурой и другими свойствами.

Образование структуры — это уменьшение энтропии, тогда как вне белковой структуры энтропия должна скомпенсировать это локальное уменьшение и возрасти. При образовании водородной связи выделяемая энергия рассеивается. Водородная связь возникает между пептидными связями цепи: $\text{—N—H}\cdots\text{O—C—}$, и она определяет *вторичную структуру белка*. Так, в молекуле гемоглобина четыре цепи, каждая из которых обвивается вокруг атома железа. Точное повторение ее формы в миллиардах молекул указывает упорядоченность. Кроме α -спирали, были установлены и другие устойчивые конфигурации (например, β -форма белка), их относят ко вторичной структуре белка. Не вся спираль закручивается, некоторые ее части не влезают, например пролин, и тогда структура прерывается неупорядоченными участками.

433

При выполнении определенных функций спираль изгибается, сворачивается и образует *глобулу* (третичную структуру) (рис. 11.1). При этом основную роль играет кулоновское взаимодействие между электрическими зарядами частей цепи, а также установление водородной связи между пептидными группами разных частей спирали. Спираль изгибается, часть энергии выделяется в окружающее пространство, и маловероятно, чтобы эта энергия вновь вернулась. Пример тому — денатурация белка при варке яйца, когда разрушаются все возникшие структуры. При образовании глобулы важную роль играет гидрофобное взаимодействие частей цепей. Аминокислотные остатки содержат массивные углеводородные части, которые ведут себя подобно каплям масла в воде. Образуются окружающие молекулы «ловушки», создается структура, и энтропия локально уменьшается. Естественное направление процессов оказывается таким, что маслоподобные части молекул оказываются скрытыми от воды в глубинах структур белка, а водоподобные обращаются к воде, растворителю. Так возникает подстройка специфической формы молекулы.

Изучают глобулы методами рентгеноструктурного анализа. Эти работы начал Дж. Бернал, разработавший классификацию структур белков. Если четыре белковые нити — глобулы (каждая с характерной третичной структурой) объединяются вместе, энтропия мира несколько возрастает из-за выделившейся энергии и из-за того, что гидрофобные части укрывают друг друга в глубине молекулы. Они слипаются, как капельки масла, и молекулам воды не приходится расставлять много «ловушек». За счет этого возникает и *четвертичная структура*. Так стремление мира к беспорядку, хаосу прижимает белковые нити друг к другу.

Итак, последние три типа структур обусловлены ростом энтропии во Вселенной и локальным уменьшением энтропии. Может быть, этим же обусловлен и первичный порядок расположения аминокислот,

но при создании первичной структуры важно и образование цепи при копировании ее в результате сложных химических реакций. Они регулируются специальными белками, ферментами, а весь процесс в целом называется *биосинтезом белка*.

Простейшая животная клетка содержит всего 5000 различных видов белков. Одни похожи на волокна и служат материалом для клеточных стенок, перегородок и мембран; другие настолько гибки, что скручиваются в клубки, очень активны и способны перемещаться, из них состоит почти все студнеобразное пространство клеток. Это — *активные глобулярные белки*, которые могут участвовать в химических реакциях, обеспечивающих рост.

Оптическая активность живого была открыта Л.Пастером. Все аминокислоты, входящие в белки, оказались *вращающими влево* плоскость поляризации, тогда как молекулы неорганических веществ построены симметрично, а в нуклеиновых

434

кислотах — только *правовращающие* сахара. Пастер связал это с молекулярной **хиральностью** (от греч. *cheir* — рука), или асимметрией правого и левого: поскольку живое возникло из неживого, то симметричное должно потерять симметрию, что могло случиться под влиянием каких-либо космических факторов. Но эта гипотеза пока не подтверждена. Выходит, предбиологическая среда потеряла первичную симметрию. Опыты последних лет показали, что только в хирально чистых растворах могут возникнуть биологически значимое удлинение цепочки полинуклеотидов и процесс саморепликации. Живые системы организованы так, что тРНК из правых Сахаров присоединяют к себе только левые аминокислоты. Все живые системы поддерживают хиральную чистоту.

11.5. Установление строения и структуры молекул ДНК и РНК

Важнейшие полимеры — молекулы ДНК и РНК — состоят из мономеров, называемых *нуклеотидами*. Как белки состоят из последовательно соединенных аминокислот, так и нуклеиновые кислоты — из последовательно связанных между собой нуклеотидов.

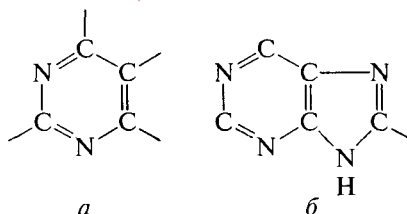
Эти полинуклеотиды впервые выделил швейцарский врач Ф.Мишер (1868); он назвал это вещество *нуклеином*, затем немецкий химик Р.Альтман предложил название — *нуклеиновая кислота*, так как это вещество проявляет кислотные свойства, обнаруживаемые преимущественно в клеточном ядре. Мишер не знал, какое важное открытие он сделал, но писал об этом так: «Обрабатывая клетки гноя слабыми щелочными растворами, я получил в результате нейтрализации раствора осадок, который не растворялся ни в воде, ни в уксусной кислоте, ни в разведенной соляной кислоте, ни в обычном солевом растворе и который не мог принадлежать ни к одному из белков, известных в настоящее время».

Сотрудник Мишера А. Коссель обнаружил, что в состав нуклеиновых кислот входят пуриновые (А, Г) и пиримидиновые основания (Ц, Т) и простейшие углеводы; он выделил аденин (А) и гуанин (Г), фосфорную кислоту и углеводы. Если в построении белка участвует 20 аминокислот, то нуклеотидов — всего 4 (хотя сами они — достаточно сложные образования). К началу 1900 г. в лаборатории П.Левина (США) расшифровали углеводную часть кислот. У всех живых существ молекулы ДНК и РНК построены по одному плану, каждый нуклеотид состоит из трех компонентов, соединенных химическими связями: из одной молекулы фосфорной кислоты, одной молекулы сахара и одной молекулы органического основания. Их фосфатные группы освобождают в растворах ионы водорода. Сахар может быть в двух вариантах: рибоза (Р), представляющая сахар с пятью атомами углерода, к одному

435

Рис. 11.2. Структурные формулы пуринов и пиримидинов:

a — шестичленное кольцо; *б* — пятичленное кольцо



из которых присоединена гидроксильная группа (—OH), и дезоксирибоза (Д), в молекуле которой в отличие от глюкозы не 6, а 5 атомов углерода (пентоза) и к одному из атомов углерода присоединен атом водорода. При этом они никогда не встречаются одновременно, поэтому этим сахарам соответствуют два типа нуклеиновых кислот — ДНК и РНК. Сначала думали, что они тоже разобщены в клетках: ДНК — в ядре, а РНК — вне его. Теперь ясно, что ДНК находится в основном в ядре (хромосомах), а частично — в других клеточных компонентах (например, хлоропластах зеленых растений). РНК содержится как в цитоплазме, так и в ядрышке. Кроме того, иногда временно цепь ДНК соединяется с цепью РНК.

Основания — другой компонент нуклеотида — названы так, потому что реагируют как основания: в кислой среде способны присоединять ион водорода. Они тоже могут относиться к двум группам:

пиримидинов, в основе строения которых — шестичленное кольцо (рис. 11.2, *а*), и пиринов, у которых к пиримидиновому присоединено пятичленное кольцо (рис. 11.2, *б*). В ДНК входят два пурина (А, Г) и два пиримидина (Ц, Т), а в РНК — только три: А, Г и Ц, а вместо тимина — другой пиримидин — урацил (У), т.е. в составе каждой из нуклеиновых кислот находится по 4 основания. В ДНК последовательно соединены дезоксирибонуклеотиды, каждый из которых содержит какое-то из четырех оснований (А, Ц, Г, Т), а РНК — рибонуклеотиды, содержащие тоже по одному основанию (А, Ц, Г, У). Все молекулы имеют форму цепи (от 77 до нескольких миллионов нуклеотидов).

У.Астбери, автор термина «молекулярная биология», вместе с Ф. Беллом получил рентгенограммы ДНК (1938). Они показали, что азотистые основания располагаются одно за другим, построенные как пластинки. В 1948 г. английский химик-органик А.Тодд, подробно изучая структуру ДНК, выяснил, как связываются между собой четыре азотистых основания с пятиатомным кольцом сахара рибозы или дезоксирибозы и молекулой фосфорной кислоты. Нуклеотиды — не только составная часть нуклеиновых кислот, они входят в состав ферментов в качестве активных групп — *коферментов* (так Тодд назвал комплекс азотного основания, углевода и остатка фосфорной кислоты). Блоки А, Г, Т, Ц образуют длинную полимерную цепь, соединяясь друг с другом в разных комбинациях.

436

Американский биохимик Э.Чаргафф сформулировал (1948) правила регулярности в парных отношениях пуриновых и пиримидиновых оснований в молекулах нуклеиновых кислот: 1 — общее количество гуанина и аденина (из группы пуринов Г и А) равно количеству цитизина и тимина (из группы пиримидинов Ц и Т), т.е. $A + G = T + C$; 2 — отношения A/T и G/C примерно равны единице, т. е. $A = T$ и $G = C$; 3) — при этом $G + T = A + C$; 4 — ДНК из разных источников может иметь отличия — в одних случаях $A + T > G + C$, а в других — $G + C > A + T$. Эти правила явились предтечей открытия двойной спирали ДНК.

Для молекулы ДНК тоже характерна структура трех видов — первичная, вторичная и третичная. *Первичная структура* ДНК состоит из нуклеотидных цепей, у которых скелетную основу составляют чередующиеся сахарные и фосфатные группы, соединенные ковалентными связями, а боковые части представлены одним из четырех оснований и присоединяются одна к другой молекулой сахара. Нуклеотиды расположены друг за другом и связаны ковалентно с фосфатом и сахарным остатком, образуя полинуклеотидную цепь.

Вторичная структура была сформулирована Д.Уотсоном и Ф. Криком. Две идущие рядом нити, скрепленные одна с другой перемычками и свившиеся в двойную спираль, и есть молекула ДНК. Обе нити одинаковы по длине, остатки пар А—Т и Г—Ц разделены одинаковыми расстояниями. Двойная спираль имеет упорядоченный характер, так как каждая связь основание — сахар находится на одинаковом расстоянии от оси спирали и повернута на 36° , причем в каждой из них в зависимости от вида ДНК могут быть до миллионов блоков — нуклеотидов. Порядок их чередования определяет *наследственную информацию*, записанную в ДНК и передаваемую следующим поколениям. Первое предположение о роли нуклеиновых кислот в качестве генетического материала сформулировал доцент Петербургского университета А. Щепотьев (1914). Химики понимали, что ДНК собрана из нуклеотидов, имеющих фосфатную группу, связанную ковалентно с пятиуглеродным сахаром, который связан с одним из четырех азотистых оснований. Нуклеотиды соединены друг с другом так, чтобы фосфатная группа одного была связана с сахаром предыдущего, и из их чередующихся комбинаций образуется длинная цепочка — сахарофосфатный остов молекулы. По одну сторону под прямым углом к остову располагаются основания.

Молекула ДНК оказалась закручена в спираль: снаружи спирали — остов, а внутри — перпендикулярные ему основания. На один виток спирали приходилось примерно по десять нуклеотидов, а ее толщина указывала, что скручено более одной нити. Итак, вторичная структура отражает форму нуклеиновой кислоты. Степень скручивания ДНК зависит от ферментов.

437

Р.Франклин исследовала на фотопленке пятна от рентгеновского излучения, рассеянного кристаллами очищенной ДНК (1952). В обсуждении результатов принимал активное участие и физик М.Уилкинс, работавший в той же лаборатории. Полученные рентгенограммы стимулировали многих ученых к поиску модели структуры ДНК. История открытия структуры ДНК описана американским биохимиком Дж. Уотсоном в его книге «Двойная спираль» (1968). В 1951 г. Уотсон встретился в Копенгагене с Уилкинсом и ознакомился с рентгенограммами ДНК. Руководитель Уилкинса Сальвадор-Лурия договорился о стажировке Уотсона в Кавендишской лаборатории, где работала группа ученых, занимавшихся рентгеноструктурным анализом сложных биомолекул и сравнивавших свои модели с опытными данными, полученными на первых, весьма несовершенных ЭВМ. В Кембридже Уотсон познакомился с Криком, физиком, переквалифицировавшимся в биохимику, и узнал, что структурные формулы химиков были далеки от совершенства.

Уотсон и Крик, разобравшись в структуре пуринов (А, Г) и пиримидинов (Т, Ц), решили, что они должны быть связаны между собой. Для объяснения правила Чаргаффа ДНК должна состоять из двух цепей, которые должны закручиваться так, чтобы сохранялись определенные углы между разными группами атомов. И возникла *двойная спираль*, в которой пурины и пиримидины выстроены по типу ступенек лестницы:

«перекладины» — основания, «веревки» — сахарофосфатные остовы.

Каждая перекладина образована из двух оснований: А и Т или Г и Ц, что и объясняет правило Чаргаффа. Так как в каждой паре есть одно основание с одним кольцом и одно — с двумя, величина перекладин одинаковая, и остовы цепей находятся на одном расстоянии. Основания присоединены к двум противоположным цепям, удерживаемым водородными связями между основаниями. Поскольку звеньями цепи являются пары Ц с Г и А с Т, удобнее использовать образ лестницы, составленной из ступенек-пар ЦГ, ГЦ, ТА и АТ, следующих в определенном порядке. Из-за закрученности в спираль молекула похожа на винтовую лестницу со ступеньками из пар нуклеотидов.

В живых клетках цепи очень длинные, содержат до 10^8 пар в ряд и свиты в плотный клубок. У человека длина такой винтовой лестницы в размотанном состоянии достигает нескольких метров, и это одна молекула! Отсюда — огромность числа возможных вариантов расположения молекул в ДНК. И это разнообразие связано с разнообразием жизни, а расположение четырех типов пар в молекуле ДНК задает всю программу, говорит клетке, как ей развиваться и что делать.

Диаметр двойной спирали $2 \cdot 10^{-9}$ м (2 нм), расстояние между соседними парами оснований спирали $0,34 \cdot 10^{-9}$ м (0,34 нм), полный оборот спирали завершается через 10 пар, а длина зависит от организма, которому принадлежит эта молекула ДНК. Длина плодовой мушки (дрозофилы) $4 \cdot 10^{-3}$ м, а самой длинной ее хромосомы — в 10 раз больше. У простейших вирусов ДНК содержит несколько тысяч звеньев, у бактерий — несколько миллионов, а у высших — миллиарды. Если выстроить в одну линию молекулы

438

ДНК, заключенные в одной клетке человека, то получится длина в 2 м, т. е. длина в миллиард раз больше толщины. Но она уместается в клеточном ядре, значит, ее «укладка» такова, чтобы по всей длине она была доступна для белков, которым нужно «читать» гены. Основания, соединенные слабой водородной связью, взаимно дополняют друг друга, и каждая цепь автоматически поставляет информацию для нахождения партнера. В эукариотических клетках основные части ДНК и белков сплетены так, что напоминают нить бус. Каждая такая «бусинка» окружена четырьмя ядерными блоками и содержит около 200 сдвоенных оснований, а «нить» состоит из ДНК и ядерного белка (гистона), отличного от того, что входил в состав «бусинок».

О расшифровке структуры ДНК сообщалось в статье Уотсона и Крика, занявшей всего две странички в журнале, но открывшей новую эпоху в раскрытии тайны жизни. В публикации (1953) Крик и Уотсон отметили, что такая структура хорошо объясняет и процесс «воспроизводства» этой молекулы. При рассоединении цепей возможно присоединение новых нуклеотидов к каждой из них, тогда около каждой старой возникнет новая цепь, точно ей соответствующая. Так впервые пришли к структуре, способной к самовоспроизведению. Число два удовлетворило биологов, поскольку и клетки, и хромосомы воспроизводятся путем деления исходной на две.

Третьичная структура ДНК, определяемая трехмерной пространственной конфигурацией молекул, пока изучена недостаточно.

Исследования показали, что ДНК может существовать в двух формах: А (при низкой влажности) и В (при высокой). Для обеих форм построили молекулярные модели. Из дифракционных картин волокон ДНК информацию получить было достаточно трудно, так как у цепи ДНК вдоль оси расположены волокна беспорядочно, но была подтверждена ее спиральная структура. К настоящему времени исследователи научились синтезировать в необходимом количестве и получать в достаточно чистом виде короткие участки ДНК заданной последовательности, что позволяет закристиллизовать фрагменты молекулы длиной от 4 до 24 пар оснований и исследовать эти кристаллы с помощью рентгеноструктурного анализа. Исследования дали действительную похожесть обеих форм на гибкую лестницу, закрученную спирально вокруг центральной оси.

11.6. Молекулярные механизмы генетической репродукции, синтеза белка и изменчивости

Предпосылкой учения о **наследственности и изменчивости** явилось в некоторой степени создание *клеточной теории*. Идея единства живой природы нашла выражение в морфо-

439

логическом строении, в нахождении универсальной единицы структурной организации живой материи. И стали считать, что процесс образования клеток тоже должен регулироваться единым механизмом, скрывающим тайну наследственности и изменчивости.

Дискретный характер наследственности установил О.Сажрэ. Исследуя отдельные признаки скрещивающихся при гибридизации растений (тыквы), он отметил, что признаки распределяются между потомками неравно. Чешский ученый Г. Мендель стал исследовать наследственные свойства у растений при гибридизации, выделяя отдельные признаки. Некоторые свойства переходили непосредственно, а другие были рецессивными, появляясь через поколение. Так он пришел в 1865 г. к открытию двух законов — **доминирования и расщепления признаков**, а затем и **третьего — закона независимого комбинирования**. При формулировке своих законов Мендель применил вариационно-статистический метод: он дал количественные определения явления наследственности и обобщил материал в количественном отношении.

Эта смесь ботаники с математикой противоречила понятиям того времени. Его законы опередили время почти на 40 лет. Каждому из наследуемых признаков он сопоставил материальную частичку живого, передаваемую из поколения в поколение, — ген.

Сначала Мендель скрещивал организмы, отличающиеся только одним признаком (моногибридное скрещивание) — горошины желтого и зеленого цветов. В первом поколении получил только желтые горошины, т.е. желтый цвет доминировал. Когда он скрестил два гетерозиготных растения первого поколения, то во втором поколении получил уже и зеленые горошины в соотношении 3:1. Затем он установил, что эти законы относятся и к другим признакам (к форме семян, к цвету цветков и др.).

Законы Менделя были «переоткрыты» в 1900 г., когда Г. де Фриз в Голландии, К. Корренс в Германии и Э. Чермак в Австрии проводили независимые исследования по делению клеток. Они оставили приоритет за Менделем. Тогда же было установлено, что хромосомы находятся внутри клеточного ядра. Основой новой науки — генетики — стал ген, элементарная единица наследственности. Общее количество генов в больших организмах огромно — несколько миллиардов, они входят в состав всех клеток организма. Биохимическую основу гена составляют нуклеиновые кислоты, в составе которых основную роль играют азот и фосфор.

Генетика изучает наследственность и изменчивость организмов; признаки и свойства, передающиеся по наследству, фиксируются в генах — участках хромосомы (или молекулы ДНК). После работ одного из ее основоположников В. Иогансена сложилась терминология генетики.

440

Ген — участок хромосомы (или молекулы ДНК), определяющий возможность развития отдельного элементарного признака или синтез одной белковой молекулы. Гены, расположенные в одних и тех же местах хромосом и отвечающие за развитие одного признака, называли **аллельными**. Поэтому доминирование — явление, при котором доминантный ген полностью подавляет проявление другого гена аллели, называемого **рецессивным**. Но бывает и неполное доминирование. Расщепление — это появление в потомстве нескольких групп фенотипов и генотипов. Если расщепления при скрещивании не наблюдается, то это чистая линия. Если два аллельных гена не оказывают влияния друг на друга, проявляясь в гетерозиготных организмах в полной мере, это — кодоминирование.

Генофонд — совокупность всех вариантов каждой из аллелей, характерная для популяции или вида в целом. **Геном** — совокупность всех генов организма. **Генотип** — это совокупность всех взаимодействующих генов организма. **Фенотип** — совокупность всех признаков организма.

Хромосома — самостоятельная структура, которая имеет плечи и центромеру и включающая две хроматиды. В хромосоме расположены в линейном порядке гены. Это — структурная единица ядра клетки, содержащая ДНК, в которой заключена вся наследственная информация организма. Процесс самоудвоения и распределение хромосомы по дочерним клеткам при клеточном делении обеспечивает передачу наследственных признаков организма следующему поколению. Совокупность хромосом в каждой клетке организма создает хромосомный набор. Такой набор постоянен и характерен для данного организма. В половых клетках каждая хромосома встречается один раз, а в большинстве соматических клеток большинства видов имеется двойной набор хромосом.

Переход от белковой к нуклеиновой трактовке природы гена произошел в конце 40-х гг. Но еще в 1928 г. Н. Н. Кольцов предположил, что при размножении клеток происходит матричная ауторепродукция материнских молекул. В 1936 г. А.Н.Белозерский получил из растения тимонуклеиновую кислоту, выделяемую ранее только в животных организмах. Так было доказано на молекулярном уровне единство растительного и животного миров.

Гены — элементарные единицы на молекулярно-генетическом уровне организации. Еще до открытия многих молекулярных составляющих биологи поняли, изучая передачу наследственных признаков при скрещивании, что каждый признак определен отдельной частичкой — геном. Потом установили, что гены находятся в клеточном ядре, в хромосомах. В цепях РНК и ДНК каждые три, следующие друг за другом основания составляют **триплет**. Основные структуры, содержащие коды наследственной информации, представлены молекулами ДНК, состоящими из це-

441

почки элементов кода — **триплетов азотистых оснований**, которые образуют гены. По модели Уотсона—Крика, в молекуле ДНК генетическую информацию несет последовательность расположения оснований: А, Т, Г, Ц. Но как могут 4 основания кодировать порядок расположения в молекулах белка 20 аминокислот? Г. Гамов предложил для кодирования одной аминокислоты использовать сочетания из трех нуклеотидов ДНК. Для триплетов, учитывая, что оснований всего 4, это число составит $4^3 = 64$.

Подсчет возможных сочетаний из четырех букв показывает, что сочетания по две буквы обеспечивают лишь 16 возможностей, а из трех — сразу 64. И только сочетания из трех букв обеспечат построение 20 аминокислот. Поэтому и наименьшая длина «слова», определяющего ту или иную аминокислоту, — это три нуклеотида. В 1961 г. эта гипотеза Гамова была подтверждена, и расшифровали механизм считывания генетической информации с молекулы ДНК при синтезе белков.

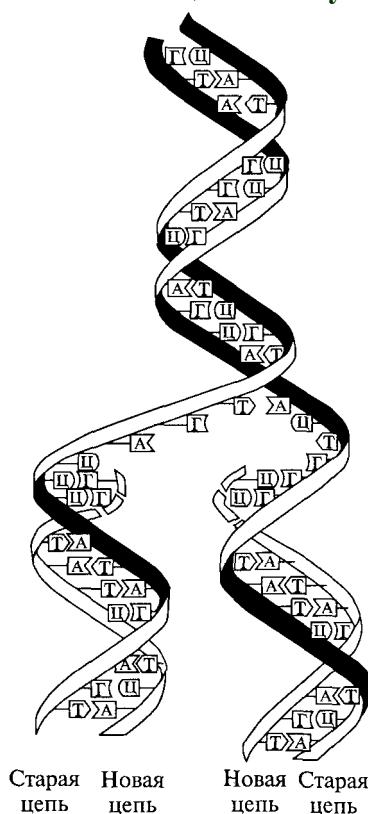
Каждый триплет управляет включением в белок определенной аминокислоты. Наивысшее число возможных триплетов (64) может достигаться лишь в том случае, когда последовательности нуклеотидов или

оснований считаются только в одном направлении (моноклеотиды отличаются только основаниями, так как сахар в нуклеиновой кислоте каждого типа и фосфорная кислота во всех нуклеиновых кислотах одинаковы). Поэтому последовательность нуклеотидов определена только последовательностью оснований. Поскольку названия оснований начинаются с разных букв, то используют только начальные буквы. В РНК содержатся А, Ц, Г, У, а в ДНК — А, Ц, Г, Т. Например, триплет ГАУ кодирует аспарагиновую кислоту; триплет ГЦУ — аминокислоту аланин; триплет ЦЦУ — пролин. Значит, последовательность ГАУ— ГЦУ — ЦЦУ соответствует «приказу» клетке строить белок по схеме: аспарагиновая кислота — аланин — пролин. И последовательность оснований включает информацию о последовательности аминокислот. Она — источник информации и в то же время «негатив», или искомая «матрица». Порядок чередования аминокислот определен последовательностью триплетов. Эта элементарная единица наследственного материала была названа *кодоном*.

Соответствие последовательностей кодонов и аминокислот носит коллинеарный характер. И синтез белков протекает в соответствии с информацией, заключенной в последовательности кодонов. Группа из трех стоящих подряд нуклеотидов, действуя через довольно сложный механизм, заставляет рибосому — внутриклеточную частицу, отвечающую за синтез белков, подхватывать из цитоплазмы определенную аминокислоту; следующие три нуклеотида через посредников «диктуют» рибосоме, какую именно аминокислоту поставить в цепочку белка на следующее место, и так получается молекула белка. Так что информации, записан-

442

Рис. 11.3. Репликация молекулы ДНК



ной в ДНК тройками пар нуклеотидов, достаточно для построения нового организма со всеми его особенностями.

Из 64 возможных триплетов для кодирования аминокислот достаточно только 20 (в белках 20 аминокислот). Значит, оставшиеся 44 являются «запасными», и каждая аминокислота закодирована несколькими кодонами.

Репликация молекулы ДНК происходит поэтапно: разрываются водородные связи между цепями, и они разделяются; разматываются полинуклеотидные цепи; синтез вдоль каждой из цепей новой цепи с комплементарной последовательностью азотистых оснований (рис. 11.3). Разделение и разматывание начинаются с одного конца молекулы, продолжаются в направлении к другому концу, сопровождаясь одновременным синтезом новых цепей. В результате каждая новая молекула ДНК состоит из одной старой цепи и одной новой, комплементарной старой. Этот способ был опробован, и механизм репликации молекулы доказан опытами М. Месельсона и Ф. Сталя (1958).

В основе комплементарности лежит свойство нуклеотидов спариваться при помощи своих оснований: А с Т, Ц с Г — в ДНК; А с У и Ц с Г — в РНК. И молекуле РНК, состоящей, к примеру, из 146 кодонов, будет соответствовать 146 определенных антикодонов. ДНК часто сравнивают с застёжкой «молния», как

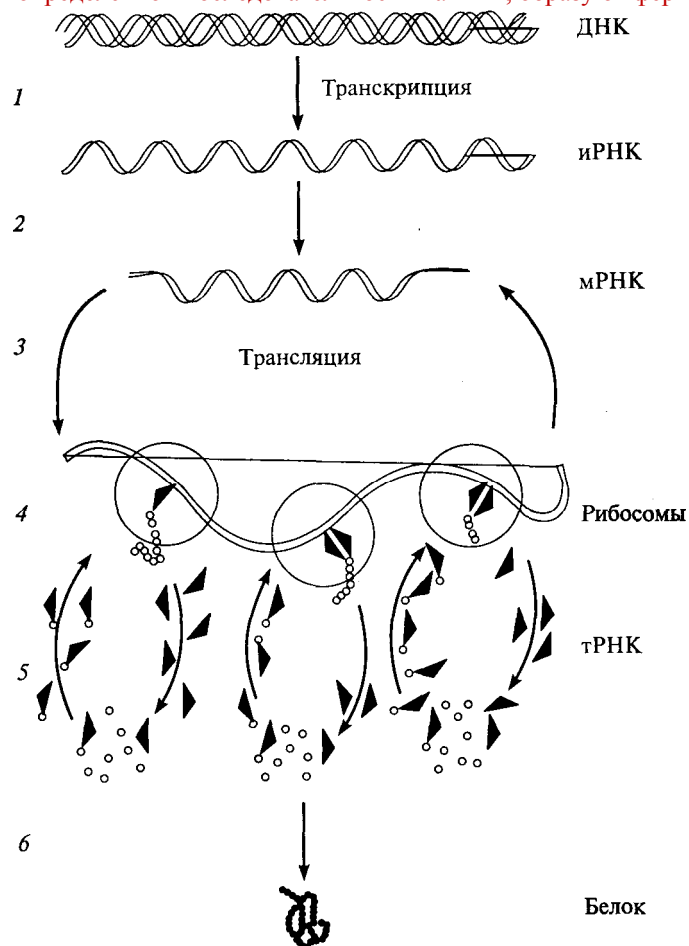
расстегивается молния, так и расходятся цепи ДНК.

Синтез белков производится в цитоплазме под контролем ДНК. В нем принимают участие молекулы трех видов рибонуклеиновой кислоты (рис. 11.4). Транспортная — тРНК — соединяется с активированными аминокислотами. Активация происходит за счет энергии, вырабатываемой митохондриями; информационная — иРНК — передает от молекул ДНК, находящихся в хромосомах, генетическую информацию о составе белка в рибосомы цитоплазмы; рибосомная — рРНК — входит в состав рибосом. Так реализуется тесная взаимосвязь между биохимическими процессами в ци-

443

Рис. 11.4. Схема биосинтеза белка:

1 - синтез мРНК (транскрипция); 2—3 — иРНК проходит через поры ядерной мембраны к рибосомам (трансляция); 4 — аминокислоты, соединяясь в определенной последовательности на РНК, образуют фермент; 5—6 — образование белка



топлазме и ядре. Процесс синтеза осуществляют рибосомы. Предварительно на каждом гене в виде молекулы РНК синтезируется его копия. Эти копии, упакованные определенным образом, вытекают из ядра через поры его оболочки, попадают в цитоплазму, где и соединяются с рибосомами, прикрепленными к канальцам ЭПС. Как только к ним приблизятся молекулы РНК, несущие информацию от генов, начинается синтез ферментов. Готовые ферменты уплывают в цитоплазму и делают свою работу.

444

После открытия роли ДНК и механизма синтеза белков стало ясно, что ген — это участок цепочки ДНК, на котором записано строение молекулы определенного белка. В одних генах 800 пар нуклеотидов, а в других — около миллиона.

Если нуклеотиды соединены в ДНК в произвольной последовательности, то они обладают аутокатализом. При помещении таких молекул в раствор всех четырех оснований, находящихся в соответствующем количественном соотношении, молекулы начинают в точно такой же последовательности, как в них самих, пристраивать основания, а потом отделять от себя готовые цепочки, т.е. самоудваиваться. Если не произойдет мутации, все копии будут похожи на оригинал. Если последовательность нуклеотидов была случайной, то никакой наследственной информации она не содержала, несмотря на способность удваиваться. Ген, выступая в роли катализатора, может ускорить или замедлить некоторые химические процессы вокруг себя. Большие преимущества получают такие структуры ДНК, которые в своем окружении могут увеличить концентрацию веществ, необходимых для размножения. При этом в «первичной» молекуле ДНК возникнут отрезки, образующие гены, каждый из которых стимулирует (или подавляет) образование необходимых для удвоения (или мешающих размножению) ДНК соединений, и молекула становится носителем *генетической*

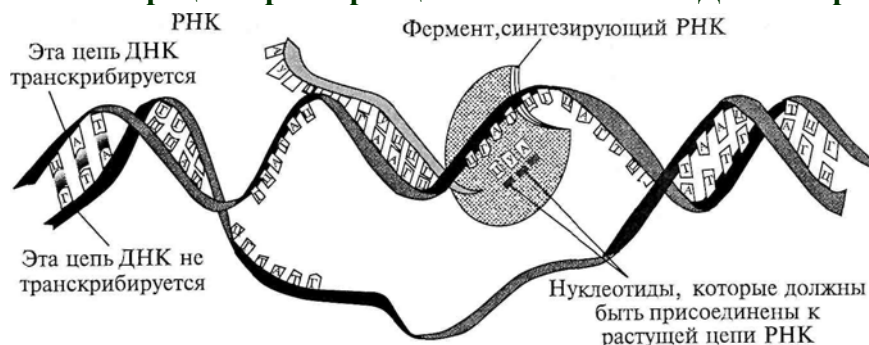
информации, которая содержится в наборе генов, контролирующих синтез соединений и обеспечивающих удвоение ДНК при определенных условиях. Происходит формирование оболочек, отделяющих участок ДНК и создаваемых генами структур, которые способствуют синтезу копий самой ДНК, как подчеркивает А. Балбойанц в книге «Молекулы, динамика и жизнь» (1990). Изменения самих генов влияют на другие структуры организма, что обеспечивает эволюцию. И генетическая информация, или совокупность генов, регулирует целенаправленную деятельность любой живой клетки через последовательность расположения оснований, т. е. генетическая информация записана в ДНК определенной **последовательностью оснований**.

Проблема генной активности, раскрывающая особенности функционирования на молекулярном уровне, решена Ф. Жакобом и Ж. Моно (1960). Они разделили гены на **гены-регуляторы** (кодируют структуру белка) и **структурные** гены (синтез ферментов). В дальнейшем оказалось, что синтез ферментов напрямую зависит от состояния генной активности. Под действием жесткого излучения синтез ферментов прекращается. Значит, основная функция генов — **кодирование белка**.

В более сложных системах протекают более масштабные процессы, но в цепях сигнализации, образуемых ферментативными реакциями, тоже есть механизмы обратной связи, и за последнее десятилетие многие из них были расшифрованы. При этом «узна-

445

Рис. 11.5. Процесс транскрипции: синтез РНК на ДНК-матрице



вание» клеток происходит через мембраны. «Если измельчить до клеток живую губку и поместить их во вращающийся сосуд, то образуется скопление, подобное чаинкам в стакане чая, помешанном ложкой. И в таком скоплении клетки вновь объединяются, губка воссоздается!» — отмечает Волькенштейн. После работ Жакоба и Моно выяснилось, что регуляторами генов могут быть гистоны — белки, которые ранее считали упаковочным материалом для ДНК (рис. 11.5). В клеточном ядре они объединяются с длинными цепями ДНК, содержащими гены, образуя хроматин, из которого построены хромосомы. Будучи положительно заряженными, гистоны представляются чем-то вроде «шпильки», на которую плотно наматывается отрицательно заряженная цепь ДНК, уместаясь в ядре клетки. Установлено, что гистоны способны подавлять или ускорять транскрипцию. К началу 90-х гг. выяснили, что многие регуляторные белки соединяются попарно, что необходимо для связывания с ДНК. Есть гипотеза, что это соединение определяет, в каких клетках какой ген будет работать, а в каких — нет. «Зубчики», как в застежке «молния», соединяя молекулы регуляторных белков друг с другом, почти всегда состоят из остатков аминокислоты лейцина. Кроме этого «молниевое» механизма был открыт и другой — типа «спираль—петля—спираль».

Знания по регулировке работы генов были получены в основном на отдельных генах и не давали цельной картины регулировки генома как единого целого.

В настоящее время бурно развивается техника биочипов — маленьких пластинок, на которые с помощью прецизионных приборов наносят микроскопические количества фрагментов ДНК в тысячи точек на строго определенных расстояниях. Такой биочип может содержать, например, 19 тыс. генов червячка нематоды — червячка длиной 1 мм, у которого в конце 1998 г. удалось полностью прочитать весь геном. Нематода состоит всего из 959 клеток, из них 30 % — нервные, и можно следить за поведением и судьбой буквально каждой клетки! Эта работа продолжа-

446

лась 8 лет при темпе 1 млн пар нуклеотидов за год двумя центрами по сто ученых в каждом. Оказалось, что гены сосредоточены плотнее в центре хромосом, что только у 7 тыс. генов можно установить их функции, а 12 тыс. остались молчащими. У дрожжей, относящихся к одноклеточным грибам, геном (впервые!) был расшифрован в 1997 г. — у половины генов была неизвестна функция. Значения этих расшифровок генома уже многоклеточного (нематоды) — это не только полигон для расшифровки генома человека. Сейчас известно более 20 геномов бактерий, и их можно сравнить с другими геномами! У человека только в 5 раз больше генов, чем у нематоды, поэтому 20 % генов будут известны, и их поиск будет облегчен. Это поможет понять и смысл «молчащих» генов нематоды. Кроме того, гены червячка легко изменять (мутировать) и наблюдать за изменением структуры гена и свойств организма.

Науку о наследственности вывело на молекулярный уровень открытие микробиологами О.Эвери, К. Мак-Леодом и М. Маккарти *трансформирующей активности свободной молекулы ДНК*: она может переносить свойства одного организма к другому (1944). Рождение молекулярной генетики связано с еще одним открытием (1941). Опыты Дж. Бидла и Э.Тэйтума установили прямую связь между состоянием генов, входящих в ДНК, и синтезом ферментов (белков). Отсюда выражение «один ген — один белок». Вскоре

выяснили, что кодирование белка — основная функция генов.

Геномная программа уже доказала сейчас свое выдающееся значение для развития знаний о жизни в целом. Пионерами в расшифровке генома человека были Дж. Уотсон (США) и А. А. Баев (СССР). В клетках человека, как известно, 46 хромосом, длина генома достигает 2 м и состоит из 3 млрд нуклеотидных пар.

За последнее десятилетие стало ясно, что секвенирование генома в столь гигантском масштабе могло быть получено только индустриальными методами. Для картирования генома, начального этапа, были разработаны специальные техники. Например, собраны коллекции клеток, в которых удалены разные небольшие фрагменты каждой из хромосом, или искусственные дрожжевые хромосомы, содержащие огромные фрагменты хромосом человека, бактериальные и фаговые векторы, позволяющие размножить (клонировать) фрагменты ДНК человека. Эти техники позволили построить детальную карту генома человека, которая в конце 1998 г. содержала более 30 тыс. маркеров. Для программы расшифровки генома за основу взяли методы, разработанные в США Гилбертом и Сэнглером. В разработке этих методов принимали участие и наши соотечественники — ученые РАН — А. Д. Мирзабеков, С. К. Василенко, Е. Д. Свердлов. Суть метода Сэнгера в том, что молекулу ДНК с помощью специальной обработки ферментами не только расщепляют на фрагменты, но «расплетают» ее спираль на две нити. Потом по каждому из полученных

447

отрывков, состоящих из отдельных нитей нуклеотидов, с помощью специальных химических «затравок» восстанавливают недостающую нить нуклеотидов. Ее синтез обрывают на разных нуклеотидах, так получается набор цепей ДНК с меняющейся длиной. На концах их отмечают какой-то меткой, чтобы легче обнаружить. Если ранее считали, что у человека генов около 90 тыс., то теперь это число колеблется между 30 тыс. и 40 тыс.

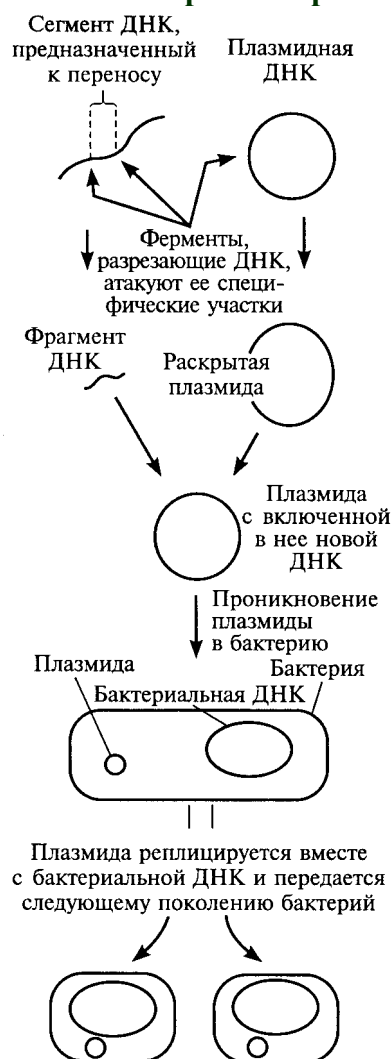
В феврале 2001 г. были опубликованы почти полные нуклеотидные последовательности ДНК человека. Теперь задача — понять функции тех генов, о которых узнали. Те 32 тыс. известных генов составляют 5 % генома. А для чего нужны остальные участки — пока непонятно. Но обращает на себя внимание закономерность — у бактерии «бессмысленных» участков вовсе нет, у дрожжей — почти нет, т.е. по мере повышения уровня организации организма накапливается все больше такой некодирующей ДНК. Возможно, они — «склад запчастей» или испорченные гены, погибшие из-за мутаций, или молекулярное «кладбище древнейших вирусов», заразивших когда-то предков человека. Кроме того, в геноме много и повторяющихся участков. Оказалось, что по геному человек мало отличается от мыши — различия в структуре генов всего на 10—15%, а от шимпанзе отличий почти нет. Этот вывод сделан, конечно, по отдельным изученным участкам.

На молекулярно-генетическом уровне существует несколько **механизмов изменчивости**. Важен сам механизм преобразования генов, происходящий в хромосоме при сильном воздействии. При мутации генов оказалось, что порядок их расположения в хромосоме сохраняется. Процесс образования мутаций в пространстве и во времени называют *мутагенезом*.

Впервые мутации еще в 1901 г. описал голландский ученый Г. Де Фриз, построивший и основы теории мутаций. Организмы, обладающие свойствами, находимыми в природе, называют диким типом; им соответствуют наборы генов, которые являются природными. Такие организмы служат эталоном, с которым сравнивают мутантные организмы или мутантные гены. Мутации возникают на стадии индивидуального развития организмов и поражают гены и хромосомы во всех типах клеток и на всех стадиях клеточного цикла. Поэтому мутации по типу клеток делят на генеративные, происходящие в половых клетках, и соматические. Последние будут сохраняться только в этих клетках (у животных и человека), а у растений (из-за возможности вегетативного размножения) они могут выйти за пределы этих клеток.

Мутации генов — основные поставщики материала для прямого действия естественного отбора. Иной механизм — это *рекомбинация генов*, т.е. создание новых комбинаций генов в конкретной хромосоме. Если в одной из соматических клеток организма произошла мутация, т.е. наследуемое изменение в молекулах ДНК,

448

Рис. 11.6. Получение и клонирование рекомбинантной ДНК

изменяются не только наследственные признаки клетки, но и части организма, которые образуются из ее потомков. Если мутации произойдут в половых клетках, то наследственные признаки передадутся потомкам. Мутации могут быть вызваны разными факторами, например излучениями, вызывающими разрывы или повреждения каких-либо участков ДНК, так что могут быть выведены из строя целые участки хромосом. Некоторые химические вещества, вступающие в химические реакции с нуклеотидами, тоже могут быть включены в ДНК, и эта ошибка передастся потомкам. Сами гены не меняются, но перемещаются вдоль хромосомы, или происходит обмен генами между разными хромосомами. Этот процесс происходит при половом процессе у высших животных. Возможна и неклассическая рекомбинация генов, когда увеличивается генетическая информация и в геном включаются новые генетические элементы (трансмиссионные). Этот механизм был открыт при *явлении трансдукции* (от лат. — перемещение) генов (П.Ледерберг и Н. Циндер, 1952). Перенос молекул ДНК здесь осуществляется так же, как в составе вирусов бактерий. Этот вид рекомбинации был детально изучен, выделено несколько типов трансмиссионных генов. Они отличались структурой генома и способом связывания с клеткой хозяина. Одни из самых активных — плазмиды (двухцепочечные кольцевые ДНК), вызывающие привыкание к лекарствам после длительного употребления (рис. 11.6). Такие мигрирующие генетические элементы вызывают мутации генов в хромосомах. На создании рекомбинантных молекул основывается **генная инженерия**. Ее цель — создать новые формы живых организмов с заданными свойствами.

449

Т.Морган начал (1909) в Колумбийском университете эксперименты с помощью существа, которое могло быстро размножаться в ограниченном пространстве и при малых затратах — плодовой мушки дрозофилы. Изучая распределение наследственных признаков у мушки, он установил, что гены находятся в хромосомах и есть три группы генов, наследуемых как единое целое. Он назвал это явление *сцеплением генов*. В клетках мушки — три большие хромосомы и еще одна небольшая, которую через несколько лет Мёллер связал с найденной им четвертой группой генов. Морган выявил линейное расположение генов в хромосоме, а Н.К.Кольцов соединил с этим открытием идею кристаллизации. Так Кольцов пришел к своей матричной концепции. Морган установил, что в следующих поколениях гены, принадлежащие к одной группе, оказывались в разных группах, т.е. между хромосомами происходит обмен генетическим материалом. Это —

эффект *кроссинговера* (он видел в микроскоп, как две хромосомы сближались и скрещивались, обмениваясь фрагментами).

Морган представил гены упорядоченными по длине хромосом наподобие бусинок в ожерелье. Так он пришел к идее создания генетических карт, в основу которых положено уменьшение вероятности разрыва связи между генами с увеличением расстояния между ними. Впоследствии была введена единица «морган» для оценки кроссинговера (1 морган = 1 % эффекта). Но мутации в его исследованиях составляли весьма малую долю. С 1934 по 1937 г. Мёллер работал в СССР с Н. И. Вавиловым и другими биологами. Он привез из США бесценную коллекцию мутантных линий дрозофилы в подарок Кольцову, что способствовало успехам советской генетики в 20 — 30-х гг. Мёллер установил, что число мутаций увеличивается с ростом температуры. В 1925 г. Г. А. Надсон и Г. С. Филиппов подвергли рентгеновскому облучению дрожжи, положив начало *радиобиологии*. Мёллер тоже стал использовать это облучение, повысив частоту мутаций в 1000 раз. В 30-е гг. радиобиология развивалась быстрыми темпами. В 1935 г. в Москве был получен размер гена дрозофилы.

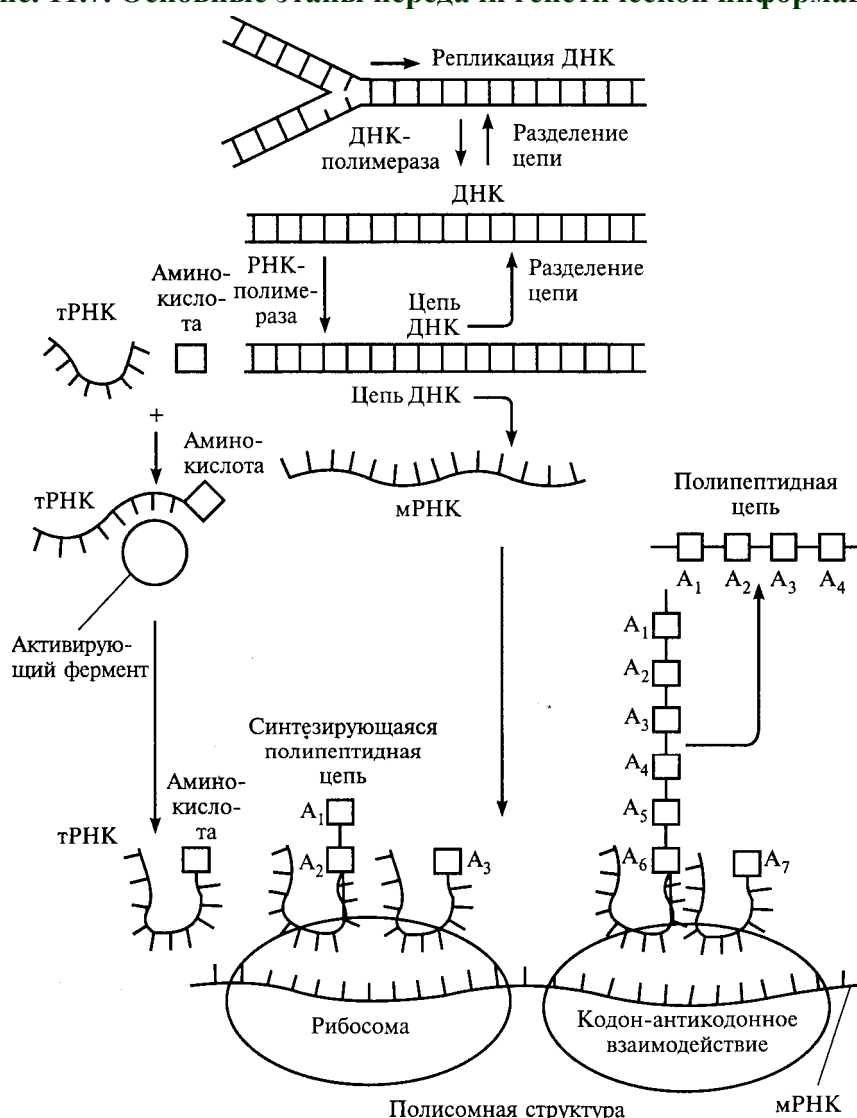
Современный уровень знаний в области биохимии позволяет не только понять и проследить эти тонкие процессы, но и использовать их в своих целях. Методами *генной инженерии* можно внедрить в клетку желаемую генетическую информацию. В 70-е гг. появились методы выделения в чистом виде фрагментов ДНК с помощью электрофореза. В руки ученых попали «молекулярные ножницы». Транспортным средством переноса генетической информации в клетку стал вирус. Явление *трансдукции* — переноса генов из одной клетки в другую с помощью вирусов изучали еще с 50-х гг. Но вирус не должен был сразу уничтожать всю клетку, поэтому не все вирусы подходили для этой роли. Известно, что бактериальные клетки могут обмениваться генетическим матери-

450

алом при помощи *плазмид* (небольших частиц с фрагментами ДНК). Поэтому введение нужного гена в плазмиду позволяет в дальнейшем перенести этот ген в бактерию (это еще один из механизмов транспорта в генной инженерии).

Появилась возможность изучать распределение нуклеотидов в определенном гене или получать нужный белок. Для этого создается рекомби-

Рис. 11.7. Основные этапы передачи генетической информации



451

нантная ДНК, которая возникает, когда ДНК одного организма внедряется в клетки другого. В качестве последнего используются клетки организма, который размножается много быстрее первого, например бактерии. Так, в 80-е гг. были разработаны *интерфероны* — белки, способные подавлять размножение вирусов. Были выбраны наиболее подходящие для переноса гены и мобильные участки ДНК. Например, культурным растениям вводят гены, повышающие их иммунитет и устойчивость. В 1983 г. Барбара Макклиток при изучении генетики кукурузы обнаружила в ее геноме один «подвижный» ген, отвечающий за цвет початка. Независимо от нее подвижные гены были открыты методами молекулярной генетики советским ученым Г. П. Георгиевым. В 1981 г. процесс выделения генов и получения из них различных цепей был автоматизирован. Генная инженерия в сочетании с микроэлектроникой предвещают возможности управлять живой материей почти так же, как научились управлять неживой. Но подобное сверхтонкое вмешательство в самые сокровенные тайны живой природы слишком опасно, да и готов ли по своим моральным качествам к подобному управлению живым миром сам человек?!

Специализация клеток, как известно, связана с блокировкой части генов в клетке, и при этом важно влияние соседних клеток. Если выделить одну клетку и освободить ее от влияния соседних, подобрав питательную среду, эта клетка будет вести себя как зародышевая. Даже если она взята из любой ткани, из нее может вырасти весь организм, поскольку блокировка части генов теперь снята. Так работа генов регулируется соседними клетками через химическую сигнализацию. Такие опыты были поставлены на растениях, и английский биолог Гордон создал искусственных двойников лягушки, доказав регулируемую роль цитоплазмы, определяющей активность генов. Опыты, подтверждающие единство генетических программ во всех клетках одного организма, легли в основу клонирования, создания генетических двойников. Когда будут выяснены механизмы активации и репрессии генов, легче будет понять, чем вызывается нарушение регулирования внутриклеточных процессов, приводящее к какой-либо болезни (типа рака). Итак, жизнь зависит от точности передачи информации (рис. 11.7). «Сообщение», которое несет молекула ДНК, передается молекуле РНК и считывается в рибосоме, где происходит процесс сборки белка в соответствии с

информацией, содержащейся в гене.

11.7. Молекулярный механизм процессов обмена веществ и энергии

Обмен веществ (метаболизм) — это совокупность изменений и превращений вещества и энергии в организмах, обеспечивающих их рост, развитие, жизнедеятельность, самовоспроизведение и самосохранение. Процесс метаболизма — это непрерывно протекающие реакции потребления и усвоения поступающих веществ,

452

превращения их в собственное тело организма (*ассимиляции*), а также противоположные реакции — разрушения некоторых веществ (*диссимиляции*). Ассимиляция может быть *автотрофной* (фотосинтез у зеленых растений) и *гетеротрофной* (пищеварение у животных). При химическом разложении молекул выделяется энергия, скрытая в форме химических связей в исходном соединении, и становится доступной для живой клетки. Примеры диссимиляции — дыхание, брожение. Пищеварение включает в себя процессы расщепления. Реакции между органическими соединениями идут очень медленно. В живой клетке выработались ускорители реакций — *ферменты*: биологические катализаторы, присутствующие во всех клетках и имеющие белковую природу. Их активность зависит от условий окружающей среды, определенной pH, и отсутствия ингибиторов. Они не изменяются и не расходуются в ходе реакций, как и катализаторы. Огромна их производительность — одна молекула фермента может за 1 мин разложить до 5 млн молекул субстрата — вещества, на которое действует фермент.

Для каждого вида организмов генетически закреплён свой тип обмена веществ, зависящий от условий существования. Его интенсивность и направленность обеспечиваются регуляцией проницаемости биомембран и синтеза и активности ферментов гормонами, координируемыми центральной нервной системой. Ферменты применяют в сельском хозяйстве, пищевой и легкой промышленности, медицине.

Фермент воздействует только на одно изменение; обозначают его путем прибавления к названию субстрата окончания «-аза». Так, фермент, разлагающий сахарозу, — *сахараза*. Если отмечается активность фермента в определенной реакции (гликолиза, например), его называют *сахараза-гидролаза*. Ферменты, отщепляющие водород, — *дегидрогеназы*. Они действуют лишь на свой субстрат — есть дегидрогеназа молочной кислоты, дегидрогеназа янтарной кислоты и пр. Сверхспециализированные ферменты расщепляют только один из двух стереоизомеров, например молочной кислоты — L- и D-формы, которые отличаются направлением вращения плоскости поляризации. Но есть и не столь избирательные ферменты. Например, *липазы* — ферменты, образующиеся в поджелудочной железе, разлагают почти все жиры на глицерин и жирные кислоты.

Ферменты должны обеспечить узнавание своего субстрата, присоединение к нему и химическое его преобразование. Эти функции выполняют две разные части большой молекулы фермента. *Кофермент* — это низкомолекулярная часть (витамин или ион металла типа меди и молибдена). Например, многие дегидрогеназы используют одинаковые вещества в качестве коферментов: амид никотиновой кислоты (витамин В) и фосфорную кислоту. У ферментов, отщепляющих CO₂, коферментом служит тиаминпиро-

453

фосфат — витамин В₁, а у ферментов, отщепляющих аминокетильные группы (NH₂), — витамин В₂. Именно коферменты отвечают за специфичность действия. В зависимости от собственного строения они способны химически изменять присоединенный субстрат, это их функция. Другая часть фермента — *апофермент*. Эта белковая часть выбирает субстрат и соединяет его с коферментом. Апофермент определяет специфичность субстрата. Только при соединении вместе эти две части приобретают ферментальную активность.

Гомеостаз (постоянство внутренней среды организма) обеспечивается метаболизмом. Обмен веществ осуществляется на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях. В живой клетке постоянно происходит непрерывное движение веществ через ее оболочку — мембрану. Значительное количество энергии высвобождается и при фотосинтезе.

Выяснение механизмов превращения энергии в биосистемах — одно из больших достижений науки в XX в. Стало понятно, как солнечная энергия преобразуется в специальных пигментных структурах растений в энергию химических связей, как превращаются вещества в процессах брожения и гликолиза (окисление углеводов без кислорода), как происходит внутриклеточное дыхание — перенос электронов в митохондриях от коферментов к кислороду.

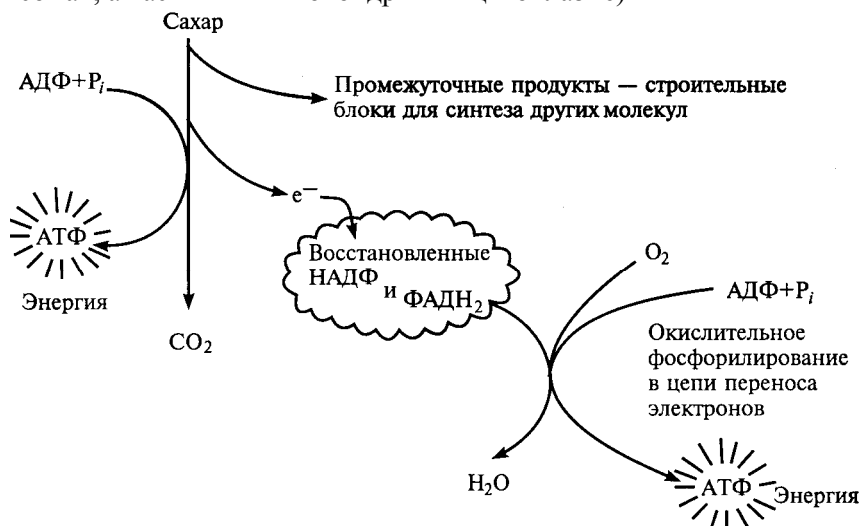
В центре этих превращений в клетке находится АТФ, которая синтезируется из АДФ и H₃PO₄ за счет световой энергии или энергии, выделяемой при гликолизе, брожении или дыхании. При гликолизе АТФ выделяется энергия, необходимая для совершения всей работы живого организма — от создания градиентов концентрации ионов и сокращения мышц до синтеза белка. Углеводные остовы для синтеза метаболитов поставляют процесс распада липидов (рис. 11.8).

Открытие этих общих для всех организмов биохимических процессов, осуществленное усилиями исследователей во многих лабораториях мира (в Германии — О.Мейергоф, К.Ломан, Ф.Липман; в СССР — В.А.Энгельгардт, М.Н.Любимова, В.А.Белицер, Я.О.Парнас и др.), стало возможным благодаря применению в биологии идей термодинамики. В.А.Энгельгардт сформулировал принцип механохимических преобразований

энергии непосредственно на макромолекулах ферментов. В 1961 г. английский биохимик П. Митчелл выдвинул гипотезу хемиосмотического сопряжения, обратив внимание на возможность синтеза АТФ за счет энергии электрохимического потенциала (из-за неравновесной концентрации ионов по разные стороны биологических мембран) и прямого электрохимического преобразования энергии.

Обменные процессы в неживой природе характеризуются круговоротом веществ, цикличностью. В круговорот втянуты все геосферы, в них происходят процессы переноса веществ, меняющие их локальную концентрацию. С появлением жизни

Рис. 11.8. Распад липидов, поставляющий углеродные скелеты для синтеза сахарозы и пр. (часть реакций происходит в глиоксисомах, а часть — в митохондриях и цитоплазме)



ни в обменные процессы, происходящие в неживой природе, стали втягиваться и процессы биосферы, которая представляет единство живого и минеральных элементов, вовлеченных в сферу жизни. В обменных процессах, происходящих в неживой природе, нельзя выделить взаимосвязанных процессов ассимиляции и диссимиляции. Хотя все эти процессы происходят циклически во всех геосферах, они не направлены на цели роста, самосохранения, воспроизводства, адаптации и других характеристик, свойственных живым организмам. Согласно концепции Вернадского, «миграция химических элементов на земной поверхности и в биосфере в целом осуществляется или при непосредственном участии живого вещества (биогеохимическая миграция), или же она протекает в среде, геохимические особенности которой (кислород, углекислый газ, водород и др.) обусловлены живым веществом, как тем, которое в настоящее время населяет биосферу, так и тем, которое действовало на Землю в течение всей геологической истории».

Структурную основу метаболизма обеспечивает *клеточный матрикс*, определяющий пространственное размещение молекулярных компонентов клетки, занятых в процессе жизнедеятельности. Среди клеточных органелл особую роль играют *хлоропласты* клеток зеленых растений и *митохондрии* любых организмов. В хлоропластах происходит связывание энергии солнечного света в процессе фотосинтеза. В митохондриях же извлекается энергия,

455

заклученная в химических связях поступающих в клетку питательных веществ.

Функция клеточных органелл — митохондрий — была долгое время неясна. Они на 85 % состоят из воды, как и целые клетки, а их сухое вещество — из белка и липидов. Митохондрии богаты элементарными мембранами, состоящими из бимолекулярной липидной пленки, покрытой с двух сторон белковой пленкой. На внутренней поверхности мембраны упорядоченно расположены ферменты, обеспечивающие синтез АТФ. В митохондриях — множество ферментов клеточного дыхания и ферментов синтеза АТФ, много собственных ДНК и РНК, есть рибосомы, поэтому они могут синтезировать белки. Размножаются митохондрии делением пополам.

Энергия, необходимая для биосинтеза, выделяется в процессах *диссимиляции*. Важнейший субстрат этих процессов — углеводы; для дыхания требуются еще белки и жиры, а для брожения — спирты, органические кислоты и др. Процесс **сжигания глюкозы** до двуокиси углерода CO_2 происходит в несколько стадий, чтобы предотвратить его взрывной характер и успеть усвоить выделившуюся энергию. При расщеплении **глюкозы** энергия выделяется на каждом этапе реакции при участии ряда ферментов: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 + 2875 \text{ кДж}$. При этом часть энергии выделяется в виде теплоты, а часть идет на образование АТФ, «энергетической валюты» клетки. И в дыхании, и брожении расщепление глюкозы начинается с анаэробного распада глюкозы с образованием пировиноградной кислоты, АТФ и кофермента НАДФ (никотинамидадениндинуклеотид). Этот процесс называют *гликолизом*. В процессе брожения при участии ферментов продолжается дальнейшее расщепление веществ в отсутствие кислорода. Распад одной молекулы глюкозы приводит к образованию двух молекул АТФ, в каждой из которых сохраняется в виде химической

связи до 40 % энергии. Оставшаяся энергия расщепления рассеивается в виде теплоты. Для организмов типа дрожжей этого было бы достаточно — они только отщепляют углекислый газ от пировиноградной кислоты, присоединяют водород, который имели «в запасе», и получается этиловый спирт. Этот процесс называют *спиртовым брожением*. При этом приобретает еще молекула фосфата. Гликолиз происходит не в митохондриях, но последующие стадии дыхания клетки без них не обходятся.

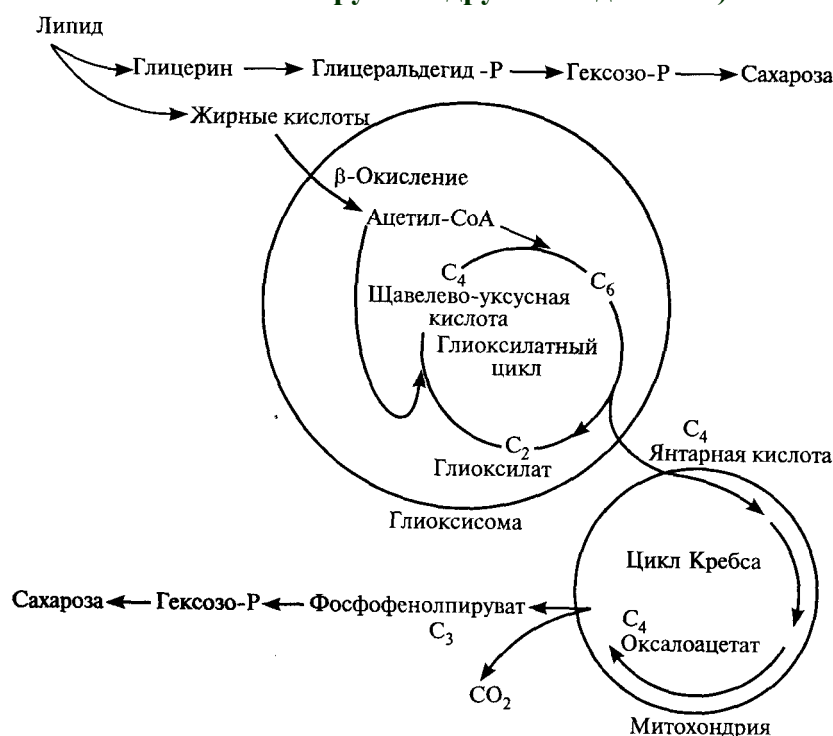
Другой вид энергетического обмена — кислородный — называется аэробным (дыханием). Вещества расщепления глюкозы, полученные при гликолизе, в присутствии кислорода расщепляются до воды и углекислого газа. При этом образуется 30 молекул АТФ. Окисление двух молекул НАДФ в электротранспортной сети митохондрий сопряжено с синтезом еще шести молекул АТФ. Итак, в процессе дыхания образуется 36 молекул АТФ, а с уче-

456

том еще двух, образовавшихся при гликолизе, — 38 молекул АТФ. Энергия молекулы АТФ во внутриклеточных условиях — около 42 кДж/моль, а для 38 молекул — 1600 кДж/моль. Это значит, что КПД процессов равен 55 %.

Пировиноградная кислота расщепляется под действием ферментов до углекислого газа и водорода, а на последней стадии водород окисляется кислородом с образованием воды. Молекулы H_2O и CO_2 очень бедны энергетически, поэтому энергия, содержавшаяся ранее в пировиноградной кислоте, обнаруживается в богатом энергией химическом соединении — АТФ и частично переходит в теплоту. Образование АТФ — главный результат и «цель» клеточного дыхания (рис. 11.9). Образуется АТФ присоединением к имеющейся в клетке АДФ третьей молекулы фосфорной кислоты (процесс фосфорилирования), и митохондрии поставляют клетке АТФ, используемую в различных процессах, требующих затраты энергии. Поэтому их называют энергетическими фабриками клетки, и мышечные клетки имеют большее

Рис. 11.9. Схема, поясняющая функции процесса дыхания (высвобождение энергии, используемой в процессах метаболизма и образование строительных блоков, из которых в клетке синтезируются другие соединения)



457

число митохондрий, чем другие. Увеличение числа митохондрий происходит за счет их деления, которому предшествует стадия редупликации ДНК. Они содержат кольцевую молекулу ДНК и способны осуществлять полуавтономный синтез белков. Для аккумуляции химической энергии в клетке природа выбрала одно универсальное соединение — АТФ.

АТФ — это аденозинтрифосфат

АТФ — это аденозинтрифосфат, нуклеотид, концентрация которого в клетке мала (0,04 %). Молекула АТФ состоит из аденина, рибозы и трех остатков фосфорной кислоты. При гидролизе остатка фосфорной кислоты выделяется энергия: $АТФ + H_2O = АДФ + H_2PO_4 + 40 \text{ кДж/моль}$. Поскольку связь между остатками фосфорной кислоты почти в 4 раза больше, чем при расщеплении других связей, АТФ хранит энергию живого организма. Клетки используют энергию АТФ при производстве теплоты, биосинтезе, движении, в процессе фотосинтеза, проведении нервных импульсов и пр.

Лизосомы

Лизосомы выполняют в клетке роль желудка, ферменты — желудочного сока. В них содержится до 30 ферментов, способных расщеплять белки, липиды, нуклеиновые кислоты и др. Лизосомы — пузырьки диаметром около 0,4 мкм, окруженные мембраной. Разрыв их мембраны растворит клетку, так как ферменты очень активны и способны «съесть» ее всю. При голодании они растворяют некоторые органоиды, не убивая саму клетку.

11.8. Молекулярные основы воспроизведения генетической информации и осуществления связи между клетками

Благодаря ДНК клеточное ядро выполняет свои главные функции: хранения и воспроизведения генетической информации и регуляции процессов метаболизма в клетке. Жизненный цикл клетки — это промежуток времени от ее возникновения до гибели. Совокупность процессов при подготовке к делению и сам процесс называют *митотическим циклом*. Период подготовки — *интерфаза* — состоит из синтеза РНК и белков, необходимых для редубликации ДНК; самого процесса редубликации ДНК; синтеза РНК и белков, необходимых для митоза; процесса удвоения клеточного центра.

Митоз (от греч. *mitos* — нить)

Митоз (от греч. *mitos* — нить) — процесс деления клетки, состоящий в точном распределении генетического материала между дочерними клетками.

Деление клетки начинается с ядра, когда хромосомы уже удвоились: ядерное содержимое в них уплотняется; область ядра приобретает вытянутость, и в разные концы ее направляются половинки каждой хромосомы. Там они собираются вместе (в том же составе и числе, что и целые хромосомы до начала деления), окружаются новой мембраной, разрых-

458

ляются и теряют свои четкие контуры. Содержимое ядра вновь начинает равномерно окрашиваться, образуются два, совершенно идентичных, новых ядра. Затем между ними появляется перегородка, разделяющая содержимое клетки, прежде всего цитоплазму, на две равные части, и возникают две одноклеточные клетки, содержащие совершенно одинаковую генетическую информацию, не отличающуюся от информации клетки-родительницы.

Митоз можно наблюдать в световой микроскоп за 1,5 — 2 ч, но управляющие митозом процессы — пусковые, управляющие и регуляторные — лежат на молекулярном уровне, и, по-видимому, они аналогичны процессам, происходящим при синтезе белков. Некоторое время считалось, что митоз запускается нарушением равновесия между растущим ядром и цитоплазмой по массе, объему и поверхности. Поскольку ядро растет медленнее, условия окружения становятся все более неблагоприятными для него, достигая порогового значения, и ядро начинает делиться. Но пока объективных доказательств такого объяснения «начала» нет.

Через процесс митоза, или через механизм «расхождения двойной спирали», наследуются мутации, но их частота мала. Биологическое значение митоза огромно. Правильность функционирования органов и постоянство строения невозможны без сохранения одинакового набора генетического материала во многих поколениях. Он обеспечивает эмбриональное развитие, рост, восстановление органов и тканей после повреждений, физиологическую регенерацию. Простейшие размножаются путем митоза.

Все виды размножения делят на половые и бесполовые. При *бесполовом размножении* новая особь развивается из соматических клеток. Таковыми являются митотическое деление, почкование и спорообразование, свойственные как одноклеточным, так и многоклеточным организмам. *Половым размножением* называют смену поколений и развитие организмов на основе специальных, половых клеток, называемых **гаметами** (от греч. *gamete* — жена). Половые клетки объединяются, и их ядра сливаются с образованием **зиготы** (от греч. *zygotes* — соединенный вместе) — оплодотворенного яйца, содержащего уже одно ядро с двойным набором хромосом. При этом способе генотип потомков возникает путем комбинации генов, принадлежащих обоим родителям. Все многообразие многоклеточных своим началом имеет оплодотворенную клетку — зиготу. Этот вид размножения обеспечил очень большие эволюционные преимущества по сравнению с бесполовым, поскольку механизм позволяет перемешивать и по-новому сочетать гены.

Гаметы развиваются в половых клетках в несколько стадий. Первичные половые клетки делятся в результате митоза, их число растет, и происходит редубликация ДНК (интерфаза 1). Период созревания называют *редукционным делением*, или мейозом.

459

При **мейозе** в экваториальной плоскости расположены не отдельные хромосомы, а пары сдвоенных хромосом, и делению подвержены только клетки с двойным набором хромосом — *диплоидные* (от греч. *diploos* — двойной + *eidos* — вид). Начало процесса похоже на митоз, ядро окрашивается равномерно, начинает делиться на хромосомы, появляются тонкие нити — стадия *лептонемы* (от греч. *peptos* — сваренный, переваренный), хромосомы расположены хаотично. На второй стадии — *зигонеме* (от греч.

zygon — пара) возникает структура, характерная для мейоза, и нити укладываются друг подле друга. На следующей стадии — **пахинеме** (от греч. **pachis** — толстый) нити спариваются полностью, и вместо двух удвоенных хромосом получается одна пара, и клетки содержат два набора удвоенных хромосом. На стадии **диплономы** хромосомы, располагающиеся попарно, расходятся и одновременно укорачиваются. Как только распадется клеточная мембрана, наступает стадия **диакинеза**. Далее процесс проходит так же, как и в митозе, но появляются новые комбинации хромосом, меняется суммарная информация. Появляются две гаплоидные клетки, разные и с новым набором хромосом. Половые клетки содержат один набор хромосом (гаплоидные), тогда как все другие клетки организма — двойной (диплоидные). За счет мейоза и возникает неидентичное потомство.

Если бы на стадиях **зигонемы** и **диплономы** не происходило взаимодействия партнеров, то эти процессы не имели бы особого смысла. На этих стадиях при наблюдении в микроскоп удается видеть перекресты между хроматидами — **хиазмы** (от греч. **chiasmōs** — крестообразное расположение). Это выглядит так, будто в каких-то точках произошли разрывы, потом разорванные участки срослись, но все не совсем так. Процесс, начинаясь раньше, приводит к обмену участками между хроматидами, что очень важно для потомства (для генов и выросших из них организмов), так как все они оказываются различными. Даже один перекрест ведет к рекомбинации. Частота перекрестов (и рекомбинаций) пропорциональна расстоянию между генами, поэтому она может служить мерой этого расстояния. Эти частоты могут складываться друг с другом, и можно строить хромосомные карты, где нанесены гены и расстояния между ними. Частота рекомбинаций обычно около 50 %, т.е. вероятность того, что после мейоза две хромосомы окажутся в одном ядре, равна 50 %. Это напоминает полученное еще Менделем соотношение (расщепление) 1:1. Но если гены находятся в одной хромосоме, то образуется 0% рекомбинаций при условии, что сцепление не нарушено. Сейчас уже получены значения частот рекомбинации до 0,02 %, измеряемые расстояния — порядка 10^{-9} м. Таким образом, генетический анализ позволяет различать на таких расстояниях точки на ДНК. Хорошие электронные микроскопы дают разрешение до $3 \cdot 10^{-10}$ м. Если ген состоит из 150 кодонов (450 нуклеотидов), то его длина составляет в 500 раз больше — около $1,5 \cdot 10^{-7}$ м. Но возможна рекомбинация и внутри одного гена!

460

Синтез белка по заданной ДНК программе осуществляют рибосомы. Информация, «записанная» в ДНК, «переписывается» (этот процесс называется **транскрипцией**) в РНК и переносится к клеточным органеллам — рибосомам. В эукариотических клетках процесс синтеза в РНК более сложный, чем простая транскрипция. Прежде чем выйти сквозь поры в ядерной мембране в цитоплазму, первичный транскрипт РНК подвергается созреванию («процессингу»), и этот процесс достаточно сложен. К этому пришли после открытия двойной спирали, причем многие гены были разорваны на куски. Значит, при транскрипции многие молекулы РНК разрываются, а потом соединяются («сплайнинг»). Тогда и получается мРНК, не точная копия ДНК, а отредактированная, т.е. какие-то ее части выброшены. Понимание процессинга РНК позволило иначе взглянуть на функционирование клетки и понять, почему в одном организме клетки становятся разными. Процесс сплайнинга позволяет проследить за тем, чтобы основная информация сохранялась, — ведь ошибка в один нуклеотид может привести к потере функциональных свойств белка. Экспериментальное изучение сплайнинга началось в конце 70-х гг. Этот процесс обнаружен даже у бактерий. Опыты показали вероятность того, что первыми генами могли быть сплайнированные РНК.

Специальные сигнальные системы обеспечивают работу в согласованном режиме миллиардов клеток. Сигнал передается вдоль нервного волокна в виде электрического импульса. На границе с клеткой-исполнителем он преобразуется в химический с помощью выделения окончаниями нервных волокон специального посредника — **нейромедиатора**. Нейроны посылают дискретные «сообщения» определенным клеткам-мишеням, ими могут быть мышечные клетки, клетки желез и другие нейроны. Эти сообщения — нейромедиатор, посылаемый в специальный участок — синапс (от греч. **synapsis** — соединение). Здесь молекулы нейромедиатора связываются с рецептором (специальной белковой молекулой) на поверхности клетки, воспринимающей сигнал, и вызывают изменения в мембране и внутри клетки. Сигнал за 10^6 с доходит до адресата. Электрофизиологические исследования показали, что не только разные нейромедиаторы, но и один и тот же нейромедиатор может вызывать разные эффекты, зависящие от типа синапса. Т. Хекфельт из Королевского института в Стокгольме показал (1977), что окончания многих нейронов содержат по 2 — 3 нейромедиатора, чем увеличивают возможности передачи большего количества информации.

Кроме передачи информации нервной системой в организме существует **химический канал связи**. Клетки сами выделяют вещества, которые через кровь или окружающую среду путем диффузии могут достигнуть других клеток (некоторые из них называют гормонами). Связь через гормоны происходит иначе.

461

Обычно гормоны образуются в клетках эндокринной системы, поступают в кровь и переносятся по системе кровообращения к другим клеткам и органам, находящимся далеко от эндокринной железы. Каждая клетка-мишень наделена рецепторами, распознающими молекулы только тех гормонов, которые должны действовать на нее. Рецепторы извлекают гормон из крови, связываются с ним и передают информацию в клетку. Связь через гормоны идет медленнее: ведь гормон, секретируемый специализированной железой, должен отыскать в организме свою мишень, что может занять несколько часов. Молекулы, обладающие гормональной

активностью, чаще всего являются *пептидами* — короткими цепочками аминокислот.

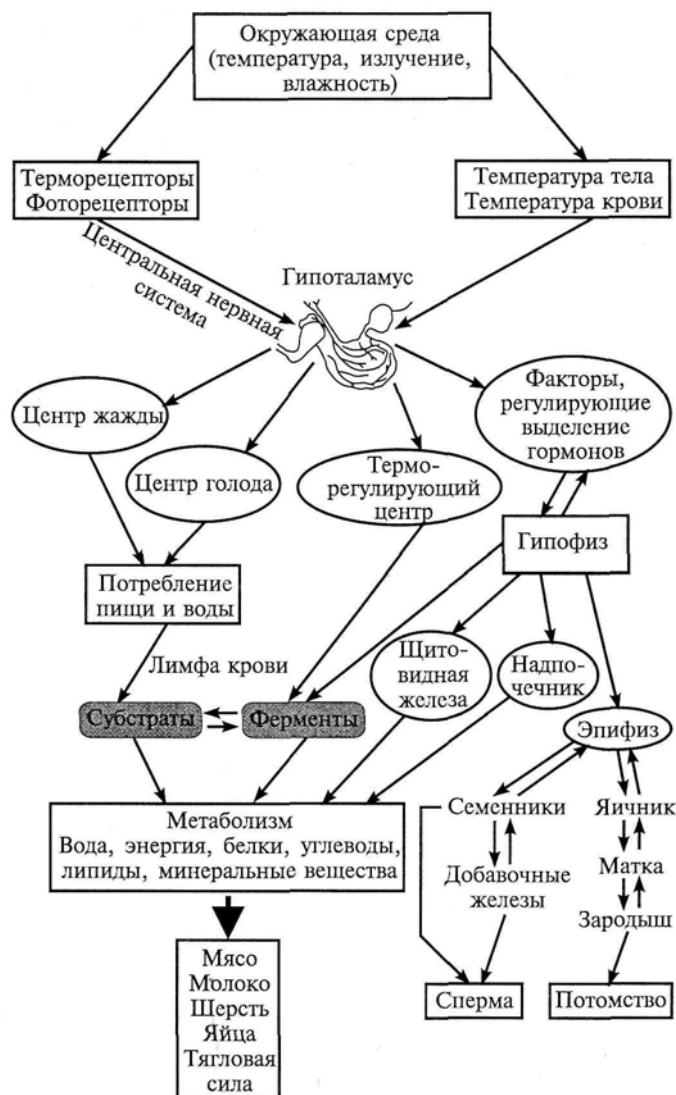
Хотя химический канал передает информацию с меньшей скоростью, чем электрический, наличие двух каналов обеспечивает надежность и многообразие связей внутри организма. Обе системы связи между клетками — и *нейронная*, и *гормональная* — действуют через специализированные молекулы, контактирующие с тоже специализированными рецепторами клеток-мишеней. Некоторые молекулы-медиаторы активно передают сигналы в обеих системах связи (рис. 11.10). Например, гормон норадреналин выделяется надпочечниками для стимуляции сердечных сокращений, расширения бронхов и усиления сокращения мышц конечностей. Одновременно он — и нейромедиатор в симпатической нервной системе, где способен вызывать сужение кровеносных сосудов, повышая артериальное давление, т.е. он может передавать различную информацию в обеих системах.

Если у амебы ее единственная клетка выполняет все функции, необходимые для поддержания жизни, то в многоклеточных организмах эта задача решается силами многих совершенно различных клеточных популяций, тканей и органов, находящихся далеко друг от друга. Для координации всех этих функций должны быть какие-то механизмы. У большинства высших организмов два способа коммуникации между клетками: при помощи гормонов и через нейроны — нервные клетки. По мере того как исследователи расшифровывают особенности структуры и функционирования химических веществ, служащих переносчиками информации, открываются новые возможности для создания все более безопасных и эффективных препаратов для лечения различных заболеваний сердца, гормональных или психических расстройств.

Точная координация функций клеток многоклеточного организма осуществляется путем передачи химических сигналов. Большая часть адресованных клетке сигнальных молекул не попадает внутрь нее. По наружной поверхности клетки расставлены молекулы рецепторов, которые играют роль антенн. Они распознают приходящие сигналы и приводят в действие внутриклеточные каналы передачи информации, которые регулируют внутриклеточ-

462

Рис. 11.10. Схема регулирования жизнедеятельности животных центральной нервной системой и гормональными механизмами



ные процессы — метаболизм, сокращение, секрецию, рост. Плазматическая мембрана клетки — барьер для потока информации. На молекулярном уровне передача информации обеспечивается цепочкой мембранных белков, последовательно взаимодействующих друг с другом. Это приводит к перестройке следующего в цепочке белка, а изменение структуры влечет изме-

463

нение его функции. На определенной стадии передача поручается находящимся в цитоплазме ионам и малым молекулам — вторичным мессенджерам. Их диффузия обеспечивает быстрое распространение информации внутри клетки, хотя их число невелико. Они способны регулировать огромное количество физиологических и биохимических процессов. Известны два пути передачи сигналов внутри клетки. Одним из вторичных мессенджеров является сАМР (циклический **аденозинмонофосфат**), другим — комбинация ионов кальция, **инозитолтрифосфата** и **диацилглицерола**. Последние два вещества образуются из самой плазматической мембраны. На обоих каналах работают G-белки — мембранные белки, активизирующие усилительный фермент, находящийся на внутренней стороне мембраны, и уже он превращает молекулы предшественников в молекулы вторичных мессенджеров. Оба канала ведут к изменению структуры клеточных белков.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Как происходит процесс биосинтеза белка?
2. Каково значение митохондриальной ДНК человека? Какова роль ферментов в репликации ДНК?
3. Как была открыта молекулярная структура ДНК и РНК?
4. Какое значение для биологии и естествознания имеет подразделение живого на уровни организации? Имеет ли оно практическое значение?
5. Назовите свойства живой материи, отличающие ее от неживой.
6. Какими общими чертами характеризуются разные уровни организации живого?
7. На чем основаны представления о том, что генетическим материалом являются нуклеиновые кислоты?
8. Охарактеризуйте молекулярно-генетический уровень организации живой материи.
9. Охарактеризуйте строение и биологическое значение АТФ. Почему АТФ называют основным источником энергии в клетке?
10. Каково значение молекулярно-генетических исследований наследственности и изменчивости?

Глава 12. ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНИ. КОНЦЕПЦИИ ЭВОЛЮЦИОННОЙ БИОЛОГИИ

12.1. Основные положения клеточной теории, методы изучения состава клетки

Онтогенетический уровень живого представлен отдельными организмами (особями). Клетки как элементарные структуры действуют как самостоятельные организмы (бактерии, простейшие), а так же, как клетки многоклеточных организмов. Особенность клеточного подуровня в том, что именно с него и начинается жизнь.

Клетка

Клетка — элементарная живая система и основная форма организации живой материи: она усваивает пищу, способна существовать и расти, может разделиться на две, каждая из которых содержит генетический материал, идентичный исходной клетке. Клетка — это один из основных структурных, функциональных и воспроизводящих элементов живого. Между клетками растений и животных нет принципиальной разницы по строению и функциям, некоторые отличия лишь в строении мембран и некоторых органелл. За 3 млрд лет существования на Земле живое вещество развилось до нескольких миллионов видов, но все они — от бактерий до высших животных — состоят из клеток. Специфичность клеточного подуровня заключается в специализации клеток. В человеческом организме до 10^{15} клеток. Половые клетки служат для размножения, соматические (от греч. *soma* — тело) имеют разное строение и функции (нервные, мышечные, костные). Клетки отличаются своими размерами, формой, количеством поглощенного красителя. Среди живого есть одно- и многоклеточные организмы. Вирусы — неклеточные организмы, они размножаются в чужих клетках. Некоторые водоросли потеряли свое клеточное строение. На клеточном уровне происходит разграничение и упорядочение процессов жизнедеятельности во времени и пространстве, что связано с приуроченностью функций к различным субклеточным структурам.

Об открытии клеточного строения живого вещества сообщил в 1665 г. Р. Гук в книге «Микрография, или некоторые физиологические описания мельчайших тел посредством увеличительных стекол» (тогда же он впервые употребил термин «клетка»). Гук, впервые применивший микроскоп для исследования живой ткани, увидел только клеточные стенки, отличающиеся размерами и толщиной. В конце XVII в. А. Левенгук при 200-кратном увеличении наблюдал «зародыши» и различные одноклеточные организмы, в том числе бактерии.

465

Клеточная теория, или цитология (от греч. *kytos*... — сосуд, клетка),

Клеточная теория, или цитология (от греч. *kytos*... — сосуд, клетка), сложилась в течение XIX в., когда появились более совершенные микроскопы (в последнее время ее чаще называют биологией клетки). Английский ботаник Р. Броун открыл *ядро* (1833), описав его как характерное тельце растительных клеток. Его открытие послужило толчком к другим открытиям. У клеток выделяют два уровня организации — *прокариоты*, не имеющие оформленного ядра, и *эукариоты*, у которых оно есть. Обобщил наблюдения Броуна и установил клеточную природу растительной ткани немецкий ботаник М. Шлейден. Вместе со своим другом Т. Шванном он впервые сформулировал основные положения о клеточном строении всех организмов и образовании клеток (1839). Чешский естествоиспытатель Я. Пуркине, открывший ядро яйцеклетки (1825) и проводивший исследования по физиологии зрительного восприятия, ввел понятие *протоплазмы* для клеточного содержимого (1839), когда понял, что именно оно, а не стенки клетки, является живым веществом. Позже *протоплазму* клетки стали разделять на *цитоплазму* и *ядро*.

«Все клетки образуются в результате деления других клеток» — дополнил немецкий патолог и антрополог Р. Вирхов (1855) клеточную теорию Шлейдена и Шванна. Он считал, что любой организм есть совокупность живых клеток, организованных наподобие небольшого государства. И каждая клетка ведет самостоятельную жизнь. Установили, что хранение и передача наследственных признаков осуществляются с помощью клеточного ядра (Вирхов, Геккель). При большем увеличении микроскопов в клетках открыли постоянные специализированные структуры (органойды, или органеллы) — *пластиды* (такие, как хлоропласты, характерные для клеток, способных к фотосинтезу) и *митохондрии*. В 1898 г. итальянский гистолог К. Гольджи изобрел новый метод изучения клеток через микроскоп, вводя в них соли серебра, и обнаружил в нервных клетках совы и кошки сетчатые структуры, позднее названные аппаратом Гольджи.

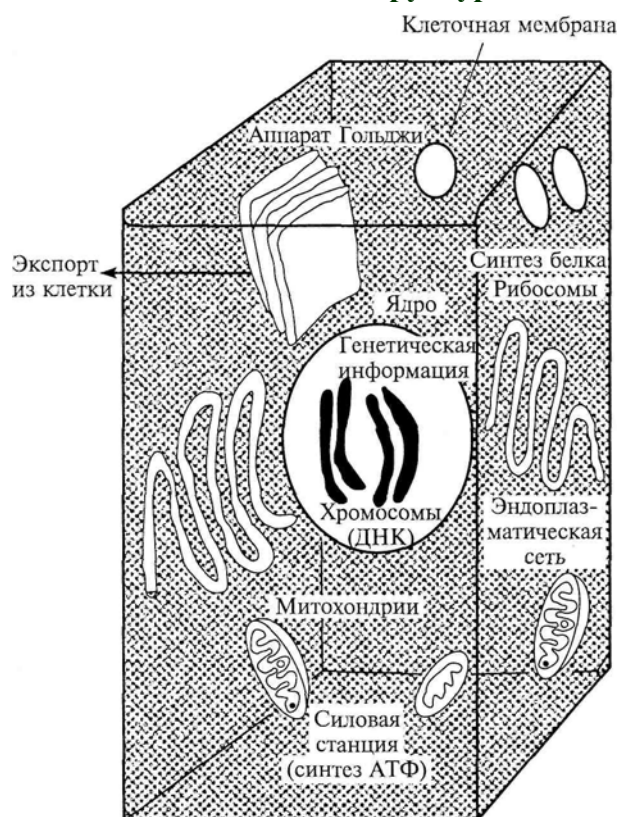
Основа клеточной теории: клетка — основная структурная единица теории и единица развития живых организмов; ядро — основная составляющая клетки; клетки размножаются только делением; всем клеткам присуще мембранное строение; клеточное строение — свидетельство единого происхождения растительного и животного мира (рис. 12.1).

Процесс митозного деления клетки и особенности поведения хромосом были описаны в 1873 г.

(И.Д.Чистяков, Э.Страсбургер). Затем установили, что первичное ядро зародышевой клетки образуется путем слияния сперматозоидов и яйцеклетки (О.Гервинг, Г. Фоль), что существует закон постоянства хромосом для каждого вида (Т. Бовери, Э. Страсбургер). В 1880 г. Флеминг описал хромосомы и последовательность событий при митозе, а через 10 лет были

466

Рис. 12.1. Схема деятельности основных структурных компонентов клетки



выяснены и более сложные явления, происходящие в ядре при мейозе. В начале XX в. многие биологи повторили опыты австрийского естествоиспытателя И.Менделя, открывшего еще в 1865 г. существование индивидуальных наследственных факторов (генов). Все это способствовало развитию цитогенетики. Современная клеточная теория исходит из единства расчлененности многоклеточного организма на клетки и его целостности, основанной на взаимодействии клеток. В цитоплазме различают **цитоплимфу**, включения и органеллы. **Цитоплимфа** — жидкая часть цитоплазмы, содержащая растворенные продукты жизнедеятельности клеток, а **включения** — нерастворимые структуры (капли жира, зерна крахмала, глыбки гликогена). **Органеллы** подразделяют на мембранные (наружная плазматическая мембрана — НПМ, эндоплазматическая сеть — ЭПС, аппарат Гольджи — АГ, лизосомы, митохондрии, пластиды) и немембранные (рибосомы, клеточный центр, жгутики и реснички, цитоскелет). От окружающей среды клетка

отделена плазматической мембраной, которая регулирует обмен между внутренней и внешней средой и служит границей клетки. В каждой клетке содержатся генетический материал в форме ДНК, регулирующий жизнедеятельность и самовоспроизведение, и цитоплазма.

Размеры клеток

Размеры клеток измеряют в микрометрах (мкм) и нанометрах (нм). Например, соматическая животная клетка средних размеров имеет 10 — 20 мкм в диаметре, растительная — 30 — 50 мкм; длина хлоропласта цветкового растения 5 — 10, бактерии — 2 мкм.

Для изучения клеточного строения световые микроскопы не годятся, так как их разрешающая способность ограничена длиной световой волны — чем меньше длина волны, тем выше разрешающая способность. Даже фиолетовой линии соответствует разрешение 200 нм, что недостаточно для изучения клеточных структур. Более высокое разрешение было достигнуто в 30-е гг. с помощью электронного микроскопа. С развитием методов исследования стало понятно, что клетка — это самовоспроизводящаяся химическая система, поэтому она должна поддерживать баланс с окружением, поглощать те вещества, которые требуются ей в качестве «сырья», и выводить наружу накапливающиеся «отходы», т.е. обеспечивать гомеостаз.

Электронный микроскоп устроен почти как световой, но роль пучка света в нем играют электроны. Пучок электронов обладает волновыми свойствами, а длина волны электронов короче, чем у света. Вместо обычных линз используют электромагнитные, направляющие пучок электронов, который вылетает из электронной пушки. На фотопластинке получается изображение предмета. Но срезы вещества должны быть достаточно

тонкими, чтобы сквозь них могли проходить электроны, и, чтобы электроны не захватывались молекулами воздуха, нужно обеспечить условия почти полного вакуума. Это весьма сложно, и в 50-е гг. электронный микроскоп трансмиссионного типа заменили сканирующим. Электроны в нем отражаются от поверхности объекта, и изображение получается в обратном направлении. Разрешение несколько хуже, но требования к вакууму снижены, и можно проводить прижизненные исследования некоторых организмов. Фотографии имеют очень хорошее качество с самыми мелкими деталями поверхности.

Получаемую с помощью электронного микроскопа структуру стали называть *ультраструктурой*.

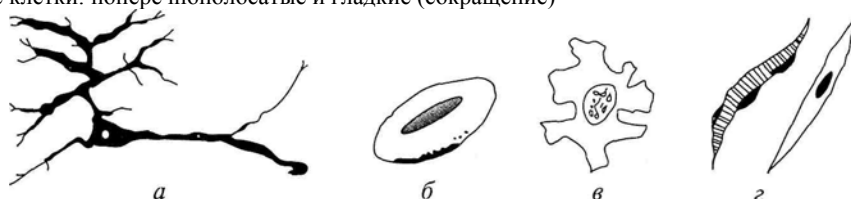
Химический состав клеток весьма сложен, так как каждая клетка выполняет свою функцию в организме. Специализация достигается за счет усиленного развития тех или иных свойств, присущих почти всем типам клеток (рис. 12.2). Кроме воды (около 70 %) в ней содержатся белки, нуклеиновые кислоты, ионы минеральных солей, углеводы, жироподобные вещества — липиды и другие вещества с меньшей молекулярной массой, которые являются строительным материалом для биополимеров.

Все *соматические клетки* живых организмов специализированы: клетки костной ткани образуют скелет, клетки крови отве-

468

Рис. 12.2. Специализация различных клеток:

а — нейрон (передача информации); *б* — клетки крови: эритроциты (перенос O_2 и CO_2); *в* — клетки крови: лейкоциты (защитная функция); *г* — мышечные клетки: поперечнополосатые и гладкие (сокращение)



чают за иммунитет и разносят кислород, нервные — проводят электрические импульсы и т.д. *Эмбриональные стволовые клетки* «хранят» информацию обо всем организме и «знают», как ею воспользоваться, чтобы размножиться в миллиард клеток растущего живого организма. Эти клетки еще не «включили» механизмы, запускающие специализацию, их геном не начал даже и программу размножения и формирования многоклеточного организма; такая клетка может стать одной из 150 видов зародышевых клеток, а пока она способна только переносить мРНК в следующее клеточное поколение. Из эмбриональных стволовых клеток формируются островки в различных тканях и органах, поэтому все органы построены из специализированных клеток с вкраплениями эмбриональных стволовых. При хранении зародыша в холодильнике при $T = +4^\circ C$ за 4 — 5 ч все клетки погибнут, кроме эмбриональных стволовых.

В разных организмах число клеток существенно отличается, и по числу клеток все живые организмы делят на царства: бактерии, грибы, растения и животные. Самые древние ископаемые организмы — это одиночные клетки, значит, и эволюция жизни сопровождалась усложнением структуры и числа клеток.

Одноклеточные организмы, имеющие самое простое строение и под микроскопом похожие на точки, называются *монерами* (от греч. *moneres* — *простой*), или бактериями. Внешне они похожи на сферы, спирали и палочки. Разнообразие химического состава позволяет им существовать в разных условиях, самим синтезировать пищу из двуокиси углерода и энергии, получаемой из разных химических реакций или света. Некоторые бактерии используют пищу, вырабатываемую другими организмами, обитая в живых организмах или трупах, способствуя их разложению на более простые компоненты и возвращению их в круговорот веществ в природе. Бактерии могут и оберегать нас от инфекций. Некоторые из них используются в качестве консервантов, на бактериальном брожении основаны процессы квашения капусты, приготовления маринадов, простокваши, кефира, уксуса и пр. Многие бактерии воспринимаются живыми организмами как яды, поскольку они вырабатывают соответствующие

469

токсины (например, ботулизм). Быстрая эволюция бактерий обусловлена их быстрым размножением.

Одноклеточные организмы с более сложной структурой относят к царству *водорослей*, или *протистов*. При рассмотрении планктонных организмов под микроскопом можно выделить зеленые или желтые тельца — хлоропласты, осуществляющие фотосинтез. Среди водорослей есть и простейшие многоклеточные организмы. У диатомовых водорослей каждая отдельная особь окружена клеточной оболочкой, пропитанной кремнеземом — веществом, из которого состоят песок и стекло. Большие пласты диатомей расположены у земной поверхности и используются как абразивный материал. Другие простейшие многоклеточные — динофлагеллаты — имеют жгутики на оболочке, которые проталкивают их через воду. Среди них есть виды, испускающие свет, или люминесцирующие. Некоторые вырабатывают смертельный яд для человека — нейротоксин. Ими питаются моллюски, поэтому при увеличении численности этих проститов (они содержат красный пигмент, и прилив приобретает красный оттенок) опасно употреблять моллюски в пищу.

Есть виды, которые накапливают азот, калий и иод, поэтому обладают большой пищевой ценностью для животных. Многие водоросли покрыты студенистым веществом, позволяющим им сохранять влагу, если они

находятся в зоне отлива. Из него получают агар, служащий основой питательных сред для выращивания бактерий и грибов. Альгинат, выделяемый из бурых водорослей, используют для предотвращения образования кристалликов льда при изготовлении мороженого.

В докембрийских отложениях обнаружены останки многоклеточных. Клетка с этого времени стала воспроизводить не только свою структуру, но и организацию многоклеточного организма. Возник *онтогенез* — индивидуальное развитие многоклеточной особи, и степень его совершенства стала определять верность воспроизведения клеточной организации. В процессе эволюции животные становились крупнее, их организмы усложнялись и клетки все более специализировались. Уже у водорослей клетки специализируются: одни отвечают за фотосинтез, другие — за размножение и т.д.

К **многоклеточным организмам надцарства эукариотов** относят растения, грибы и животных. Биологи классифицируют живые организмы в связи с их эволюционным родством, поэтому считается, что многоклеточные имели своими предками простаты, а те произошли от **монер**. Но эти три многоклеточных царства произошли от разных проститов.

Вирусы в 50 раз меньше бактерий (20 — 300 нм). Они обладают генетическим материалом (ДНК или РНК), т.е. их структура способна воспроизводить себя, но лишь в чужой клетке. Проникнув в нее, вирусы как бы отключают хозяйскую ДНК и заставляют ее производить только вирусы. Русский ботаник и микробиолог Д. И. Ивановский выделил инфекционный экстракт из растений табака, пораженных мозаичной болезнью (1892). Когда экстракт пропусти-

470

ли через фильтр, инфекционные свойства остались в отфильтрованной жидкости. Нидерландский микробиолог М. Бейеринк ввел в 1898 г. в научный оборот термин «вирус» (от лат. *virus* — яд), чтобы подчеркнуть их инфекционную природу. Впоследствии выяснили, что вирусы по химической природе являются нуклеопротеинами, но размеры этих частиц (меньше половины длины световой волны) не позволяли исследовать их в световом микроскопе. Многие не считают вирусы живыми. Существуют вирусы, нападающие на бактерии, — *бактериофаги*. Считают, что вирусы произошли от нуклеиновой кислоты, потерявшей способность воспроизводить себя вне клетки-хозяина и приобретшей паразитический «образ жизни».

Вирусы герпеса или гриппа имеют специальную защитную оболочку, образованную из мембраны клетки-хозяина. Оболочки вирусов часто построены из повторяющихся субъединиц, способных кристаллизоваться и образующих высокосимметричные структуры. Эти вирусы поражают лимфоидную ткань и вызывают у человека различные ОРЗ. Вирус табачной мозаики, с которого началось изучение вирусов, содержит РНК и 2130 белковых субъединиц, которые вместе с РНК образуют структуру со спиральной симметрией.

Многоклеточная организация не только повышает эффективность поглощения света фотосинтезирующими бактериями, но дает и другие преимущества. Каждая группа многоклеточных организмов (растений, животных и грибов) имеет свой план строения, приспособленный к своему образу жизни, а у каждого вида в процессе эволюции сложилась определенная разновидность этого достаточно гибкого плана. Классификация Линнея основывалась на сходстве строения. Когда поняли, что все организмы связаны с какими-то древними формами жизни, появилась классификация на основе эволюционного родства — эволюционная теория. Поскольку внешнее сходство свидетельствовало о наличии родственных связей, обе классификации оказались похожими. Сейчас существуют разные комиссии по классификации животных, растений и бактерий.

Наличие слаженной системности в клетке (ядро, рибосомы, митохондрии и др.) отражает системность и на уровне многоклеточных организмов. Это — совокупность сосудистой, дыхательной, нервной, пищеварительной систем. По концепции русского физиолога П.К.Анохина, эта функциональная системность, когда функционирование одних частей или систем невозможно без содействия других, обеспечивает целостность каждой системы, когда процессы на низших уровнях организации определяются функциональными связями на высших уровнях. Вся история развития живого организма, физиологии животных и человека подтверждает наличие функциональной системности на онтогенетическом уровне.

Тканевый подуровень представлен тканями, объединяющими клетки определенного строения, размеров, расположения и сход-

471

ных функций. На этом уровне происходит специализация клеток. Ткань образуют клетки одного типа. Ткани возникли вместе с многоклеточностью в филогенезе. У многоклеточных они образуются в онтогенезе как следствие дифференциации клеток. У животных несколько типов тканей: костная, образующая скелет, мышечная, из которой состоит сердце, или **эпителий** (от греч. *epi* — на, над, сверх + *thele* — **сосок**), покрывающий тот или иной орган и выполняющий защитную, выделительную и всасывающую функции (например, кожа). У растений различают меристематическую, защитную, основную и проводящую ткани.

Органный подуровень представлен органами организмов. Все функции осуществляются различными органами. Каждый орган состоит из многих тканей, каждая ткань образуется особыми клетками. При большом увеличении в клетках можно обнаружить органеллы, выполняющие свой набор функций. В ядре хранится генетическая информация; в **секреторных** (от лат. *secretio* — **отделение**) гранулах запасаются вещества, которые впоследствии выделяются из клетки. Наружная мембрана контролирует поступление веществ внутрь

клетки и выход из нее. Органелла выполняет свою функцию через серию сопряженных химических реакций, каждая из которых катализируется **ферментом** (от лат. *fermentum* — закваска). Органелльная организация клетки играет важную роль в ее функционировании, иначе упорядоченная активность клетки была бы невозможна.

Организменный подуровень представлен самими организмами. На этом уровне происходят декодирование и реализация генетической информации, создание структурных и функциональных особенностей, свойственных организму данного вида.

Популяционный подуровень отражает надорганизменную систему, обладающую определенным генофондом и определенным местом обитания. В популяциях начинаются эволюционные преобразования и выработка адаптивной формы.

Видовой подуровень определяется видами животных, растений и микроорганизмов. В составе одного вида может быть много популяций, поскольку представители вида могут иметь много мест обитания и занимать разные экологические ниши. Вид является единицей классификации живых существ и продуктом эволюции. Одни виды могут сменять другие.

12.2. Строение и функции основных органелл клетки

Ядро — основная часть клетки. В ядре различают ядрышко, кариоплазму и хроматин.

Ядро расположено в центре клетки, окружено ядерной мембраной и содержит ДНК. Под электронным микроскопом ядро беспорядочно зернисто, а в одной его части зернистость резко возра-

472

стает, образуя **ядрышко** (иногда их несколько) — скопление рибосомальных белков и частей рибосом (рРНК), в основе которого лежит участок хромосомы, определяющий ее структуру и несущий ген. В растительных и животных клетках ДНК присутствует в виде структур размером около 1 мкм — **хромосом** (от греч. *chroma* — цвет, краска), число которых постоянно для каждого вида. Хромосомы — это самостоятельные ядерные структуры, состоящие из двух продольных нитевидных половинок — **сестринских хроматид** (по внешнему виду их разделяют на равноплечие, неравноплечие и палочковидные). Клеточное ядро окрашено ядерными красителями почти равномерно, в микроскоп видна только его зернистость. Основные красители связываются нуклеиновыми кислотами. **Кариоплазма** — жидкая фаза ядра, в которой находятся растворенные продукты жизнедеятельности.

Ядру, содержащему хромосомы (с ДНК), принадлежит ведущая роль в явлениях наследственности (см. гл. 11).

Цитоплазма — это живая часть клетки, помимо ее ядра. Снаружи она окружена клеточной мембраной, а внутри — ядерной. Пространство между ядром и внутренней поверхностью плазматической мембраны заполнено нитями клеточного матрикса, который определяет форму клетки и принимает участие в функциях, связанных с движением (деление клетки и ее перемещение, внутриклеточный транспорт везикул и органелл). Кроме того, матрикс обеспечивает структурную основу метаболизма, определяя пространственное размещение молекулярных компонентов клетки, занятых в процессе жизнедеятельности. В ее состав входят рабочие части клетки: рибосомы, эндоплазматическая сеть (ЭПС), пластиды, лизосомы и пр. Среди клеточных органелл особую роль играют хлоропласты клеток зеленых растений и митохондрии любых организмов. В хлоропластах происходит связывание энергии солнечного света в процессе фотосинтеза. В митохондриях же извлекается энергия, заключенная в химических связях поступающих в клетку питательных веществ.

Митохондрии (от греч. *mitos* — нить + *chondrion* — зернышко, крупинка) — энергостанции клеток — наблюдали в световой микроскоп как самые крупные клеточные органеллы. Они входят в состав любой клетки, по строению похожи на клетки прокариот, имеют округлую форму, а при соединении нескольких рядом могут выглядеть как нити длиной менее 1 мкм. Внутри митохондрий находятся окислительные ферменты, РНК, ДНК и рибосомы, отличающиеся от цитоплазматических. В их мембраны встроены ферменты, участвующие в процессах преобразования энергии пищевых веществ в энергию АТФ, необходимую для жизнедеятельности (см. гл. 11). В клетках растений имеются пластиды (хлоропласты, хромопласты и лейкопласты), которые тоже имеют двухмембранное строение, как и митохондрии.

473

Хлоропласты (от греч. *chloros* — зеленый + *plastos* — вылепленный, образованный) — особые органеллы в растительных клетках. Пигмент, окрашивающий их в зеленый цвет и поглощающий энергию солнечного света, назван **хлорофиллом** (от греч. *...phyllon* — лист). При его участии хлоропласты синтезируют из воды и двуокси углерода **глюкозу** — основное органическое вещество, которым питается все живое. Без процесса фотосинтеза вряд ли была бы возможна жизнь. С помощью электронного микроскопа установлено, что хлоропласт окружен двойной мембранной оболочкой, как и митохондрии. В ней заключено основное вещество — **строма** (от греч. *stroma* — подстилка), заполненная множеством пластинчатых структур — **ламелл**, которые расположены парами, на концах слипаются и окружают каждую цистерну, в хлоропластах сильно утолщены. В строме видны и крупные белые гранулы — крахмальные зерна; значит, здесь продукт фотосинтеза — глюкоза — сразу же переводится в нерастворимый крахмал. Выяснение связи структуры хлоропластов с их функциями важно для осуществления реакции фотосинтеза «в

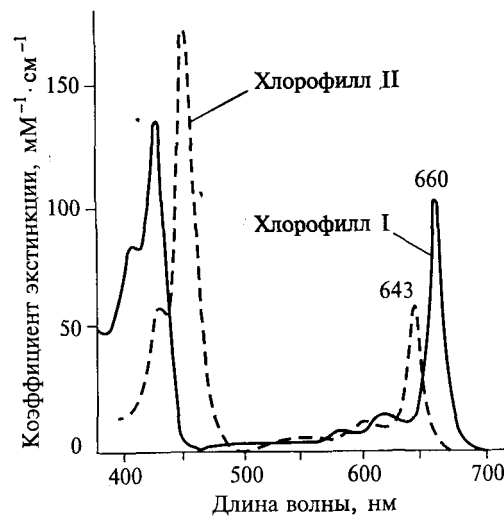
1 — за пределами атмосферы; 2 — по модели «абсолютно черного излучения»; 3 — сглаживающая спектр-функция; структурная химическая формула (б) и спектр поглощения (в) хлорофилла



На рис. 12.3, а, б, в

Реснички и жгутики относят к органоидам движения. Они представляют собой выросты мембран размером около 0,25 мкм, внутри которых находятся тоненькие трубочки. Такие органоиды есть у многих





в

475

клеток — простейших, одноклеточных водорослей, сперматозоидов, в клетках дыхательного эпителия.

Эндоплазматическая сеть (ЭПС) — это сеть каналов в цитоплазме всех клеток, составляющая до 30—50 % объема клетки. По ЭПС синтезированные вещества транспортируются в аппарат Гольджи; сеть делит клетку на отсеки и даже участвует в синтезе белков. Гранулярная ЭПС состоит из мембранных мешочков, покрытых рибосомами, на них синтезируются белки, которые потом поступают внутрь каналов, где приобретают третичную структуру. На мембранах гладкой сети синтезируются липиды и углеводы, поступающие затем тоже внутрь каналов.

Аппарат Гольджи (АГ) — система полостей, каналов, пузырьков, образованная гладкими мембранами. Эта органелла, обнаруженная во всех эукариотических клетках, состоит из множества хорошо уложенных мешочков, которые содержат олигосахариды — длинные цепи из простых Сахаров. Стопки АГ обладают прецизионной внутренней структурой из трех отделов, специализирующихся на разных типах модификации белков. Белок, проходя через них, химически модифицируется в соответствии со своим предназначением, белки сортируются и отправляются по нужному адресу.

АГ наиболее ярко выражен в железистых тканях, поэтому посчитали, что он связан с железами внутренней секреции. В пузырьках накапливаются вещества, которые синтезируются и транспортируются по сети. В АГ эти вещества подвергаются химическим превращениям, потом упаковываются в мембранные пузырьки и выбрасываются из клеток в виде секретов. В структуре АГ образуются *лизосомы*. В железистых клетках неподалеку от *диктосом*, на которые может распадаться структура АГ, особенно много митохондрий. Если заблокировать клеточное дыхание, пузырьки Гольджи не отделяются от диктосом, и прекращается образование клейкой слизи, выделяемой раньше и состоящей из углеводов. Низкомолекулярный сахар полимеризуется в макромолекулы и выделяется. Диктосомы участвуют в сборке полисахаридов. Так, в них у мяты образуются эфирные масла, т.е. синтез материала клеточной оболочки — одна из основных функций диктосом.

Изучение диктосом позволило проследить за процессом выделения клетки. При соприкосновении со своей элементарной мембраной пузырька Гольджи диктосомы как бы сливаются друг с другом, и в месте соприкосновения образуется «ямка». Пузырек, похожий на шарообразный кувшин, повисает на плазмолеме, а содержимое «кувшина» как бы выдавливается из него. Так выводится содержимое бывшего пузырька Гольджи из клетки. Чтобы избежать хаоса биохимических процессов, каждый из множества новообразованных белков должен быть определенным образом модифицирован, отсортирован и с большой точностью доставлен в соответствующий отдел. Перемещения макромолекул в клетке связаны с АГ.

Вакуоли — пространства, заполненные клеточным соком. В них часто растворены вещества, образующиеся в клетках как

476

своего рода отходы обмена веществ, так как растения не имеют специальной выделительной системы, как животные и человек. Получить их фотографии трудно, потому что на границе между густой цитоплазмой и жидким содержимым вакуоли при фиксации возникает разрыв.

Выше перечислялись и как-то связывались с составом и строением компонентов клетки их основные функциональные особенности. Конечно, частично они перекрываются, но синтез белка, транспортирование, дыхание, фотосинтез, наследственность не исчерпывают всех процессов жизнедеятельности клетки. Во всех клетках можно выделить большое число разных пузырьков, гранул, пластинок, нитевидных структур и т.п., которые все время меняются и по внешнему виду, и по составу — лизосомы, фрагмосомы и т.д. Поскольку перечисленные выше функции относятся, скорее, к процессам синтеза, то разумно предположить, что для равновесия клетки должны быть подвержены и процессу распада. Реакции разложения катализируются многими ферментами, их деятельность строго контролируется, чтобы они не мешали синтезу.

12.3. Функции клеточных мембран. Работа «ионного насоса»

Клеткам присуще мембранное строение — это одно из положений клеточной теории. Среди мембранных органоидов — наружная цитоплазматическая мембрана (НЦМ), эндоплазматическая сеть (ЭПС), аппарат Гольджи (АГ), лизосомы (Л), митохондрии (М), пластиды (П). В основе всех этих органелл лежит биологическая мембрана, все они имеют единый план строения. Мембранные структуры — арена важнейших жизненных процессов.

Биологическая мембрана (клеточная или плазматическая) — пленка, покрывающая клетку, и настолько тонкая, что ее удалось обнаружить лишь с помощью трансмиссионного электронного микроскопа. Все мембраны построены по одному плану, всегда слоистые. Поперечный разрез показывает, что по обе стороны внутренней, более светлой линии расположены более темные. Мембраны были открыты более века назад, но их роль в механизмах жизнедеятельности клеток до недавнего времени сводили в основном к барьерной функции. Опыты показали, что малые молекулы быстрее усваиваются живой клеткой, чем большие, и вещества, растворимые в воде и нерастворимые в жирах, проникают в клетку медленнее, чем растворимые в жирах. Значит, мембраны содержат жироподобные вещества — липиды и белки, способные связывать воду.

Липиды в мембранах содержат фосфорную кислоту, потому их называют *фосфатидами*. Пример — лецитин. Капля такого ли-

477

пида мгновенно растекается по водной поверхности, и пленка образует мономолекулярный слой. Они обладают водоотталкивающими, или **гидрофобными** (от греч. *phobos* — страх, боязнь), свойствами. Фосфорная кислота растворима в воде, или **гидрофильна** (от греч. *philia* — любовь). Она как бы притягивает воду, а водоотталкивающие остатки жирных кислот, расположенные на другом конце молекулы, как бы избегают ее. Так как гидрофобные концы липидных молекул не могут сближаться ни с клеточной оболочкой, ни с протопластом, они обращены друг к другу «головами». Так образуется *бимолекулярный слой*, у которого наружу выставлены гидрофильные части. Дополнительные гидрофильные белки в мембране повышают устойчивость описанного выше липидного бимолекулярного слоя.

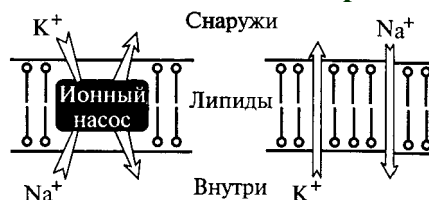
Структуру мембран — внутри «масло» (двойная липидная пленка), снаружи «хлеб» (белковая оболочка) — называют *сэндвич-структурой*. Такую структуру химики могут получать искусственно.

Мембрана — двумерно ориентированный раствор разных белковых молекул и белковых кластеров из нескольких сотен молекул в *вязком слое*. Белковые молекулы в большинстве своем свернуты в клубки (глобулы) и асимметричны. Их выступающие из мембраны части обладают электрическими зарядами, причем на внешней поверхности суммарный заряд оказывается отрицательным. Молекула фосфолипидов сильно асимметрична. Одна ее часть несет электрические заряды, образуя «полярную» головку, другая — электронейтральный углеводородный «хвост». В водной среде полярные головки выступают из воды, а углеводородные хвосты, из-за гидрофильных и гидрофобных взаимодействий погружаются. Так как все белки участвуют в диффузном движении, их распределение по мембране в каждый момент случайно. Коэффициент диффузии белковых молекул по мембране порядка $5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$, а для гемоглобина в водном растворе — на три порядка больше. Значит, вязкость мембранной фазы на три порядка больше, чем у воды. Некоторые белки способны только к поступательному перемещению, другие могут вращаться в плоскости мембраны, есть и такие, которые перемещаются с одной стороны мембраны на другую. Последние участвуют в транспортировании веществ через мембрану.

Ионный перенос — проявление мембранной возбудимости. Через мембрану осуществляется обмен с внешней средой — питание и выделение отходов. Несмотря на хаотические движения, молекулы стремятся переместиться в сторону меньшего давления (перемещение по градиенту давления, или концентрации, называют *диффузией*). Мембрана обеспечивает стабильность химического содержимого клетки и, обладая избирательной способностью, регулирует обмен с окружающей средой. Вещества, растворимые в липидах, проходят через мембрану, не растворяясь в ней. Пере-

478

Рис. 12.4. Схема работы ионного насоса через клеточные мембраны



мещение ионов и органических мономеров типа аминокислот и глюкозы происходит много быстрее, чем этого можно было бы ожидать от полярных молекул. Имеет место и перемещение против градиента концентрации — так называемый активный транспорт, требующий затрат энергии. Наиболее изучен такой активный транспорт: процесс откачки ионов натрия из клетки и накачки в нее ионов калия, в котором «Na—K — насос» использует энергию АТФ (рис. 12.4). Этим путем откачиваются ионы натрия из клетки и

накачиваются ионы калия против градиента концентрации.

Специальные белковые молекулы в мембране переносят различные вещества. Так, с их помощью клетки печени, эритроциты и мышечные клетки быстро поглощают глюкозу. В настоящее время *выявлены ПЯТЬ молекулярных форм переносчика глюкозы, причем* каждая из них приспособлена к нуждам той ткани, в которой она содержится. Посредством такой облегченной диффузии вещества могут выводиться из клеток. Через мембрану осуществляется и пассивный транспорт. Таков осмос — прохождение воды через полупроницаемую мембрану. Могут через нее путем диффузии проникать вещества, растворимые в липидах (жирные кислоты и эфиры), и некоторые ионы.

Клеточная мембрана, помимо барьерной функции, обеспечивает обмен между цитоплазмой и внешней средой, из которой в клетку поступают вода, ионы, различные молекулы, а выводятся продукты обмена веществ и синтезированные в клетке вещества. Транспортные функции не ограничиваются маленькими молекулами. Благодаря *фагоцитозу*, открытому и описанному И. И. Мечниковым (1882), в клетку могут проникать и крупные молекулы биополимеров. Твердая частица, оказавшаяся вблизи клетки, окружается выростами мембраны и затягивается внутрь. Процесс фагоцитоза свойствен простейшим, лейкоцитам, клеткам капилляров костного мозга, печени, надпочечников, селезенки. Существует и еще один вид активного транспорта — *пиноцитоз*. Таким путем происходит поглощение клеткой жидкости в виде мелких капель с растворенными в них высокомолекулярными веществами. Капли захватываются выростами мембраны, погружаются в цитоплазму и усваиваются. Это явление свойственно животным клеткам.

Регулируя обмен между клеткой и окружением, мембраны обладают рецепторами, воспринимающими внешние сигналы (свет, движение бактерий к источнику пищи, ответы на гормоны). Безусловно, важно, что на них происходит превращение энер-

479

гии. Так, на внутренних мембранах хлоропластов происходит фотосинтез, а на внутренних мембранах митохондрий — окислительное фосфорилирование. Компоненты мембран движутся и перестраиваются, поскольку созданы из белков и липидов, что определяет одно из важнейших свойств живого — *раздражимость*.

Роль мембран стала вырисовываться иначе после того, как английские ученые химик Д. Кроуфут-Ходжкин и физиолог А. Хаксли сформулировали теорию проведения нервного импульса (1952), а Е.Сюзерленд открыл (1972) существование на возбудимой мембране переносчика информации внутрь клетки (молекулы цАМФ — циклического аденозинмонофосфата). Этот вопрос еще недостаточно изучен и является предметом особого интереса, так как через познание механизма функционирования возбудимых мембран лежит путь к диагностике и лечению многих болезней.

Возбудимость — реакция клетки на воздействие, происходящая с многократным усилением по энергии. Возбудимость — общее свойство клеток, не только сердечных, мышечных или нервных. Состояние мембраны отражает состояние клетки в целом. Возбудимыми называют мембраны, окружающие клетку и способные менять свою проницаемость для ионов при различных химических и физических воздействиях. Функционирование таких мембран обеспечивает не только внутриклеточную регуляцию, но и управление и синхронизацию работы соседних клеток и даже органов с помощью химических и электрических каналов связи, которые составляют основу гормональной и нервной регуляции. Основные компоненты этих систем находятся в мембранах.

12.4. Процессы фотосинтеза и клеточного дыхания

От **фотосинтеза**, который делает энергию и углерод доступными для живых организмов и обеспечивает выделение кислорода в атмосферу, зависит все живое на Земле. Менее 1 % солнечной энергии, падающей на Землю, поглощается растениями. Они связывают углекислый газ атмосферы (и воду) в количестве около $150 \cdot 10^{12}$ кг сухого органического топлива в год, или порядка 1 кг сухого вещества с 1 м^2 за год. Часть этого органического вещества поглощается травоядными животными, которыми, в свою очередь, питаются другие животные и человек. Растительные и животные остатки разлагаются бактериями и грибами до уровня исходных неорганических веществ. Затем этот круговорот замыкается: энергия солнечного излучения, поглощенная растениями, переходит в теплоту и излучается Землей в космическое пространство. И жизнь на Земле есть процесс поглощения солнечного света. Человечество зависит от фотосинтеза и потому, что оно использует ископаемое энергетическое топливо, образовавшееся за

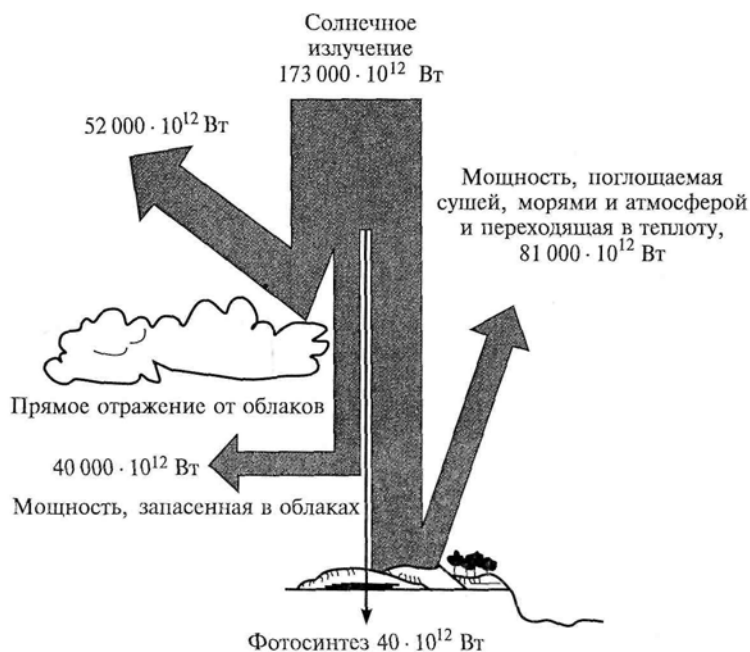
480

миллионы лет. Годовая фиксация углерода в процессе фотосинтеза оценивается в $75 \cdot 10^{12}$ кг. Из общего количества солнечной радиации, падающей на Землю, до поверхности доходит примерно 50 %, а из нее только 25 % лучей имеют длины волн, подходящие для фотосинтеза, 1 % энергии доходит до растений, а 0,4 % используется ими для увеличения своей биомассы (рис. 12.5).

Автотрофные («самопитающиеся») организмы осуществляют фотосинтез, не питаясь другими организмами. Такие есть среди бактерий, источник энергии для них — химические реакции. Но запасы химической энергии на Земле ничтожны по сравнению с энергией, поступающей от Солнца.

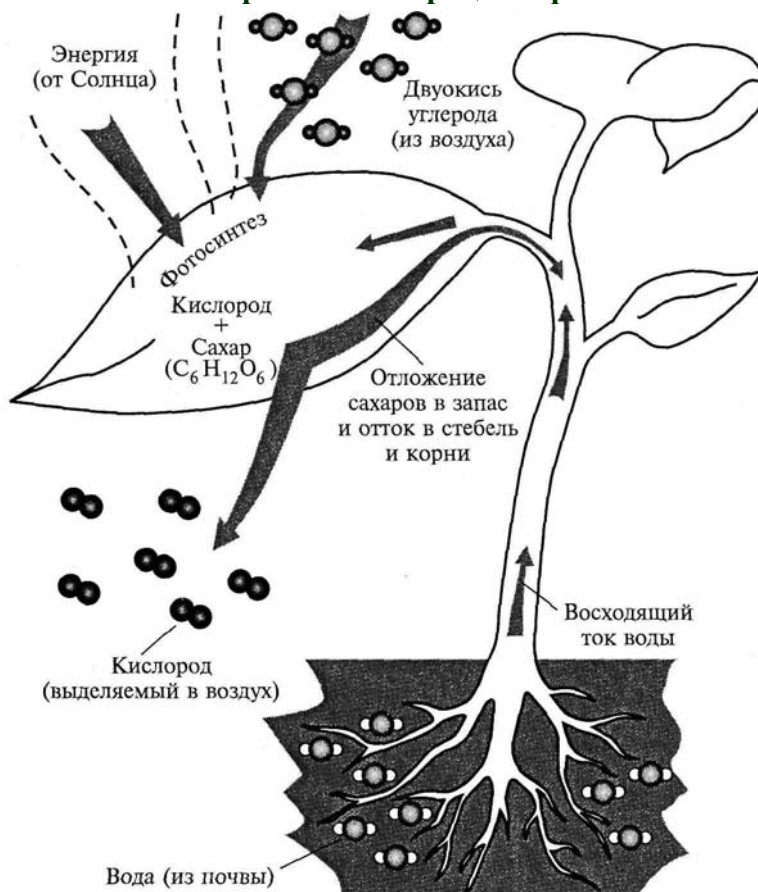
В конце XVIII в. считали, что растения получают питательные вещества из воды, находящейся в почве. Голландский естествоиспытатель Ян ван Гельмонт первым проделал опыт по изучению процесса питания растений. Он посадил дерево ивы массой 2,3 кг в кадку с землей массой 90,8 кг, поливал его и лишь через пять лет обнаружил, что масса почвы почти не изменилась, а дерево выросло и стало весить 76,9 кг. Английский химик Дж. Пристли, открывший кислород (1774) и получивший хлористый водород и аммиак, обнаружил, что растения и животные по-разному меняют состав окружающего их воздуха. Помещая в закрытый сосуд горящую свечу и мышшь, он отметил, что свеча гасла, а мышшь из-

Рис. 12.5. Распределение мощности солнечного излучения, падающего на Землю



481

Рис. 12.6. Роль растений в процессе фотосинтеза



дышала. Но, когда он помещал в сосуд живое растение, свеча после этого какое-то время горела, хотя сосуд был по-прежнему закрыт. Так Пристли установил, что «в растениях присутствует что-то способное

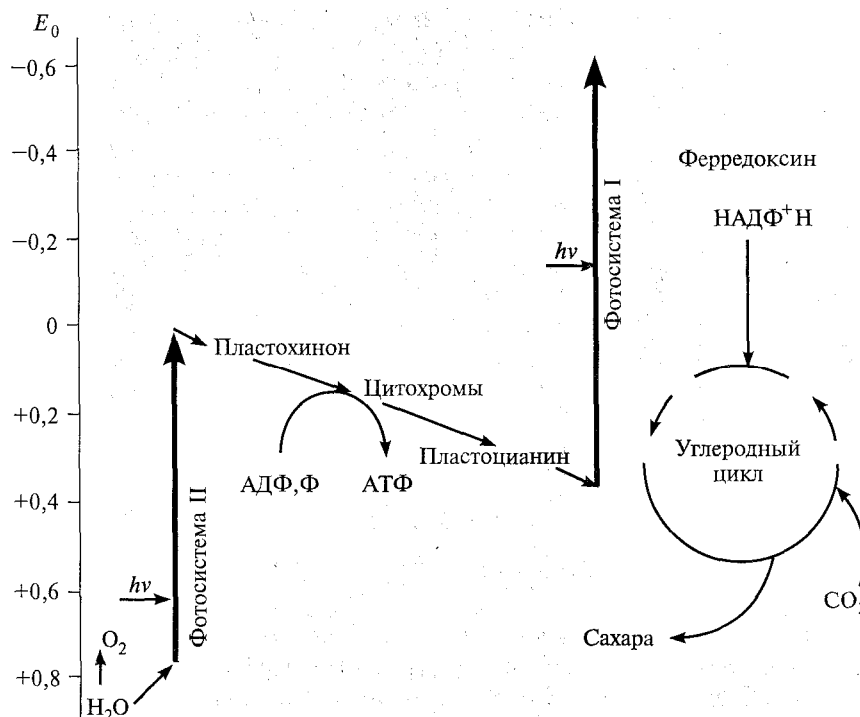
исправлять воздух, испорченный горением свечи». В 1782 г. Ж. Сенебье сумел показать, что растения поглощают CO_2 и одновременно выделяют O_2 .

К началу XIX в. было выяснено, что растения могут выделять кислород только на свету, отсюда и название — **фотосинтез** (рис. 12.6). Австрийский врач Я. Ингенхауз написал первое уравнение процесса, не зная еще, какие растительные ткани образуются. При использовании микроскопа нашли, что крахмальные зерна при фотосинтезе растут. Отсюда предположение, что при фотосинтезе возникают углеводы, имеющие своим источником CO_2 .

Исходные соединения для фотосинтеза — неорганические вещества: вода и двуокись углерода. Они энергетически бедны, но

482

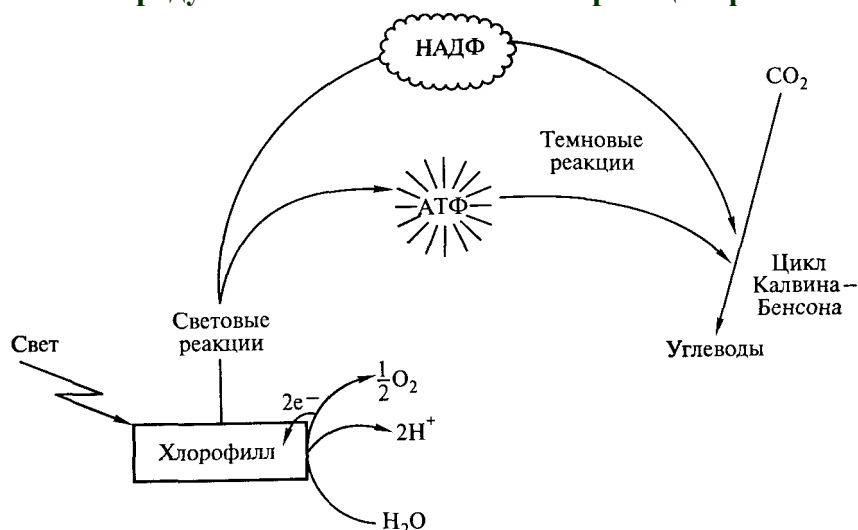
Рис. 12.7. Механизмы фотосинтеза растений: цепь переноса электрона с образованием АТФ и НАДФ⁺Н и углеродный цикл



из них строятся более сложные богатые энергией питательные вещества. В качестве побочного продукта фотосинтеза выделяется молекулярный кислород. Процесс фотосинтеза обычно представляют уравнением: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$.

Реакция идет за счет энергии света и хлорофилла, и получаются молекулы кислорода и сахара (рис. 12.7). В 1941 г. с помощью масс-спектрометра методом изотопов было установлено, что источником кислорода служит вода. (Обычно кислород имеет массовое число 16, но есть и стабильный изотоп с массовым числом 18.) Оказалось, что на первой стадии фотосинтеза водород получается путем расщепления воды. Энергию для этого растения берут у света (реакция **фотолиза**), выделяя кислород как ненужный побочный продукт. Во второй стадии водород соединяется с двуокисью углерода и образуется углевод. Присоединение водорода — один из примеров реакции восстановления. Для первой стадии характерны световые реакции, для второй свет не нужен; хотя они тоже происходят на свету (рис. 12.8), их называют темновыми.

483

Рис. 12.8. Продукты световых и темновых реакций фотосинтеза

В конце 50-х гг. выяснили, что каждая из стадий реакций фотосинтеза происходит в разных частях листа: первая — в мембранах хлоропластов, вторая — в их строме. Арион показал (1958), что первая стадия во многом аналогична дыханию, при котором происходят фосфорилирование АДФ с затратами энергии, перенос электронов в мембранах и преобразование световой энергии в химическую. Дыхание у растений — процесс окисления углеводов с освобождением энергии, необходимой для жизнедеятельности, он происходит в митохондриях. У аэробных организмов поглощается O_2 и выделяется CO_2 . Выделенная энергия идет на синтез АТФ. Поэтому процессы дыхания у растений и фотосинтез — две стороны обмена веществ: диссимиляции и ассимиляции.

Немецкий ученый Т. Энгельман в конце XIX в. показал, что зеленый пигмент хлоропластов — хлорофилл — важен в процессе фотосинтеза. Экспериментируя с водорослью спирогирой, он определил области спектра света, в которых выделение кислорода идет наиболее эффективно. Ими оказались красные и синие области, поглощаемые именно хлорофиллом, обеспечивая ему зеленый цвет. Другие пигменты хлоропластов (они имеют желтую или бурую окраску, наблюдаемую у листьев осенью, когда хлорофилл разрушается и уже не маскирует цвет листа) играют вспомогательную роль в этом процессе, перенося энергию. Английский ученый Дж. Стоукс установил, что зеленый растительный пигмент состоит из смеси различных веществ (1864). Русский физиолог и биохимик М. С. Цвет исследовал их с помощью изобретенного им метода хроматографии. Немецкий химик и биохимик

484

Р. Вильштеттер разработал методы извлечения растительных экстрактов без повреждения молекул и детально исследовал хлорофилл, обратив внимание на аналогию с гемоглобином крови. Его работы по изучению структуры хлорофилла продолжил химик-органик Х. Фишер.

Синтезировать молекулу хлорофилла удалось только в 1960 г. А. Калояну, Г. Колеру и Р. Вудворду. Все эти исследования с хлорофиллом важны для консервации зеленых кормов, в которых потери питательных веществ обычно составляют более 50 %. При определенной дозировке серной и соляной кислот, прекращающих процессы окисления в растительной массе, удалось обеспечить почти полное сохранение витаминов и белков. Выдающуюся роль в решении этих проблем сыграл финский биохимик А. Виртанен, создавший метод консервирования зеленых кормов.

Фотосинтетические пигменты и молекулы, встроенные в мембраны тиколаида хлоропласта (см. рис. 12.3), образуют цепь переноса электронов. Мембраны окружены стромой — основным веществом хлоропласта, которое содержит хлоропластную ДНК, рибосомы и ферменты, участвующие в фиксации углерода. Снаружи стромы окружены двойной мембраной, отделяющей хлоропласт от цитоплазмы клетки. Пигмент хлорофилл уникален: при поглощении солнечной энергии один из электронов отрывается от своей молекулы, а затем передается по электронтранспортной цепи от одного переносчика к другому. Эти электроны замещаются путем разложения воды и разделения ее водородных атомов на ионы водорода и электроны. При этом для получения одной молекулы кислорода должны разложиться две молекулы воды, и останется четыре протона внутри тиколаида. Почти весь кислород в земной атмосфере возник именно таким образом.

Электроны, пройдя по электронтранспортной цепи, присоединяются к молекуле-переносчику, которой служит НАДФ $^+$, переходящий в восстановленную форму НАДФ ^+H . Этот процесс происходит на наружной поверхности мембран. Ионы водорода, пройдя по каналам в мембране на наружную сторону, приобретают энергию за счет электрохимического потенциала для синтеза АТФ. Последние используются в серии реакций, которые «фиксируют» CO_2 в форме углеводов. Сначала CO_2 присоединяется к органической молекуле — пятиуглеродному сахару, переводя ее в нестабильную шестиуглеродную форму. Она очень быстро распадается на две трехуглеродные молекулы, которые принимают по фосфатной группе от АТФ; эти группы

присоединяются высокоэнергичной связью, обогащая энергией всю молекулу. После передачи энергии молекуле связи рвутся, и каждая молекула присоединяет по одному атому водорода от НАДФ⁺H. В то же время происходит перенос четырех протонов с наружной стороны мембраны во внутреннюю. Одновременно протекает несколько таких однотипных реакций, и они идут по циклам.

Знаменитые опыты с *хлореллой* в 1946 г. провел американский биохимик М. Калвин. Он помещал зеленые водоросли в специальный сосуд и освещал их, одновременно пропуская CO₂ через воду,

485

меченую изотопом C-14. При освещении изотоп включался в цепь фотосинтеза. При изменении времени облучения (от 1 до 30 с) последовательно прослеживались разные этапы фотосинтеза. Калвин показал, что двуокись углерода фиксируется в форме фосfogлицериновой кислоты. Это было открытие — углерод просто подключался к одному из известных звеньев цепи углеводного обмена. Так было доказано, что углерод входит в состав глюкозы и других сложных Сахаров. В последующем Калвин продолжал работы по применению открывшейся ему тайны фотосинтеза в повышении урожайности и развитию «зеленой энергетики».

Водоросли, составляющие огромную группу растений, являются фотосинтезирующими организмами, выделяющими кислород. Они эволюционировали в водной среде и освоили ее. Считают, что из синезеленых водорослей произошли все хлоропласты растений. На долю океана приходится 50 % мировой первичной продукции в виде фиксированного углерода, и ее образуют водоросли, хотя фотосинтез происходит только в поверхностных слоях, куда проникает солнечный свет и где лимитирующим фактором является доступность биогенных элементов, особенно азота и фосфора. С водорослей начинаются почти все пищевые цепи (планктон, рыбы). Благодаря фотосинтезу поддерживается уровень кислорода в атмосфере, 50 % которого поставляют водоросли. Найдены ископаемые остатки синезеленых водорослей, живших 3 млрд лет назад, а первые организмы, освоившие сушу, возникли лишь 420 млн лет назад. Вероятно, при переходе на сушу главной проблемой было обезвоживание — нужно было выработать приспособления для добывания и запасаания воды. Для фотосинтеза и дыхания нужно, чтобы обмен двуокиси углерода и кислорода происходил не с окружающим раствором, а с атмосферой. Проблематично было и размножение растений без воды и питания. На суше фотосинтез происходит над поверхностью земли на свету, а минеральные соли и вода находятся в земле, поэтому часть растения должна быть в темноте под землей, а часть — в воздухе. Кроме того, водная среда обеспечивает постоянство условий внешней среды, а воздух более подвержен изменениям таких параметров, как температура, интенсивность освещения, концентрация ионов в среде и кислотность pH.

В настоящее время выявлены молекулярные механизмы одного из типов фотосинтеза у бактерий. Спектроскописты определили последовательность и временные параметры световых реакций фотосинтеза и скорости взаимодействий. Пикосекундная абсорбционная спектроскопия позволила разрешить временные интервалы до триллионной доли секунды. Интенсивности двух лазерных лучей, проходящих через исследуемую кювету, были столь малы, что не нарушали процессов фотосинтеза, короткая вспышка только инициировала фотосинтез почти одновременно во всех частях исследуемой области. Световой луч контролировал изменение состава образца.

Удалось проследить путь электрона от одной мембраны до другой вследствие поглощения фотона. Специалисты по рентгено-

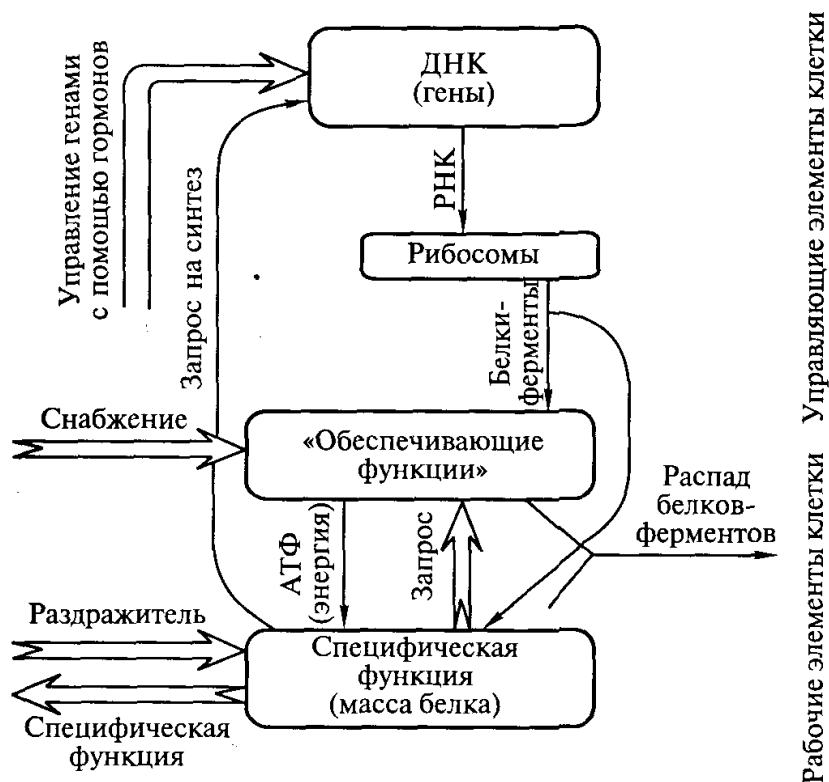
486

структурному анализу расшифровали пространственную структуру области, где происходят световые реакции, и выяснили взаимное расположение в ней различных молекул. Молекулярные генетики установили локализацию и организацию генов, кодирующих основные компоненты в этой области, так что теперь можно манипулировать этими генами. Д. Юван сумел так изменить их, что получил бактерии, отличающиеся от обычных. Это открывает новые возможности генной инженерии и позволяет досконально понять процессы. Особенностью фотосинтеза этих бактерий было отсутствие выделения кислорода в отличие от зеленых растений, но в фотосинтезе принимают участие те же молекулы хлорофилла. Интерес к этим бактериям связан с тем, что они получают необходимую энергию разными способами, а не только от света.

Хемосинтез — процесс синтеза органических веществ из неорганических за счет энергии химических реакций, протекающих при окислении неорганических веществ. Хемотрофы — бактерии нитрификаторы, серобактерии, железобактерии и пр. — в качестве источника водорода используют не воду, а H₂ или H₂S, поэтому они кислород не выделяют. И за счет только процесса хемосинтеза аэробные организмы жить не смогли бы.

На клеточном уровне организации действуют управляющие ее работой механизмы (рис. 12.9).

Рис. 12.9. Схема управляющих механизмов клетки



487

12.5. Формирование идей эволюции в биологии

Развитие во времени — неотъемлемое и характерное свойство живой природы. Идеи единства и развития природы можно проследить с древнейших времен. Проблемы происхождения и эволюции жизни на Земле были в центре философских и религиозных систем. Так, Г.Лейбниц, развивая идеи Аристотеля, провозгласил принцип градации и предсказал существование переходных форм между растениями и животными. В России эти идеи активно поддерживал А. Н. Радищев. В дальнейшем этот принцип был развит в представлении о «лестнице существ» от минералов до человека и Бога, доказывая трансформизм живой природы. Так выявлялась не эволюция, а общность и сходство форм и усложнения организмов. Но сопоставлялись время существования Земли и время формирования форм живого на ней. Бюффон обосновывал в своей «Естественной истории» историю Земли и доказывал единство происхождения живого планом строения. Другой энциклопедист, Д.Дидро, считал, что разнообразие органического мира объясняют мелкие изменения живых существ и длительность существования Земли. У Мопертьюи были догадки о корпускулярной природе наследственности, эволюционной роли вымирания неприспособленных форм и роли изоляции в возникновении новых форм. Кант в «Космогонии» говорил о развитии живого мира в течение миллионов лет.

К.Линней считал, что близкие виды внутри рода могли развиваться естественным образом без участия высших сил. Эволюционные представления были характерны для К.Вольфа, М.В.Ломоносова и А. Н. Радищева. Ломоносов считал изменения в неживой природе причиной изменений мира живого, по останкам вымерших форм судил об условиях существования их в далекие времена. Он писал, что время, необходимое для создания организмов, больше, чем определяется церковным исчислением. Но эти идеи формировали пока только представление о последовательности природных тел. Ограниченную трансформацию видов допускал Ж. Бюффон, считая, что разные типы животных имеют разное происхождение и возникли в разное время. Эта концепция обобщала многие наблюдения и факты, выделяла идею глубокой взаимосвязи между видами, подвидами, родами и другими таксонами, подготавливая почву для эволюционизма. Так, до конца XVIII в. господствовала мысль о «целесообразности порядков в природе» (сотворении кошек для пожирания мышей и т.п.). Постепенно возникал вопрос о возникновении такой целесообразности. Общество не могло еще воспринять идеи эволюции, так как обсуждались не доступные для проверки масштабы времен.

Идею эволюции живого перевел на уровень теории эволюции Ж. -Б.Ламарк. Он считал, что Бог сотворил материю и движение, а далее развитие происходило по естественным причинам. Опираясь на многочисленные факты изменчивости видов, Ламарк в книге «Философия зоологии» (1809) выдвинул гипотезу о меха-

488

низме эволюции, основанном на двух предпосылках: *наследование приобретенных признаков* и *упражнение или неупражнение* частей организма. Он представил эволюционное обоснование «лестницы существ», основанное на принципах градации (внутреннего стремления к совершенству) и изначальной целесообразности реакции организма на изменения внешней среды (признание возможности прямого приспособления). Далее Ламарк формулировал два закона: 1 — изменение привычек следует сразу за

изменением условий и 2 — эти изменения передаются по наследству. Основа эволюции — врожденная способность к самосовершенствованию, фактор явно нематериальный: «творить может только Бог, тогда как природа может только производить», а изменения во внешней среде могут изменить формы поведения, поэтому органы или структуры способны приобрести новые функции, а эти новые функции органов и изменения в них могут быть переданы потомкам. Так вытянулась шея у жирафа, увеличились перепонки у водоплавающих, развивается мускулатура при занятиях спортом. Эта часть учения Ламарка отвергалась, как противоречащая появляющимся новым знаниям о механизме наследования, для нее еще не пришло время. Большую роль в возникновении новых видов Ламарк отводил переменам климата и гидрогеологического режима. Политические страсти внутри биологии скомпрометировали важность идей типа «наследуется все благоприобретенное» (она получила название «ламаркизм»). Как подчеркивал К.А.Тимирязев, Ламарк не сумел объяснить целесообразность организмов. Но «роль Ламарка в биологии колоссальна», — отметил современный генетик Л. Н. Серавин (1994).

Предшественником идей Дарвина в России был зоолог К. Ф. Рулье, развивавший идеи возникновения органического мира из неорганического. Он выделял наследственность и изменчивость в качестве основных свойств организмов, говорил и о постепенном изменении организмов — под влиянием внешних условий.

Учение катастрофизма отражало идеи развития природы, сформировавшейся к началу XIX в. Французский зоолог Ж. Кювье выделял четыре типа животных — позвоночные, мягкотелые, членистые и лучистые. И с каждым из них он сопоставлял некий «план композиции», некую «творящую силу», которая после очередной катастрофы в геологической истории обеспечивает восхождение органических форм. Тем самым геологическую эволюцию планеты Кювье связывал с эволюцией живого, признавая роль катастроф и неравномерности темпов преобразований в природе, что не потеряло своего значения и поныне. Ему возражал У.Смит, один из основоположников биостратиграфии, отмечавший непрерывность распространения сходных видов в близких по возрасту слоях.

Концепцию униформизма сформировали противники теории катастроф. Дж. Геттон, Ч.Лайель, М. В.Ломоносов критиковали идеи

489

Кювье за неопределенность причин катастроф, за укорачивание возраста Земли. Под впечатлением успехов классической механики они считали мир познаваемым и предлагали опираться на преемственность настоящего и прошлого, выделяя непрерывность действия законов и факторов в истории Земли и возможность обратимости явлений (см. гл. 9). При эволюции живого Лайель допускал возможность актов творения, демонстрируя прогрессивные изменения ископаемых останков. Униформисты считали, что вымирание несовместимо с естественным образованием новых видов, и потому предполагали участие творца. Фактически они свели историю планеты к цикличности и случайным изменениям.

Униформизм, как и лamarкизм и катастрофизм, предвещал теорию естественного отбора, частично конкретизировал идею эволюции. Английский экономист Т.Мальтус привлек внимание к репродуктивному потенциалу человека и указал на экспоненциальный рост численности населения. В 1788 г. он опубликовал «Трактат о народонаселении», в котором убедительно и ярко обрисовал, к чему может привести ничем не сдерживаемый рост населения. Благодаря Дарвину выражение Мальтуса «борьба за существование» приобрело широкую известность. Они оба считали ее результатом несоответствия между быстрым ростом популяций и ограниченностью пищевых ресурсов. Идеи Мальтуса и Лайеля оказали большое влияние на Ч.Дарвина. Он верил в познаваемость законов природы, в возможности объяснения наблюдений. Дарвин считал проблему происхождения человека связанной с эволюцией неорганического и органического мира. К середине XIX в. в разных областях биологии был накоплен огромный фактический материал, который нуждался в обобщении. Да и практика сельского хозяйства требовала теории, которая бы открыла пути селекции.

Понятие «эволюция» в биологию было введено швейцарским ученым Ш. Бонне (1762). Он понимал под этим термином не только саму идею развития, но и отмечал изменчивость и некий отбор в становлении форм живого. Ламарк объяснял изменчивость влиянием наследственности и внешних факторов — питанием, климатом, упражнением органов. Дарвин создал в 1859 г. теорию эволюции, обобщив отдельные эволюционные идеи и разрешив накопившиеся противоречия. У него эволюция определяется триадой: *наследственность, изменчивость и естественный отбор*.

Остовом теории эволюции путем естественного отбора послужил огромный материал, собранный и до Дарвина, и им самим.

Ч.Дарвин, в юности собирающийся стать пастором, интересовался зоологией как любитель. Он предпринял пятилетнее морское путешествие на корабле «Бигль», во время которого занимался геологическими исследованиями, собирал ботанические, зоологические и палеонтологические коллекции. Кульминацией, с точки зрения формирования его эволюционных взглядов, явилось исследование флоры и фауны Галапагосских островов, где он увидел в действии процесс эволюции при сравнении близких видов вьюрков, ящериц, черепах, о чем и написал в своей первой книге (1839). По прибытии в Англию он проанализировал

490

историю селекции и выявил отличия между породами и сортами. Здесь он усмотрел творческое начало в деятельности селекционеров, позволяющее накопить изменения в результате отбора.

Дарвин собрал обширный материал об изменчивости организмов и видов и отметил почти всегда постоянную численность популяций. Способность к размножению, свойственная всему живому, обеспечивает сохранение вида. Численность популяций на Земле контролируется различными факторами среды (пространство, свет, пища, тепло). Исследуя и сопоставляя огромный материал и находясь под впечатлением идеи Мальтуса, Дарвин начал понимать, что при интенсивной конкуренции между членами популяции любые

изменения, благоприятные для выживания в данных условиях, повышают способность особи к размножению и оставлению плодовитого потомства. Но каждый вид производит больше особей, чем выживает их до взрослого состояния, а среднее число взрослых особей почти постоянно. Ненужные формы при этом отбрасываются путем нового механизма — естественного отбора. Черновой вариант своей теории он сделал в 1842 г.

Понятиям **изменчивость** и **наследственность**, которые Ламарк связывал с приспособляемостью, передаваемой по наследству и являющейся основой видообразования, Дарвин придал принципиальное значение. Определенная изменчивость — это способность всех особей определенного вида одинаковым образом реагировать на изменения среды, при этом изменения в организмах не наследуются (сейчас это — *адаптивная модификация*). Неопределенная изменчивость приводит к существенным изменениям в организме, которые наследуются с усилением в следующих поколениях (*мутация*, по современной терминологии). Она тоже связана с условиями окружающей среды, но не непосредственно. Дарвин считал, что именно такая изменчивость играет ведущую роль в эволюции.

Естественный отбор — механизм эволюции, материал для него — наследственная изменчивость. В нем Дарвин соединил многие биологические знания, в том числе опыт практической селекции.

А.Уоллес, один из основоположников зоогеографии, много путешествовавший по Южной Америке и Юго-Восточной Азии, тоже читал Мальтуса и пришел к идеям, близким к теории Дарвина. Уоллес и Дарвин выступили с сообщениями о роли естественного отбора в эволюции на заседании Линнеевского общества. В 1859 г. Дарвин опубликовал свою книгу «Происхождение видов путем естественного отбора», она разошлась в первый же день, и, говорят, по своему воздействию на человеческое мышление уступала только Библии. Эти идеи вызвали бурные дискуссии в обществе и церкви. Уоллес отрицал приложимость отбора к

491

«возникновению человеческих способностей», а Э.Геккель, страстный сторонник Дарвина, назвавший его «Ньютоном органического мира», прилагал идею естественного отбора к развитию общества. Ботаник А.Н.Бекетов в работе «Гармония в природе» (1858) привел обширные материалы об изменении растений в разных условиях и выделил их борьбу за существование. Русский князь, географ и геолог П.А.Кропоткин, известный как теоретик анархизма, много путешествующий по Сибири, наблюдал перемещения больших масс животных, спасающихся от стихийных бедствий. На основе этого он выделил в качестве факторов эволюции *взаимопомощь и кооперацию*.

Так пришли к представлению о том, что органический мир представляет некое единство, имеет свою историю, а его нынешнее состояние есть результат предшествующего. Заслуга Дарвина в том, что из сопоставления фактов борьбы за существование и всеобщей изменчивости свойств и признаков он вывел неизбежность избирательного уничтожения одних особей и размножения других — естественного отбора. Начинаясь с наблюдения, познание жизни продолжалось на уровне мыслительных процессов. В классической биологии эксперимент еще не был методом познания живого. Механистический детерминизм игнорировал функциональное единство живых систем, а телеологический подход основывался на целесообразности организмов. С теории эволюции Дарвина, в основе которой лежал рациональный подход, началось преодоление идеалистической тенденции в биологии.

Учение Дарвина (наследственность, изменчивость и естественный отбор) за несколько лет вытеснило все антиэволюционные и креационистские концепции. При этом сопоставляли данные палеонтологии, сравнительной анатомии и эмбриологии (**метод Геккеля**). Данные палеонтологии доказывали существование эволюции живого. Это показал еще В. О. Ковалевский на примере развития вида лошадей, обнаружив существование предка с пятипалой конечностью, жившего 60 млн лет назад. Последовательные ряды ископаемых животных он выстроил в ряд для наглядности эволюционных изменений. (Такие ряды называют *филогенетическими*.) До конца XIX в. эволюционные идеи овладевали умами, строились филогенетические древа для всех крупных групп растений и животных. Существуют и *эмбриологические* доказательства эволюции. **Закон Геккеля — Мюллера** утверждает, что каждая особь в своем индивидуальном развитии (**онтогенезе**) повторяет историю развития своего вида (**филогенез**). К доказательствам относят и наличие рудиментальных органов, и явления атавизма. Существуют и *биогеографические* доказательства: сравнение животного и растительного мира разных континентов показывает, что различия внутри вида тем больше, чем дольше длилась их изоляция. Биоразнообразие — неизбежный результат отбора.

492

В результате изучения эволюции групп (*макроэволюции*) сформировался так называемый классический дарвинизм: установлена необратимость эволюции, принцип мультифункциональности органов и эволюции органов путем смены функции, биогенетический закон и др. Но многие ученые не приняли дарвинизм, и это неприятие и критика особенно усилились в период возникновения генетики. Можно даже сказать, что распространение эволюционных идей сопровождалось в это время острой критикой теории естественного отбора. Отсутствие обнаружения переходных форм препятствовало принятию дарвиновских идей, а с появлением генетики естественный отбор все больше подвергался критике. Так, Ф.Дженкин показывал, что при скрещивании произойдет «растворение признаков», которые были единично поддержаны отбором. Основу такой критики составило отсутствие строгих доказательств наследственной изменчивости, которые

давала генетика (теория мутаций, учение о чистых линиях и принцип корпускулярной наследственности). В.Л.Иоганнсен показал неэффективность отбора в чистых линиях (в потомстве одной самооплодотворяющейся особи). Г. де Фриз в 1889 г. выдвинул *мутационную гипотезу* о скачкообразном возникновении новых видов путем крупных изменений наследственности (мутации) без ведущего участия естественного отбора.

12.6. Понятие о неodarвинизме и синтетической теории эволюции

Постепенно стал складываться синтез генетики и классического дарвинизма. Уточнялась терминология. После опытов Вейсмана и появления мутационной гипотезы де Фриза были вскрыты закономерности распределения хромосом при клеточном делении.

Хромосомная теория наследственности, сформулированная А.Вейсманом, выдвинула принцип невозможности передачи по наследству «благоприобретенных» признаков. Отрезанные хвосты у мышей во многих поколениях даже не укорачивались. Приобретенные признаки не влияли на половые клетки, передающие признаки следующим поколениям, роль среды фактически сводилась к сортированию возникающих независимо от нее наследственных изменений. Требовалось уточнение понятия изменчивости. Т. Морган установил, что признаки, гены которых «сцеплены» в одной хромосоме, наследуются совместно. Поэтому и третий закон Менделя выполнялся не всегда. После обнаружения у дрозофилы групп *сцепления генов* по числу имеющихся хромосом эта теория оформилась (Т. Г. Морган, А. Стёртевант и др.). В 1950 г. была найдена тонкая структура гена (С. Бензер), понят язык, на котором была записана генетическая информация. Эти генети-

493

ческие механизмы наследственности существенны и для понимания изменчивости как основы отбора.

Изменчивость — способность живых организмов приобретать новые признаки и свойства, отражающая взаимодействие организма с внешней средой. Различают *наследственную* (генотипическую, или мутационную) *изменчивость* и *ненаследственную* (модификационную) *изменчивость* (вместо неопределенной и определенной изменчивости у Дарвина соответственно). Первая связана с мутациями, возникает из-за изменения структуры гена или хромосом и служит единственным источником генетического разнообразия внутри вида. Причиной мутаций могут быть внешние жесткие излучения, химические причины и прочие мутагены (например, вирусы). Большая часть мутаций рецессивна и не проявляется у гетерозигот. Рекомбинации при половом размножении также порождают множественные мутации, которые приводят к *комбинативной изменчивости*, создающей материал для естественного отбора. Но новых видов при этом не образуется. При изменении внешних условий некоторые ранее вредные рецессивные мутации могут оказаться полезными, и их носители могут получить преимущество при естественном отборе. Мутации — фактор случайный, подчиняющийся статистическим законам. Поэтому они, как и перестройки генов, и волны численности популяции, не могут быть решающим фактором эволюции.

Модификационная изменчивость — это сходные изменения признаков у всех особей потомства популяции какого-то вида в сходных условиях существования. Она не затрагивает гены и не передается по наследству. Модификационные изменения адаптационны, т. е. делают популяцию лучше приспособленной к изменению условий. Они могут происходить лишь в пределах генотипа и не выходят за пределы нормы данного признака и для эволюции не существенны. Благодаря изучению генетических процессов в популяции эволюционная теория интенсивно развивалась.

Генные мутации — главная причина возникновения новых наследственных свойств. Они и есть основные предпосылки эволюции, постоянно действующий источник наследственной изменчивости. Мутация может быть рецессивной, доминантной и полудоминантной в зависимости от состояния гена, в котором она произошла. Гены мутируют с определенной частотой, и природные популяции насыщены самыми разнообразными мутациями из-за одновременных мутаций многих генов.

Рецессивные мутации могут накапливаться в генофондах популяций, составляя резерв наследственной изменчивости. Классические работы Четверикова связали закономерности отбора в популяциях с динамикой процесса эволюции. На нескольких видах мушек дрозофил он показал, что в каждой популяции есть большое количество разных рецессивных мутантных генов. Эти гены

494

не выявляются в признаках организма, так как подавлены нормальными доминантными аллелями, но могут проявиться в случае, когда встретятся и оставят потомство две особи с одним и тем же рецессивным мутантным геном. Так колебания частоты генов в популяциях связаны с внешними условиями среды.

Этот закон Четверикова был многократно проверен и на других объектах, породив мнение, что наличие таких рецессивных мутантных генов является предпосылкой эволюции. Но важно, чтобы эти особи не имели дефектов, мешающих нормальной работе организма, и обладали какими-то преимуществами перед другими. Так, при близкородственном скрещивании (инбридинг) потомство оказывается гомозиготным не только по этому мутантному гену, но и по большим отрезкам хромосом, что не способствует эволюции.

Основную роль должны играть *доминантные мутации*, считает Гершенсон, а рецессивные — могут

изредка поддерживаться отбором, хотя у дрозофил численность рецессивных мутантных генов велика, но частота каждого мала (порядка сотых долей процента). Такой случайный спектр рецессивных мутаций свидетельствует о ненаправленном характере мутационного процесса в популяции. Доминантные же мутации почти все принадлежат к очень ограниченному числу типов и вызывают лишь несколько определенных небольших изменений в структуре жилок крыльев, числе и расположении щетинок. В популяциях их доля около 15 %, сохраняющаяся из года в год. Отсюда и предположение о действии естественного отбора, обеспечивающего и сохранность типов.

Мутации как бы нащупывают экологические условия, способствующие выживанию и размножению особей с данной мутацией. Одновременно идет отбор генотипов, в которых она наиболее благоприятна. Важно ее влияние и на норму реакции организма. Так, мутантный признак закрепляется в наиболее подходящих местах, где мутанты становятся постоянной частью природной популяции. Затем на стадии сосуществования мутантов с немутантами происходит приспособление популяции к более эффективному использованию среды обитания. При этом эволюционная пластичность популяции высока и позволяет быстро перестроиться при стойких изменениях среды. Появившаяся мутация может повысить *адаптивные свойства организма*, тогда можно говорить о третьем этапе, о появлении *нового экотипа*. И если какой-нибудь из этих экотипов окажется в изоляции от других популяций вида, то начнет образовываться новая разновидность, способная стать и новым видом. Эта схема сильно упрощена, не учтено множество факторов, могущих повлиять на процесс, в том числе и недавно открытых, — перемещения гена в пределах генома, умножение числа какого-то гена в геноме и т. п. В контексте геологических времен видообразование — процесс почти мгновенный,

495

интервал от позднего докембрия до современности, равный примерно 700 млн лет, за который сложилась современная жизнь, безусловно, мал для развития ее без скачков.

Принцип Харди — Вайнберга — без внешних давлений частоты генов в популяции постоянны (1908) — служил первым существенным шагом к объединению дарвинизма и генетики. Этот закон означает, что накопленные изменения в генофонде не исчезают бесследно. Исходя из него и учитывая влияние отбора и возникновение новых мутаций, С.С.Четвериков показал, что из-за постоянных мутаций во всех популяциях создается существенная наследственная гетерогенность, что отбору подвергаются не отдельные особи и виды, а *генотип популяции*. С работы С.С.Четверикова «О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики» (1926) наступил период синтеза представлений. Мутации — основа эволюции, они перерабатываются естественным отбором. Исследования конца 20-х гг. XX в. показали, что большую роль в эволюции играет не только появление новых мутаций, но и изменение частоты встречаемости существующих аллелей (гена) из-за случайных процессов — *колебания численности популяций* и пр. (Р.А. Фишер, Н. П.Дубинин, Д.Д. Ромашов, С.Райт и др.). При резком снижении численности популяций (в связи с ростом близкородственных скрещиваний) снижается наследственная изменчивость. По Райту — это «дрейф генов», а по Дубинину — «генетико-автоматический процесс». Другим проявлением «волн жизни» является изменение концентрации различных мутаций и уменьшение разнообразия генотипов популяции. Они могут привести к изменениям направленности и интенсивности действия отбора.

Генетика позволила проследить протекание эволюционного процесса от появления первого признака в популяции до возникновения нового вида. При исследованиях на микроэволюционном (внутривидовом) уровне применялись точные экспериментальные методы. И пришли к элементарной единице эволюции — популяции, элементарном эволюционном материале и явлении. Учение о микроэволюции сформулировали Ф.Г.Добрянский и Н.В.Тимофеев-Ресовский (1939). Современная теория не только добавила к дарвиновской «триаде» новые факторы эволюции, но и основные факторы переосмыслила иначе. Сейчас к ведущим факторам эволюции относят мутации, популяционные волны численности и изоляцию. Возникла и глобальная цель — управление процессом эволюции.

Учение о развитии биогеоценозов и биосферы как новое направление эволюционной биологии стало развиваться с 20-х гг. XX в. благодаря трудам выдающихся ученых В. И. Вернадского, В. Н. Сукачева и А.Тенсли. Закономерности эволюции экосистем разрабатываются и сейчас (см. гл. 14).

496

Популяция генетически обособлена от других популяций того же вида и обладает общим генофондом, что обеспечивает генотипическое сходство входящих в нее особей. Из-за малой продолжительности жизни отдельной особи по сравнению с временами эволюции ее генотип на эволюции не скажется. Возникшие наследственные изменения особи в силу свободного скрещивания могут распространиться в популяции, создавая генетическую неоднородность особей и условия для отбора. Популяция — часть вида, т. е. входящие в нее особи принадлежат к одному виду (генетически замкнутой системы, представители которой не могут скрещиваться и давать плодовитое потомство с представителями других видов). Поэтому возникшая мутация не выйдет за пределы вида, и реальные эволюционные сдвиги можно обнаружить лишь в популяциях. Значит, популяция — элементарная биологическая единица, в которой возникают эволюционные процессы.

Синтетическая теория эволюции появилась в 30 — 40-е гг. XX в., объединив разные учения на основе дарвинизма, данных генетики и экологии. В ней популяцию признают в качестве основной единицы эволюции и выделяют два типа эволюции — на микро- и макроуровнях.

Микроэволюцию составили несколько разделов биологии. Среди них — генетико-экологическое изучение структуры популяции (Н.И.Вавилов, Е.Н.Синская, Дж.Клаузен, М.А.Розанова), экспериментальное и теоретическое изучение борьбы за существование и естественного отбора (В. Н. Сукачев, Дж. В. Холстейн, Г. Ф. Га-узе и др.), данные теоретической и экспериментальной генетики (М.Лернер, И.И.Шмальгаузен, Н.П.Дубинин, Г.Стеббинсидр.), развитие теории вида (Н.И.Вавилов, Э.Майр, К.М.Завадский и др.). Теория микроэволюции изучает необратимые преобразования генетико-экологической структуры популяции, которые могут привести к образованию нового вида.

Макроэволюция сформировалась в работах Н.И.Вавилова, И.И.Шмальгаузена, Дж.Г.Симпсона, А.Н.Северцева и др. Она изучает происхождение надвидовых таксонов (семейств, отрядов, классов и пр.), основные направления и закономерности развития жизни на Земле в целом. Эти процессы недоступны наблюдению и могут быть только реконструированы.

Основные положения синтетической теории эволюции (неодарвинизма) таковы:

1. Естественный отбор — главный движущий фактор эволюции, является следствием конкурентной борьбы за существование, особенно острой внутри вида и популяции. Факторами образования видов являются мутации, дрейф генов и различные формы изоляции.

2. Расхождение признаков организмов в ходе эволюции от общего предка (дивергенция) происходит через отбор мелких слу-

497

чайных мутаций. Новые формы образуются через крупные наследственные изменения, жизненность которых определяет отбор.

3. Исходным материалом эволюции служат мутации, случайные и ненаправленные. Организация популяции и изменения условий среды выделяют наследственные изменения в сторону прогресса.

4. Макроэволюция, ведущая к образованию надвидовых групп, осуществляется через процессы микроэволюции.

Положение об элементарных явлениях и факторах эволюции сформулировал Н.В.Тимофеев-Ресовский: а) популяция — элементарная эволюционная структура; б) изменение генотипа популяции — элементарное эволюционное явление; в) генофонд популяции — элементарный эволюционный материал; г) элементарные эволюционные факторы — мутации, «волны жизни», изоляция, естественный отбор. Отбор может быть в трех формах.

Эволюционный подход становится *методологической основой биологии*. Конкретный материал, теории и гипотезы разных ее областей осмысливаются с эволюционных позиций. Эволюционное учение соединяет разрозненные, узко специализированные биологические дисциплины, противодействует их разобщению и поэтому занимает центральное место в современной биологии. Принцип актуализма («современность — ключ к познанию прошлого») здесь сочетается с принципом историзма («ключом к изучению настоящего является познание прошлого»).

12.7. Понятия микро- и макроэволюции. Естественный отбор — направляющий фактор эволюции

Современный эволюционизм подразделяет эволюционный процесс на микро- и макроэволюцию.

Микроэволюция — процесс перестройки внутри вида, ведущий к образованию новых популяций, подвидов и заканчивающийся образованием нового вида. Микроэволюция может происходить в достаточно короткие промежутки времени. В результате мутаций (наследственной изменчивости) происходят случайные изменения генотипа. Мутации чаще всего рецессивны и редко бывают полезными для вида, но все-таки какие-то могут оказаться полезными и тогда особь получает сразу большое преимущество перед остальными особями популяции. Так, жирафы с более длинной шеей получали преимущество питаться листьями с высоких деревьев. Появление нового признака вызывает процесс дивергенции в популяции.

Расхождение признаков (дивергенция) заключается в том, что особи с ярко выраженными вариантами какого-то при-

498

знака будут или преимущественно выживать, или вымирать (не оставлять потомства). Наиболее приспособленная группа будет более интенсивно размножаться и передавать полезный признак по наследству, укрепляя его и увеличиваясь в численности. Особи с неявно выраженным признаком будут постепенно вытесняться более приспособленными. Таким образом возникают новые подвиды и виды. Дивергенция всегда имеет характер группового отбора особей с полезными признаками из-за естественного отбора, т.е. из-за мутаций, лежащих в основе отбора.

Так, более 20 видов лютиков имеют одного предка. Причина расхождения — географическая: болото, луг, лес и т.д. Если в одинаковых условиях существования животные, относящиеся к разным группам, приобретают сходное строение, то говорят о *конвергенции*, а для генетически близких групп — о *параллелизме*.

Численность популяции изменяется дивергенцией. Волны численности, существующие в популяции,

зависят от изменений климата, количества врагов, количества пищи и т.п. Может даже случиться, что сумеют выжить только те особи, которые приобрели полезный признак.

Так, в засушливый год выжили жирафы с более длинной шеей. Если бы они не были пространственно отделены от других популяций и могли скрещиваться с живущими рядом в соседней долине, где засуха не столь существенна из-за водоема, жирафами с короткой шеей, то новый вид не образовался бы.

Изоляция популяций необходима для образования нового вида, она — важнейший фактор микроэволюции. Изоляция как фактор видообразования может достигаться различным образом:

1. Географическая изоляция связана с расширением зоны обитания (ареала). В новых условиях постоянно происходят мутации, наследственные изменения, действует естественный отбор, что приводит к новому виду. Преградами могут быть реки, горы, ледники и пр. Образование вида таким образом занимает сотни и тысячи поколений. Дарвин выделял роль среды в видообразовании. Животные, обитающие на островах Зеленого Мыса, несмотря на некоторое сходство с материковыми видами, имели существенные различия.

2. Временная изоляция достигается несовпадением сроков размножения между двумя подвидами. В результате подвиды расходятся еще больше и возникают два новых вида. Таких примеров много среди рыб.

3. Репродуктивная изоляция возникает из-за различий в поведении или несовместимости генетического материала.

Макроэволюция — процесс формирования более крупных единиц: из видов — новых родов, из родов — новых семейств и т.д. Эти процессы нельзя изучать непосредственно, поскольку они

499

очень длительны. Но в основе макроэволюции лежат те же движущие силы, что и в микроэволюции: наследственная изменчивость и начало дивергенции; естественный отбор и продолжение дивергенции, гибель менее приспособленных и образование новой структурной единицы; репродуктивное разобщение, что доказывается несколькими независимыми путями:

анатомическими: *атавизмы* (сохранившиеся у современных существ органы предков — хвост, волосаной покров и т.п.), *рудименты* (находящиеся на стадии исчезновения уже ненужные органы — аппендикс, остатки третьего века и др.), *гомологические органы* (пятипалая конечность, в основе которой скелет плавников рыб). Единый план строения животных указывает на единство происхождения;

эмбриологическими, основанными на сходстве зародышей ранних стадий развития, уменьшающимися по мере роста и развития. В конечной стадии начинают преобладать черты, свойственные данному классу, семейству, виду;

палеонтологическими — остатки вымерших переходных форм. Так, обнаружение пятипалого и трехпалого предка у однопалой современной лошади доказывает, что предки лошади имели пять пальцев на конечности.

Движущие силы эволюции видов в природе — *наследственная изменчивость* и *естественный отбор*. Наследственная изменчивость дает материал для эволюции, а естественный отбор определяет, насколько полезен возникший из-за мутаций признак. По Дарвину, основа естественного отбора — борьба за существование. Это может быть борьба внутривидовая — за воду и свет, за лучшие участки и доступ к водоему и др.; межвидовая — между хищниками и грызунами на одной территории; борьба с неблагоприятными условиями среды. И все новые признаки, возникающие в результате наследственной изменчивости, проверяются естественным отбором. Доказательством существования отбора он считал тот факт, что каждая пара организмов дает больше потомков, чем их дорастет до взрослого состояния. В борьбе за существование выживают те, которые смогли передать своим потомкам набор признаков, обеспечивающий им лучшую приспособляемость, которая выражается в строении организмов, поведении и т.д. Но она носит относительный характер, помогая выживать только в условиях, в которых сформировалась.

Так, осетр мечет 2 млн икринок, а доживают до взрослых рыб — единицы. Вблизи промышленных предприятий темноокрашенные особи как менее заметные вытеснили светлоокрашенных. Некоторые животные выработали окраску, которая делает их похожими на опасные виды, чтобы защититься от нападения хищников. Особенности формы дельфина позволяют ему развивать скорость до 40 км/ч. Стриж имеет длинные узкие крылья, помогающие ему

500

прекрасно летать, но не позволяющие взлетать с ровных поверхностей и, если ему не с чего спрыгнуть, он погибает.

Под действие отбора могут попасть и отдельные особи, и целые популяции. Он определяет направление эволюции, собирая и интегрируя многочисленные случайные отклонения, сохраняя не признаки, а комплекс признаков или фенотипы, т.е. определенные комбинации генов, свойственных организму. Выделяют несколько форм отбора.

Движущий отбор проявляется при изменении условий существования вида. Его давление направлено в пользу особей, имеющих отклонение определенного признака от нормы. Происходит сдвиг общей нормы и возникает новая. Дивергенция между старой и новой нормами ведет к видообразованию. Движущий отбор лежит в основе появления популяций насекомых, устойчивых к определенному яду. Эти особи приобретают преимущества при размножении, и их потомки занимают места умерших насекомых, которые не обладали этим признаком. Таким путем исчезли и многие органы, не используемые несколькими сотнями поколений.

Стабилизирующий отбор действует в почти неизменных условиях существования. Он оказывает давление в пользу особей, имеющих средние значения какого-то признака. В результате происходит их укрепление, предохранение от разрушающего действия мутаций. И в местностях, где условия жизни не менялись, сохранились древние виды, вымершие в других местах. Например, сохранился реликтовый таракан, голосеменное растение гинкго, кистеперая рыба латимерия.

Разрывающий отбор действует при изменении условий существования, его давление направлено в пользу организмов, имеющих отклонения от нормы в обе стороны. И формируется новая норма реакции. Так, на островах, где сильны ветры, мухи с нормальными крыльями сдуваются и гибнут. Преимущество у мух или с недоразвитыми крыльями (они ползают), или с длинными крыльями (они хорошо летают и оказывают сопротивление ветру).

Биологический прогресс — результат успеха в борьбе за существование. Он характеризуется возрастанием численности особей, расширением ареала обитания, увеличением числа групп более низкого ранга. Биологический регресс характеризуется обратными признаками и ведет к вымиранию. К биологическому прогрессу ведут следующие факторы:

морфологический прогресс — усложнение организма, поднятие его на более высокий уровень. Строение организма изменяется не вследствие приспособления к изменяющимся условиям среды, оно позволяет расширить использование условий внешней среды. При дальнейшей эволюции эти изменения, называемые арогенезом, сохраняются и ведут к возникновению новых групп, видов;

501

аллогенез — эволюционное направление, сопровождающееся идиоадаптацией — приспособлением к специальным условиям среды, полезным в борьбе за существование, но не меняющим уровня организации. Пример — колючки растений или изменение окраски животных;

катагенез — эволюционное направление, сопровождающееся упрощением организации. Фактически — это морфологический регресс. Пример — переход к паразитическому образу жизни, уменьшающий способности к конкурентной борьбе.

После возникновения морфологического прогресса начинается приспособление отдельных популяций к условиям существования путем идиоадаптации. Например, класс птиц при расселении по суше дал огромное разнообразие форм. Хотя основы их строения одинаковы, частные приспособления отличны. Поэтому чередование этих главных направлений отражает эволюционную тенденцию в филогенезе почти всех групп.

Биологическая эволюция отлична от эволюции атомов, Земли, общества и др. В ее основе — «уникальные процессы самовоспроизведения макромолекул и живых организмов, которые таят в себе почти неограниченные возможности преобразования живых систем в ряду поколений», — отмечает известный эволюционист А. В. Яблоков. Биологическая эволюция — необратимое и в известной степени направленное историческое развитие живой природы, сопровождающееся изменением генетического состава популяций, формированием адаптаций, образованием и вымиранием видов, преобразованиями биосферы и биосферы в целом, отмечает он. С возникновения жизни органическая природа непрерывно развивается сотни миллионов лет, и результатом процесса эволюции является то разнообразие форм живой материи, которая еще не полностью описана, классифицирована и изучена. Формы живой материи — и предмет, и объект эволюции. Результаты биологической эволюции многообразны, это всегда соответствие развивающейся живой системы условиям ее существования.

12.8. Основные гипотезы происхождения живого

Проблема эволюции и происхождения живого на Земле является загадкой и предметом споров не одно столетие. Одно представление ориентировалось на идеи творения мира, приписывая всему живому особую жизненную силу, не зависящую от материального мира (витализм), другое — на органическую связь живого с неживым, и появилась идея о возможности самозарождения жизни.

Анаксимандр считал, что и живое, и неживое образовано из гиперона по одинаковым законам. Животные родились из воды и земли при

502

нагревании солнечной теплотой и светом, при этом все они возникли независимо друг от друга. Эмпедокл исходил из построения материи четырьмя элементами мира (огонь, воздух, земля, вода), которые взаимодействуют через любовь (притяжение) и вражду (отталкивание). Теплота недр Земли вырывалась из глубин и превращала тинообразную поверхность Земли в комья разной формы. Так появились растения, а потом животные. Но они не были похожи на современные, неприспособленные и уродливые формы исчезали, оставляя более совершенные для развития. Элементы стремились соединиться с себе подобными, поэтому важны для живого тепло и кровь. Без воды и огня наступает смерть. Атомистическая концепция Демокрита, представленная в поэме Лукреция Кара, отвергала легенду о сотворении людей богами. В поэме предложена периодизация истории человечества на основе использования материала для орудий труда: века каменный, медный (или бронзовый) и железный. Распад Римской империи в V в. привел к новому типу сознания, к религиозному мироощущению, когда естествознание лишилось своего предмета, своих реальных задач. Вера

во всемогущего Бога, создающего и творящего Мир, вела к периоду мистицизма и иррационализма. Кроме того, отсутствие надежных средств хранения и передачи информации способствовали упадку науки.

До XVIII в. не было речи о различии и единстве живого и косного вещества. Человек — боговдохновенное создание, а остальная природа — материя, управляемая законами механики, и развитие биологии и геологии шло раздельно. Теория эпигенеза (У. Гарвей, Р.Декарт) отрицала предопределенность развития организма, развивающегося под определяющим влиянием окружающей среды. У. Гарвей, как и Аристотель, считал эволюцию стремлением к совершенству. Обращаясь больше к опытному изучению эмбриогенеза, эпигенетики отходили от идей божественного творения жизни. Преформисты (А.Левенгук, Г.Лейбниц, Н.Мальбранш и др.) считали, что в зародышевой клетке содержатся все структуры взрослого организма, и онтогенез — лишь количественный рост зачатков органов и тканей. Лейбниц провозгласил принцип градации, предсказал существование переходных форм между животными и растениями. Этот принцип затем был развит до представления о «лестнице существ» и концепции трансформизма.

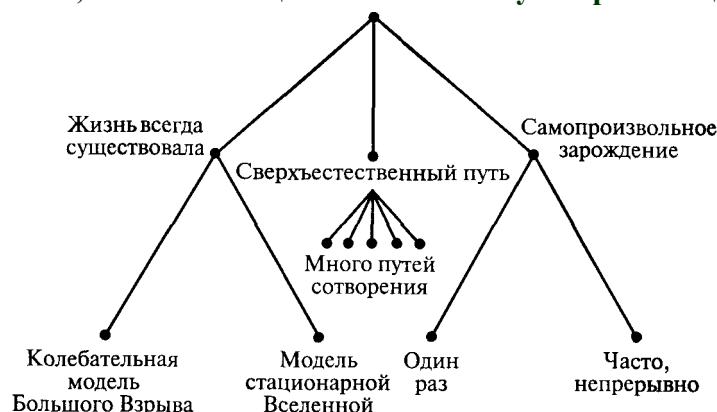
Проблема происхождения и эволюции жизни относится к наиболее интересным и в то же время наименее исследованным вопросам, связанным с философией и религией. Практически на протяжении почти всей истории развития научной мысли считалось, что жизнь — явление самозарождающееся. Здесь было много чисто умозрительных рассуждений, теологических и научных. Перечислим основные теории, связанные с моделью развития Вселенной (рис. 12.10):

жизнь была создана Творцом в определенное время — креационизм (от лат. *creatio* — сотворение);

жизнь возникла самопроизвольно из неживого вещества;

503

Рис. 12.10. Схема, показывающая возможные пути происхождения жизни



жизнь существовала всегда;

жизнь была занесена на Землю из Космоса;

жизнь возникла в результате биохимической эволюции.

Согласно теории креационизма, возникновение жизни относится к определенному событию в прошлом, которое можно вычислить. В 1650 г. архиепископ Ашер из Ирландии вычислил, что Бог сотворил мир в октябре 4004 г. до н. э., а в 9 часов утра 23 октября — и человека. Это число он получил из анализа возрастов и родственных связей всех упоминаемых в Библии лиц. Однако к тому времени на Ближнем Востоке уже была развитая цивилизация, что доказано археологическими изысканиями. Впрочем, вопрос сотворения мира и человека не закрыт, поскольку толковать тексты Библии можно по-разному. Сторонники этой гипотезы считали, что живым организмам присуща особая сила, независимая от материального мира, направляющая все жизненные процессы (витализм). В настоящее время около 50 % жителей США придерживаются этой гипотезы.

Теория спонтанного зарождения жизни существовала в Вавилоне, Египте и Китае как альтернатива креационизму. Она восходит к Эмпедоклу и Аристотелю: определенные «частицы» вещества содержат некое «активное начало», которое при определенных условиях может создать живой организм. Аристотель считал, что активное начало есть в оплодотворенном яйце, солнечном свете, гниющем мясе. У Демокрита начало жизни было в иле, у Фалеса — в воде, у Анаксагора — в воздухе. Аристотель не сомневался в самозарождении лягушек, мышей и других мелких животных. Платон говорил о самозарождении живых существ из земли в процессе гниения. Различные случаи самозарождения описаны Цицероном, Плутархом, Сенекой и Апулеем.

504

С распространением христианства идеи самозарождения были объявлены еретическими, и долгое время о них не вспоминали. Но Гельмонт придумал рецепт получения мышей из пшеницы и грязного белья. Бэкон считал, что гниение — зачаток нового рождения. Гарвей, как и Бэкон, думал, что черви и насекомые могут зарождаться при гниении. Парацельс пытался разработать рецепты создания искусственного человека — гомункулуса путем помещения человеческой спермы в тыкву. В XV—XVI вв. считали, что львы возникли из

каменной пустыни. Согласно Декарту, самозарождение — естественный процесс, который происходит при некоторых условиях. Идеи самозарождения жизни поддерживали Коперник, Галилей, Декарт, Гарвей, Гегель, Ламарк, Гете, Шеллинг. Их авторитет во многом определил широкое распространение этой идеи.

Итальянский биолог Ф. Реди серией опытов с открытыми и закрытыми сосудами доказал (1688), что появляющиеся в гниющем мясе белые маленькие черви — это личинки мух, и сформулировал принцип: *все живое — из живого*. Так он отверг доктрину самозарождения жизни. Но только острые дискуссии в середине XIX в. потребовали экспериментальных исследований. Л. Пастер окончательно показал (1860), что бактерии могут появляться в органических растворах только тогда, если они были туда занесены ранее. Опыты Пастера подтвердили принцип Реди и показали несостоятельность идеи самозарождения жизни. Но они не могли ответить на основной вопрос о происхождении жизни. И для избавления от микроорганизмов необходима стерилизация, получившая название *пастеризации*. Отсюда укрепились представление, что новый организм может быть только от живого.

Сторонники **теории вечного существования жизни** и считают, что на вечно существующей Земле некоторые виды вынуждены были вымереть или резко изменить численность в тех или иных местах из-за изменения внешних условий. Четкой концепции на этом пути не выработано, поскольку в палеонтологической летописи Земли есть некоторые разрывы и неясности. С идеей вечного существования жизни во Вселенной связана и следующая группа гипотез.

Теория панспермии не предлагает механизма для объяснения первичного возникновения жизни и переносит проблему в другое место Вселенной. Наша планета, возникшая 4,5 млрд лет назад, в первые 500 млн лет бомбардировалась потоками метеоритов, которые вроде бы препятствовали не только появлению жизни, но даже и образованию свободной водной поверхности. Но в пластах, имеющих возраст 4,3 млрд лет, найдены простейшие формы жизни, а 200 млн лет — слишком малый срок не только для самопроизвольного образования органики, не говоря о живых клетках. Во всей Вселенной за 13—15 млрд лет существования такой процесс мог бы осуществиться. В 1865 г. немецкий врач Г. Рихтер выдвинул идею космических зачатков — *космозоев*, переноси-

505

мых с одной планеты на другую. Зародившись в космосе, жизнь долго сохранялась в анабиозе почти при $T = 0\text{ К}$ и была занесена на Землю метеоритами. Либих считал, что «атмосферы небесных тел, а также вращающихся космических туманностей можно считать как вековые хранилища оживленной формы, как вечные плантации органических зародышей», откуда жизнь рассеивается во Вселенной. Аналогично мыслили Кельвин, Гельмгольц и др.

В начале XX в. с идеей радиопанспермии выступил Аррениус. Он описывал, как с населенных планет уходят в мировое пространство частички вещества, пылинки и живые споры микроорганизмов. Они, сохраняя жизнеспособность, летают во Вселенной за счет светового давления и, попадая на планету с подходящими условиями, начинают новую жизнь. Эту гипотезу поддерживали многие, в том числе русские ученые С. П. Костычев, Л.С.Берг, В.И.Вернадский и П.П.Лазарев.

Для обоснования панспермии обычно используют наскальные рисунки с изображением предметов, похожих на ракеты или космонавтов, или появления НЛО. Полеты космических аппаратов разрушили веру в существование разумной жизни на планетах Солнечной системы, появившуюся после открытия Скиапарелли каналов на Марсе (1877). В 1924 г. многие каналы сфотографировали, и они казались доказательством существования разумной жизни. Фотоснимки 500 каналов зафиксировали сезонные изменения цвета, которые подтвердили идеи астронома Г. А. Тихова о растительности на Марсе, так как озера и каналы имели зеленый цвет. Ценная информация о физических условиях на Марсе была получена советским космическим аппаратом «Марс» и американскими посадочными станциями «Викинг-1» и «Викинг-2». Так, полярные шапки, испытывающие сезонные изменения, оказались состоящими из водяного пара с примесью минеральной пыли и из твердой двуокиси углерода (сухого льда). Но пока следов жизни на Марсе не найдено. Изучение поверхности с борта искусственных спутников позволило предположить, что каналы и реки Марса могли возникнуть в результате растапливания подповерхностного водяного льда в зонах повышенной активности или внутренней теплоты планеты или при периодических изменениях климата.

В конце 60-х гг. вновь возрос интерес к гипотезам панспермии. Так, геолог Б.И.Чувазов («Вопросы философии», 1966) писал, что жизнь во Вселенной, по его мнению, существует вечно. Он критиковал теорию Опарина, считал сомнительным применение понятия естественного отбора к анализу развития предбиологических систем, хотя и допускал возможность чрезвычайно редкого развития неживой материи до уровня живой. Потому оно может произойти только однажды в каждой данной галактике и переноситься спорами с метеоритами по планетным системам звезд.

При изучении вещества метеоритов и комет были обнаружены многие «предшественники живого» — органические соединения, синильная кислота, вода, формальдегид, цианогены. Формальдегид, в частности, обнаружен в 60 % случаев в 22 исследованных

506

областях, его облака с концентрацией около 10^3 мол/см³ заполняют обширные пространства. Предшественники аминокислот найдены в лунном грунте и метеоритах (1975). Сторонники этой гипотезы

считают их посеянными на Земле. В предисловии к русскому изданию книги С. Фокса и К. Дозе «Молекулярная эволюция и возникновение жизни» А. С. Опарин писал: «Земля уже при самом своем образовании получила эти вещества, так сказать, «в наследство от Космоса». О существовании жизни вне Солнечной системы пока сказать нельзя, но обнаружены в спектрах далекой галактики линии, соответствующие линии спирта.

В представлениях о зарождении жизни в результате **биохимической эволюции** важную роль играет эволюция самой планеты. Земля существует почти 4,5 млрд лет, а органическая жизнь — около 3,5 млрд лет. В докембрийских породах найдены признаки живого. Состояние Земли за время ее существования все время изменялось. Очень давно Земля была горячей планетой с температурой $(5...8) \cdot 10^3$ К. По мере остывания тугоплавкие металлы и углерод конденсировались, образуя земную кору. Но она не была ровной из-за активной вулканической деятельности и всевозможных подвижек формирующегося грунта. Атмосфера первичной Земли сильно отличалась от современной. Легкие газы — водород, гелий, азот, кислород, аргон и другие — не удерживались еще недостаточно плотной планетой, а более тяжелые соединения оставались (вода, аммиак, двуокись углерода, метан). Вода оставалась газом, пока температура не упала ниже 100 °С.

Химический состав Земли сформировался в результате космической эволюции вещества, возникновения определенных пропорций соотношений атомов. Космическое обилие кислорода и водорода выразилось в обилии воды и ее многочисленных окислов, а высокая распространенность углерода — одна из причин, определивших большую вероятность возникновения жизни. Обилие кремния, магния и железа способствовало образованию в земной коре и метеоритах силикатов.

Источниками сведений о распространенности элементов служат данные о составе Солнца, метеоритов, поверхностей Луны и планет. Возраст метеоритов примерно соответствует возрасту земных пород, поэтому их состав помогает восстановить химический состав Земли в прошлом и выделить изменения, вызванные появлением жизни на Земле. Первый этап — период образования простых органических соединений. На других планетах и в космической газопылевой туманности обнаружены соединения углерода и даже углеводороды. Второй этап — образование в водах океана белковых веществ. В разных странах удалось получить из смеси аммиака, метана, водорода и водяного пара при высоких давлениях и наличии электрических разрядов и ультрафиолетового облучения аминокислоты. Позже путем полимеризации в этих условиях были получены и более сложные органические соединения. Третий этап — процессы ста-

507

ли происходить в кислородной атмосфере, так как кислород накапливался в течение 1,2 млрд лет, и соединения начали окисляться. Так родился «первичный бульон» жизни. Можно сказать, что Опарин обратился к простым формам неживой материи, распространив на их изучение дарвиновский принцип эволюции.

Научная постановка проблемы возникновения жизни принадлежит Ф. Энгельсу, считавшему, что жизнь сформировалась в ходе эволюции материи. В этом же ключе высказался и К. А. Тимирязев: «Мы вынуждены допустить, что живая материя осуществлялась так же, как и все остальные процессы, путем эволюции... Процесс этот, вероятно, имел место и при переходе из неорганического мира в органический» (1912). Но окончательного ответа пока нет.

12.9. Концепция происхождения живого по гипотезе Опарина—Холдейна

Атмосфера ранней Земли была, скорее, «восстановительной», так как в древних породах преобладают металлы: в восстановленной форме (например, двухвалентное железо), а в более молодых — в окисленной (железо трехвалентное). Опыты, проведенные в лаборатории, показывают, что органические вещества в восстановительной среде создаются легче, чем в окисленной. На первой стадии из простых неорганических соединений появились углеводороды. Возможность образования сложных соединений из простых доказана многими исследованиями.

Так, еще в 1861 г. А. М. Бутлеров обнаружил, что в растворе формалина в известковой воде при стоянии в теплом месте образуются сахара. А. Н. Бах показал, что в водном растворе формалина и цианистого калия возникают еще более сложные вещества, которые могут служить питательной средой для микроорганизмов.

Органика (возможно, углеводороды) возникла в океане из более простых соединений — предположил А. И. Опарин (1923). Необходимую энергию давало Солнце, ультрафиолетовая часть его излучения не поглощалась озоновым слоем (который еще не образовался). Разнообразие простых соединений в океанах, большая водная площадь, обилие солнечной энергии, действовавшей длительное время, образовали «первичный бульон», в котором стали возникать органические соединения. Похожая идея была положена в основу концепции и английского естествоиспытателя Дж. Холдейна (1929).

По оценке К.Х. Уоддингтона, «в конце 20 — 30-х гг. были заложены основы точки зрения, согласно которой жизнь рассматривается как явление, естественным образом возникающее из неживой природы. Веро-

508

ятно, что будущие исследователи истории идей отметят, что эта точка зрения на проблему происхождения жизни, представляющая революцию в философском понимании человеком своего собственного места в мире,

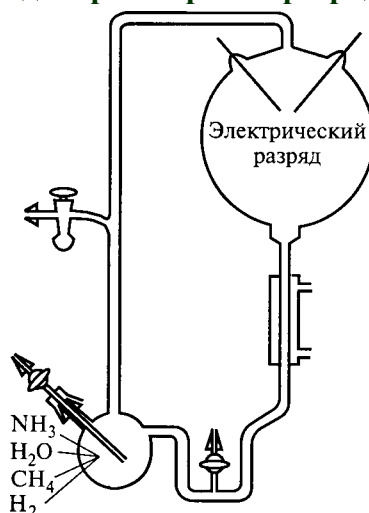
впервые была разработана коммунистами. Опарин в Москве (1924) и Холдейн в Кембридже (1929) независимо друг от друга утверждали, что последние достижения геохимии... позволяют представить процесс происхождения систем, которые могут быть названы «живыми».

Опарин отметил, что организмы состоят из соединений, обладающих более сложной структурой, чем те продукты, которые они производят. И логично, что некоторые органические соединения предшествовали живым организмам и сыграли важную роль в их происхождении. В 1956 г. Опарин выпустил книгу в соавторстве с астрономом Фесенковым, в которой они придерживаются идеи Шмидта о том, что Солнце захватило часть пылевого облака во Вселенной. Но общей идеей для всех вариантов теории оставалось необходимое условие возникновения жизни — ее первоначальное отсутствие, причем и законы природы изменялись — с возникновением жизни появились законы *биологические*, а с появлением человека возникли законы *социальные*.

Момент перехода от неживого к живому — решающий для мировоззрения. У Опарина жизнь возникает на уровне многомерных структур — коагулянты, гели и коацерваты — в «момент выпадения геля или образования первородного студня», и «с некоторыми оговорками мы даже можем считать этот впервые возникший на Земле кусочек органической слизи первичным организмом. В самом деле, он должен был обладать многими из тех свойств, которые в настоящее время рассматриваются как признаки жизни». Он описал (1936) коллоидную фазу возникновения жизни и развитие способности к фотосинтезу у предков растительных организмов. Коацерваты уже могут увеличиваться в размерах, делиться на части и подвергаться химическим изменениям ввиду явлений на границе возможного расслоения. Эти граничные явления имеют зачатки метаболизма, а переход к живому происходит тогда, когда на смену «соревнованию в скорости роста приходит борьба за существование». Возникновение и обострение этой борьбы — результат нехватки для «питания» коацерватов запасов «предбиологической» органики. Эта нехватка приводит к существованию различных путей получения пищи, организмы до перехода к биологическому уровню развития разделяются на автотрофные и гетеротрофные. При иссякании запасов органического материала вне коацерватов вступали в действие «естественный отбор» и другие биологические факторы, происходил переход к организмам. Хотя Холдейн в 1929 г. считал, что земная атмосфера была богата двуокисью углерода «до возникновения жизни» и первые живые существа были «возможно, огромными молекулами», не упоминая ни о гелях, ни о коацерватах, его имя

509

Рис. 12.11. Схема опыта Миллера по синтезу органических веществ из смеси метана, аммиака и воды при искровом разряде



стоит рядом с именем Опарина в «гипотезе Холдейна — Опарина».

Подобные условия, существовавшие на Земле 3 — 4 млрд лет назад, в 1953 г. создали в лаборатории американского биохимика Г. Юри — искровой разряд пропускали через смесь метана, аммиака, водорода и воды. В установке Миллера (рис. 12.11) удалось синтезировать ряд аминокислот, глутаминовую кислоту, аденин, глицин и простые сахара. После этого Орджел синтезировал простые нуклеиновые кислоты. Другие ученые стали использовать нагревание, пропускание β -лучей и ультрафиолета, и оказалось, что различные источники свободной энергии приводили к образованию сходных веществ. Попадание полученных веществ в воду предохраняло от обратного распада на простые соединения, а взаимодействие друг с другом открывало возможность эволюции. Наиболее эффективным источником оказалось солнечное излучение в диапазоне $(2...2,5) \cdot 10^7$ м.

В настоящее время излучение с длиной волны менее $2,9 \cdot 10^7$ м поглощается слоем озона и не доходит до земной поверхности. По оценкам Юри, в предбиологические времена доля свободного кислорода составляла около 10^3 от современного значения в атмосфере, что было недостаточно для образования озонового слоя. По

расчетам геолога и палеонтолога Б.С.Соколова (1976), содержание кислорода только 1 млрд лет назад достигло 1 % современного значения. Опыты Миллера говорят в пользу теории Юри о составе первоначального «бульона». Ранняя атмосфера Земли напоминала атмосферу современного Юпитера, в ней преобладали неокисленные газы — метан, аммиак и водород. Х. Оро в 60-е гг. показал, что молекулы синильной кислоты HCN в одностадийной реакции могут конденсироваться с образованием аденина. Простейшие молекулы возникали в очень малых количествах, и нуклеотидов таким путем не смогли получить. Американский ученый К. Саган подсчитал (1966), что образовавшиеся за счет энергии ультрафиолетовых лучей органические вещества способны создать в водах океана 1 %-ный раствор.

Итак, солнечное излучение способно обеспечить ход мощных процессов синтеза, неорганического фотосинтеза, чтобы начали

510

вдруг «выживать» более сложные молекулы вместо простых. Если химическая эволюция Земли заняла 4,5 млрд лет, то этап биохимической эволюции, который привел к формированию простейших организмов, — более 2 млрд лет. Теория Опарина получила признание, но оставалось неясным, как из простейших веществ вдруг образовалась молекула, способная размножаться. Так считал и известный американский генетик Г. Миллер: жизнь возникла в форме гена — элементарной единицы наследственности — путем случайного сочетания атомных групп и молекул, встречавшихся в водах первичного океана.

В 1966 г. немецкий биохимик Г. Шрамм подсчитал вероятность случайного сочетания 6000 нуклеотидов, образующих РНК вируса табачной мозаики, и получил число $1/10^{2000}$. Так как считается, что число нуклонов во Вселенной равно 10^{80} , то за 10^9 лет, отведенных для синтеза простейшего организма, невозможно получить хотя бы одну такую молекулу. Поэтому гипотеза случайного соединения не пользуется признанием. Хойл высказался столь красочно, что его слова вошли в фольклор: эта идея «столь же нелепа и неправдоподобна, как утверждение, что ураган, пронесшийся над мусорной свалкой, может привести к сборке «Боинга-747».

А. И. Опарин разрабатывал свою гипотезу происхождения жизни — возникновение живого в результате взаимодействия простейших органических соединений при постепенном усложнении. Этим процессам благоприятствовали высокое содержание простых органических соединений в поверхностных водах еще молодой Земли, наличие разнообразных условий, постоянный приток энергии от Солнца, в том числе и жесткого ультрафиолета. Возник круговорот веществ, и из взаимных превращений абиотических веществ образовались процессы синтеза и распада органики, стали сохраняться более устойчивые соединения и распадаться малоустойчивые. Если бы шли только процессы синтеза, то структуры усложнялись, но никакого обмена веществ не произошло, т.е. получилась бы не жизнь, а кристаллизация. Если жизнь начала развиваться как единство процессов синтеза и деструкции органического вещества, то вряд ли на первых этапах она была связана с простейшими организмами, подчеркивал Бернал (1969). Стало быть, жизнь появилась раньше живых организмов.

Возникновение молекулярной биологии привело к союзу биохимии и генетики, кульминацией которого явилось появление гипотезы Уотсона — Крика (1953), объяснявшей, каким образом может быть записана генетическая информация в молекулах ДНК. Самое важное — все организмы обладают одним и тем же генетическим кодом.

Простейшие системы — вирусы — состоят из нуклеиновых кислот (ДНК или РНК), заключенных в белковую оболочку. Так не является ли молекула ДНК первой живой формой? «План по-

511

строения» молекулы ДНК не может быть признан случайным, а огромное количество информации не возникает внезапно.

Что касается вирусов, то некоторые считали их живыми (В. Стенли, 1957), другие (в том числе и Опарин) живыми их не признавали, считая, что они не находятся на магистральном пути развития жизни. Опарин говорил (1957): «Первично абиогенным путем могли возникнуть не те в функциональном отношении в высшей степени совершенно построенные нуклеиновые кислоты или белки, которые мы сейчас выделяем из организмов, а только довольно беспорядочно построенные полинуклеотиды и полипептиды, из которых образовались многомолекулярные исходные системы, и только на основе эволюции этих систем возникли совершенные формы строения молекул, а не наоборот». Книга Опарина, вышедшая в 1936 г. и переведенная в 1938 г., принесла ему мировую известность, а третье издание (1958), выросшее до 500 страниц, вышло одновременно на двух языках. Но за это время он несколько раз колебался в вопросах, связанных с возможностью самозарождения жизни. Поэтому он многократно обращался к проблеме вирусов, обсуждая целесообразность строения организмов, истоки которой — в фундаментальном различии человека и машины: целесообразность строения машине привнесена человеком, создавшим ее. И эти рассуждения Опарина, все более усиливающиеся, можно отнести к проявлению витализма (особенно в конце 60-х гг.).

В книге «Жизнь, ее природа, происхождение и развитие» (1960) Опарин отмечает, что внутренняя организация паразитов упрощается по мере роста «зависимости от своих хозяев» и адаптации к этой экологической нише. И хотя закодированные нуклеиновые кислоты вирусов — продукт эволюции более высокоорганизованных организмов, сами вирусы — конечный результат паразитического вырождения, утратившие все, кроме генетического материала. Они способны к самовоспроизведению при использовании

метаболизма более высокоорганизованных организмов, и они не смогли бы появиться, если бы до них не было эволюции организмов, обладающих способностью к обмену веществ.

12.10. Современная оценка концепции биохимической эволюции в биологии

Концепция Вернадского появилась в 1931 г.

Концепция Вернадского появилась в 1931 г. Он писал о геохимических функциях биосферы: «...среди миллионов видов нет ни одного, который бы мог исполнить один все геохимические функции жизни, существующие в биосфере изначально. Следовательно, изначальный морфологический состав живой природы в биосфере должен быть сложным. И первое появление жизни при создании биосферы должно было произойти не в виде появления одного какого-то организма, а в виде их совокупности, отвечающей геохимическим требованиям жизни». Вернадский

512

связывал возникновение жизни с гигантской катастрофой, которая прервала безжизненную эволюцию земной коры и внесла в нее столько противоречий, что они смогли породить жизнь. Он считал, что наука способна определить условия, при которых зарождение жизни окажется единственно возможным. Когда-то в прошлом при наличии физико-химических условий, не учитывающихся в настоящее время, был нарушен принцип Реди — Пастера («все живое — из живого»), который только указывает, что самопроизвольного возникновения жизни нет сейчас и не было в то время, когда жизнь уже существовала, раз возникнув. В биосфере, по Вернадскому, есть «косное» вещество (минералы), которое остается постоянным, и живое, меняющееся в процессе эволюции.

Оптические свойства живого и неживого веществ различны, и живое всегда оптически активно, т. е. что молекулы живого обладают общей асимметрией и способны поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света. То же относится и к аминокислотам, образующим живые организмы. Молекулы «косного» вещества, имеющие разные виды симметрии не обладают этим свойством. Оптическая активность позволяет отличать вещество биогенного происхождения от вещества «косного». Поскольку веществ, поворачивающих плоскость поляризации, вне Земли пока не обнаружено, естественно считать, что земная жизнь имеет земное происхождение. Появление оптической активности под влиянием приложенного магнитного поля ранее было установлено Фарадеем.

Некоторые предположения Вернадского подтверждены последующим развитием науки. Во-первых, был открыт генетический код, единый для всего живого. Этот четырехбуквенный алфавит выглядит как следствие процесса естественного отбора, отразившего «наиболее приспособленную к земным условиям форму передачи наследственной памяти, наследственной информации, которая кодируется нуклеиновыми кислотами», как выразился академик Н.Моисеев. Это единство генетического кода трудно объяснить, отрицая, что жизнь является продуктом эволюции Земли. Вернадский не мог утверждать это уверенно, поэтому использовал это положение, как не противоречащее опытным данным. Во-вторых, недавно были обнаружены следы жизни на Земле, которые просуществовали 3,6 млрд лет в глубокой пещере на дне океана. Это значит, что почти одновременно (по космическим масштабам времени) с возникновением нашей планеты на ней появилась жизнь.

Концепция «генобиоза» (информационная) появилась в 50-е гг. в связи с работами Холдейна.

Концепция «генобиоза» (информационная) появилась в 50-е гг. в связи с работами Холдейна. Он считал, что первичная среда — макромолекулярная система (типа гена), способная к саморепродукции, он назвал ее «голым геном». Пастер тоже рассматривал зарождение живого как возникновение дисимметричной молекулы из симметричной неживой. Американский ученый

513

Г. Блум (1951) обратил внимание на то, что на ранних этапах эволюции жизни и фотосинтез должен отличаться от современного. Г. Гаффон делил эволюцию энергетики организмов на пять этапов, связанных с последовательной эволюцией внешних условий, в частности, изменением состава солнечного излучения, достигающего земной поверхности (1962). Примитивный фотосинтез использовал ультрафиолетовое излучение, а по мере образования озонового слоя живое постепенно приспосабливалось к фотонам меньшей энергии, но в большем количестве.

Концепция голобиоза, признающая первичность белков, не потеряла своего значения.

Концепция голобиоза, признающая первичность белков, не потеряла своего значения. Полипептиды обладают каталитическими свойствами (С.Кауфман, 1993).

Теория Опарина (1957 — 1960) включает разработку эволюции процессов обмена веществ. Он считал, что механизм запасаения солнечной энергии с помощью хлорофилла достаточно сложен и не мог возникнуть быстро, как и процесс окисления некоторых неорганических соединений (серы или железа), используемых микроорганизмами для биосинтеза. Как сторонник первичного обмена веществ, протекающего в коацерватной системе, он считал появление в ней нуклеиновых кислот завершением эволюции в итоге конкуренции протобионтов. Из-за амфотерности молекул белка образовывались коллоидные гидрофильные комплексы, создавая оболочку типа эмульсии. При слиянии таких комплексов друг с другом образуются *коацерваты* (от

лат. *coacervatus* — накопленный, собранный), отделяющие коллоиды от остальной водной среды. Различные коацерваты являлись сырьем для биохимического естественного отбора. В них происходили дальнейшие химические реакции, при поглощении ими ионов металлов образовывались ферменты. Вдоль границ выстраивались сложные углеводороды типа мембран клетки, обеспечивающие стабильность.

Судьба коацерватной капли

Судьба коацерватной капли определялась тем, какой процесс в ней оказывался преобладающим — роста или распада. Поскольку состав среды, в которой образовывались капли, мало отличался от них, сохранение устойчивости не испытывало затруднений. Отличающееся от среды распадалось, а остальное сохранялось и росло. Так происходил отбор капель, наиболее устойчивых в данных условиях. За миллионы лет бесчисленное их число растворилось в Мировом океане, сохранилась лишь малая часть. Достигнув определенных размеров, одна капля могла распасться на дочерние, и те из них, которые соответствовали по структуре материнской, росли дальше, а резко отличные — распадались. В процессе длительного отбора сохранялись только капли, не теряющие своей структуры, т.е. приобретшие свойство самовоспроизведения. При попадании в коацерват способной к воспроизведению молекулы и внутренней перестройке липидной оболочки могла образоваться и простейшая клетка. Процесс мог развиваться и привести к образованию простейшего организма, питающегося органическими веществами из первичного бульона. Появление самовоспроизведения закрыло этап предыстории развития жизни. Коацерватная капля стала живым организмом, открылась возможность прогрессивной эволюции.

514

Многие ученые признают верной эту гипотезу происхождения жизни и ищут детальное подтверждение ей. Как результат существования единого генетического кода оказалась возможной передача наследственных признаков у бактерий не непосредственно от клетки к клетке, а через бактериофагов. Такие данные получил советский биохимик С. М. Гершензон (1965). Эта идея стала использоваться в генотерапии — исправление наследственных дефектов ДНК при переносе с помощью вирусов нормальной ДНК в дефектные клетки.

Понятие конкуренции гиперциклов, или циклов химических реакций, которые приводят к образованию белковых молекул, распространил на процессы, которые должны были происходить при эволюционном скачке, кроме принципа дарвиновского отбора, и ввел Эйген в своей знаменитой работе «Самоорганизация материи в ходе химической эволюции» (1971).

Полимеризация молекул на пути к живой клетке не могла идти путем перебора вариантов, для чего требуется время, большее времени существования Вселенной. Молекулы быстро и экономично складываются в полимерную цепочку по четкому правилу, коду. Те циклы, которые работают быстрее и эффективнее, чем остальные, и «побеждают» в конкурентной борьбе. Пищей служат молекулы мономеров, которые хотят поглотить, присоединить к себе макромолекулы полимеров, или, точнее, циклы реакций. В первичном бульоне присутствуют и катализаторы химических реакций, которые сами образуются в них как промежуточные продукты, тем самым протекающие реакции похожи на реакции типа Белоусова—Жаботинского, т.е. являются автокаталитическими. Эйгену еще не было известно, что через несколько лет такие самоорганизующиеся системы начнут изучать в разных областях науки, выделяют принципы самоорганизации и появится новая область знания — синергетика. Так появились гипотеза о механизме зарождения макромолекул, необходимых для строительства белка в процессе эволюции, и новая модель предбиологической эволюции.

С критикой позиции Эйгена выступил (1979) Опарин, считая появление жизни не случайным, а закономерным процессом. Его поддержал преподаватель Пермского университета В. В. Орлов, утверждавший, что философия должна «объяснять» процессы происхождения жизни и сознания. Он верил в целенаправленность эволюции материи, кульминацией которой является происхождение человека. Этот телеологический способ мышления сближал Опарина и Орлова с философией природы Тейяра де Шардена. С их взглядами не согласился Дубинин: «Жизнь — это не фатальное последствие химической эволюции. Жизнь на Земле могла и не возникнуть...»

В 70 — 80-е гг. приобрела популярность **концепция генобиоза**. Начало живого — неравновесные диссипативные (рассе-

515

янные) структуры или открытые микросистемы с мощным ферментативным аппаратом, являющимся катализатором. Этот *биоид* подвержен эволюции из-за переходов (мутаций) между видами к более устойчивой структуре. Такими могут быть кристаллы глины, считал А.Дж.Кернс-Смит. Возникновение асимметрии в живой материи Дж. Трэнттер связывал с многократным усилением исчезающе малых асимметрий слабого взаимодействия в кристаллических структурах глин. Холдейн обратился к идее первичности макромолекулярной системы с функциями генетического хода. Эту его последнюю концепцию называют «необиозом».

Сначала нуклеотидная система была голой, т.е. находилась в комплексе с протеинами и обеспечивала свою саморепродукцию. Но в абиотических условиях сразу «зародился» нуклеиново-протеиновый комплекс, так как полинуклеотиды без ферментов не способны к саморепродукции. Общее признание в этой концепции получила идея, согласно которой блоками макромолекулы была ДНК или РНК. В 80-е гг. было обнаружено,

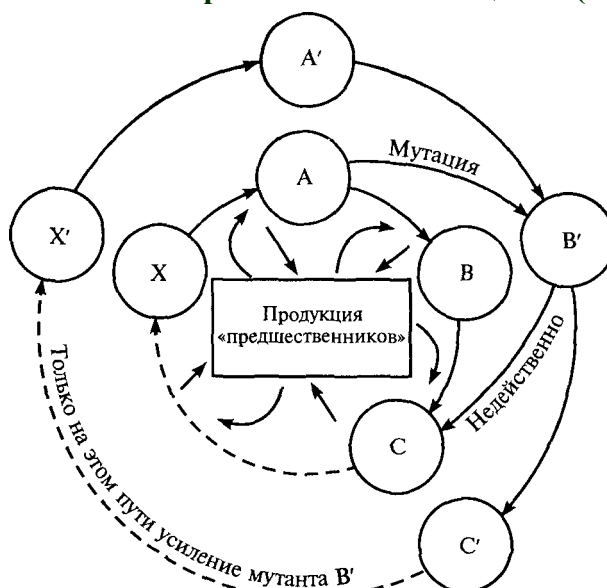
что РНК способна к самовоспроизведению без посредничества белков — ферментов. В 1989 г. сформировалось представление о древней РНК, совмещающей черты фенотипа и генотипа (Д. Джойс), что реализовывало идею Дарвина об эволюции ее в ДНК с утратой самостоятельных каталитических функций. Но вскоре оказалось, что в условиях, существовавших на древней Земле, синтез РНК протекал бы с трудом. Кроме того, непонятно участие довольно редкого элемента — фосфора — в качестве компонента нуклеиновых кислот.

В 1981 г. М.Эйген продемонстрировал, что в растворах мономеров нуклеотидов в присутствии фермента полимеразы могут синтезироваться полимерные молекулы РНК, способные к репликациям, мутациям и даже к борьбе за существование с молекулами-предками (рис. 12.12). В 1974 г. Л.Орджел экспериментально показал, что нуклеотидные мономеры полимеризуются и без полимераз, образуя в конечном итоге РНК, если в растворе имеется «затравка» этой молекулы. Таким образом, доказана автономность и возможность образования на Земле органических веществ, лежащих в основе метаболизма живых существ, и нуклеиновых кислот, носителей наследственной информации. На базе экспериментов Эйгена и Орджела сформировалась гипотеза возникновения жизни по схеме «гены — ферменты — метаболизм», утверждающая одномоментное появление репликации и метаболизма. Но есть доказательства, что эта схема не верна и даже ошибочна.

Известный биолог из Принстона Ф.Дайсон в книге «Происхождение жизни» (2000) развивает гипотезу независимого появления репликации и метаболизма. Современные данные палеонтологии указывают на следы молекул углеводов и порфирина (предшественника хлорофилла) в ископаемых структурах Гренландии (возраст 3,5 — 3,8 млрд лет), тогда как остатков нуклеиновых кислот не обнаружено. Значит, одновременно эти явления не могли возникнуть, репликация и метаболизм имеют разные носители (нуклеиновые кислоты и белки соответственно) и возникли авто-

516

Рис. 12.12. Схема гиперкаталитического цикла (по Эйгену)



номно. Кроме того, в предбиологической среде не было образцов РНК и тем более ферментов, поэтому результаты экспериментов ничего не говорят о происхождении жизни, да и неизбежные ошибки при репликации должны накапливаться, что привело бы к гибели биосистем. Поэтому Дайсон считает наиболее правдоподобной гипотезу Опарина (концепцию голобиоза), согласно которой сначала появились белковые коацерваты — проклетки, которые обладали гомеостатом и размножались, но не имели механизма репликации. Компьютерное моделирование показало, что из неорганизованной молекулярной совокупности в коацервате возникает организованный комплекс, который приобретает белковый гомеостаз (при числе молекул более 2000 возникает 8 — 10 мономеров и дискриминантный фактор фермента порядка 60 — 100). Значит, на этапе предбиологической эволюции аминокислот достаточно 8 — 10 (а не 20, как сейчас), и для ферментов 60—100 (а не 5000—10 000, как сейчас). Вероятность достижения порядка оказалась около 50 %, а успешного синтеза полимеров — 75 %. Поэтому гипотеза Опарина—Дайсона проверена компьютерным моделированием и предлагает следующий порядок возникновения биоструктур: клетка — ферменты — гены.

Появились новые гипотезы зарождения жизни: в тонких пленках органики, адсорбированной на кристаллах пирита или апатитов; в геотермальных источниках на дне океана. Выделяют особую

517

роль в происхождении жизни соединений серы (К. де Дюв). Ясности пока нет, но очевидно, что существование жизни повышает энтропию Вселенной, переводя локально материю в организованное, структурированное состояние.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Какие виды изменчивости Вам известны, в чем их сходства и отличия? Объясните, какая форма изменчивости дает исходный материал для естественного отбора в природе.
2. Докажите, что естественный отбор является направляющим фактором эволюции. Сопоставьте понятия «популяция» и «вид». Докажите, что популяция является единицей эволюции. Почему разные популяции одного вида отличаются по частоте генов?
3. Каковы основные положения и значение клеточной теории в развитии биологии? Какими методами удалось изучить состав живой клетки и ее молекулярное строение? Каковы особенности строения и функции ядра клетки и цитоплазмы?
4. Раскройте сущность микро- и макроэволюции, приведите примеры действующих в них процессов. Каковы доказательства эволюции органического мира?
5. Опишите строение и функции клеточных мембран. Что такое «ионный насос»?
6. Оцените гипотезы происхождения живого на Земле с современных позиций.
7. Охарактеризуйте онтогенетический уровень организации живой материи.
8. Что такое «мутация» и какие мутации бывают? Как определить, что приобретенные признаки не наследуются? Как это показали опыты Вейсмана?
9. Дайте понятие о неodarвинизме и синтетической теории эволюции.
10. Поясните, как происходит эволюция видов с точки зрения генетики. Какова роль мутаций и окружающей среды в эволюции живого?

Глава 13. КОНЦЕПЦИИ САМООРГАНИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

13.1. Возникновение упорядоченности в гидродинамике. Понятие хаоса

Рассмотрим в качестве примера течение воды при термодинамическом равновесии, при малых и больших отклонениях от него. Особенности перехода от ламинарного течения к турбулентному важны для практики, для гидро- и аэромеханики, и они неоднократно решались в рамках физики, механики и математики. Термин «турбулентность» (от лат. *turbulentus* — беспорядочный) ввел еще Кельвин. Точного описания его нет до сих пор, как нет простой математической модели турбулентных движений, которые оказались связанными с нелинейностью.

В теории обычно имеют дело с безразмерным параметром — числом Рейнольдса Re , введенным в гидродинамические теории (1883) и связанным с режимом течения жидкостей и газов: $Re = \frac{\rho v L}{\eta}$, где v — скорость потока; L — линейный размер, фигурирующий в задаче; ρ , η — плотность и динамическая вязкость жидкости. Такие теории (гидро- и аэродинамические) развивали русские ученые Н. Е. Жуковский, С. А. Чаплыгин и др. Одна из наиболее стройных теорий перехода к турбулентности была построена в 1944 г. Л. Д. Ландау. Вообще, это явление очень сложное, можно сказать, что это целый комплекс связанных явлений.

При равновесии, если система замкнута и $v = 0$, ее энтропия максимальна. При наличии градиента давления жидкость течет в сторону меньших давлений, ее движение происходит как бы слоями, параллельными направлению течения (ламинарное течение). Потоки и термодинамические силы связаны линейно, производство энтропии в стационарном состоянии (течении) минимально. При малых значениях числа Re единственная стационарная картина течения соответствует ламинарному течению. Небольшие отклонения скоростей движения от стационарных значений, возникающие из-за флуктуаций, экспоненциально затухают со временем, появляется пара вихрей. При увеличении скорости потока выше критической некоторые из малых возмущений перестают затухать, система теряет устойчивость и переходит в новый режим; вихри начинают осциллировать, движение жидкости становится турбулентным. Линейная зависимость потоков и сил нарушается, как и теорема Пригожина о минимальном приросте энтропии, хотя картина еще стационарна. В этом случае говорят о

519

первой бифуркации (в пер. — раздвоение, разветвление), или *бифуркации Хопфа*.

С увеличением числа Re новый периодический режим вновь теряет устойчивость, возникают незатухающие колебания с частотой, определяемой величиной Re . Растет неравновесность, и вместе с ней число корреляций и параметров, характеризующих систему. При переходе к турбулентности между отдельными областями течения возникают новые корреляции, новые макроскопические связи. Затем появляются новые частоты, сокращается интервал частот, и, по теории Ландау, появляющиеся новые движения имеют все более мелкие масштабы. Нерегулярное поведение, типичное для турбулентности, — результат бесконечного каскада бифуркаций. Говорят, что система из «царства необходимости» переходит в «царство свободы». Но и в «царстве свободы» периодически возникают области, где движение вновь приобретает порядок — «острова необходимости».

При существенном усложнении структуры течения одновременно увеличивается его внутренняя упорядоченность. Это уже не тот беспорядок, что был в равновесном состоянии. Существенно меняется характер броуновского движения частиц, турбулентность сказывается на поглощении и рассеянии электромагнитных и звуковых волн. Например, фотографии распределения световой волны, прошедшей через турбулентную жидкость, фиксируют пятна типа интерференционной картины, соответствующей фокусам и каустикам, которые возникают в световом пучке.

Проблема турбулентности важна не только в связи с инженерными приложениями. Большая часть среды Вселенной находится в турбулентном движении, и с неустойчивостями сталкиваются в физике атмосферы и астрофизике, в океанологии и физике планет. Вообще отношение к хаосу было разнообразным. У древних греков хаос считался первичным состоянием материи, но, как отметил Б. Пастернак, «напрасно в годы хаоса искать конца благого».

Хаотические эффекты,

Хаотические эффекты, нарушавшие стройную картину классической физики с первых дней становления теории, в XVII в. воспринимались как досадные недоразумения. Кеплер отмечал нерегулярности в движении Луны вокруг Земли. Ньютон, по словам своего издателя Р. Котеса, принадлежал к тем исследователям, которые силы природы и простейшие законы их действия «выводят аналитически из каких-либо избранных явлений и затем синтетически получают законы остальных явлений». Но закон — однозначное и точное

соответствие между рассматриваемыми явлениями, он должен исключать неопределенность и хаотичность. Отсутствие однозначности в науке того времени рассматривалось как свидетельство слабости и ненаучного подхода к явлениям. Постепенно из науки изгонялось все, что нельзя формализовать, чему нельзя придать однозначный характер. Так пришли к механической картине мира и «лапласовскому детерминизму».

520

Необратимость процессов нарушила универсальный характер механических законов. Поскольку проследить за движением каждой молекулы газа невозможно, пришлось признать ограниченность своих возможностей и согласиться, что закономерности, наблюдаемые в поведении массы газа как целого, есть результат хаотического движения составляющих его молекул. И тогда Клаузиус ввел «принцип элементарного беспорядка», который понимался как независимость координат и скоростей отдельных частиц друг от друга при равновесии. Эту идею Больцман и положил в основу своей молекулярно-кинетической теории. Максвелл указал на принципиальное отличие механики отдельной частицы от механики большой совокупности частиц, подчеркнув, что большие системы характеризуются параметрами (давление, температура и др.), не применимыми к отдельной частице. Так родилась новая наука — *статистическая механика*. Идея элементарного беспорядка, или хаоса, устранила противоречие между механикой и термодинамикой. На основе статистического подхода удалось совместить обратимость отдельных механических явлений (движений отдельных молекул) и необратимый характер движения их совокупности (рост энтропии в замкнутой системе).

Но идеи хаоса оказались более фундаментальны. При изучении теплового излучения возникли противоречия: электромагнитная теория Фарадея — Максвелла описывала обратимые процессы, но процессы обмена световой энергией между телами, находящимися при разных температурах, ведут к выравниванию температур, т. е. должны рассматриваться как необратимые. Планк ввел гипотезу «естественного излучения», соответствующую гипотезе молекулярного беспорядка. Ее смысл такой: отдельные электромагнитные волны, составляющие тепловое излучение, ведут себя независимо и «являются полностью некогерентными». Эта гипотеза привела к представлению о квантовом характере излучения, которое обосновывалось с помощью теории вероятностей. Хаотичность излучения оказалась связанной с его дискретностью. Квантовый подход позволил Планку и Эйнштейну объяснить ряд законов и явлений (закон Стефана—Больцмана, закон смещения Вина, законы фотоэффекта и др.), которые не находили объяснения в классической электродинамике.

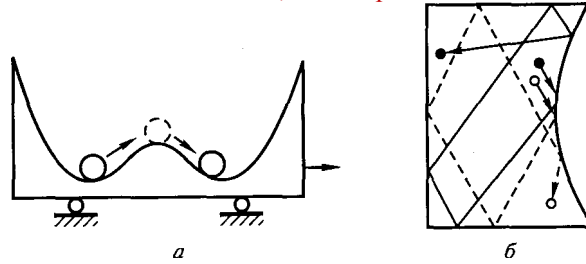
Отступления Луны от траекторий, рассчитанных по законам классической механики, американский астроном Дж. Хилл в конце XIX в. объяснил притяжением Солнца. Французский математик А. Пуанкаре предположил, что вблизи каждого тела есть малозаметные факторы и явления, вызывающие нерегулярности. Поведение даже простой системы существенно зависит от начальных условий, так что не все можно предсказать. Решая задачу трех тел, Пуанкаре обнаружил существование *фазовых траекторий*, которые вели себя запутанно и сложно, образуя «нечто вроде решетки, ткани, сети с бесконечно тесными петлями; ни одна из кривых никогда не должна пересечь самое себя, но она должна навиваться на самое себя очень сложным образом, чтобы пересечь

521

много, бесконечно много раз петли сети». В начале XX в. на эту работу особого внимания не обратили.

Примерно в это же время Планк начал изучать другую хаотичность классической науки и нашел выход во введении *кванта*, который должен был примирить прежние и новые представления, но на самом деле сокрушил классическую физику. В строении атомов долгое время видели аналогию со строением Солнечной системы. Интерес к невозможности однозначных предсказаний возник в связи с появлением принципиально иных статистических законов движения микрообъектов. Соотношения неопределенности Гейзенберга показывают, что может реализовываться лишь некоторая конечная область состояний Δp и Δq , внутри которой лежат начальные координаты q_0 и импульсы p_0 . При этом внутри выделенной области значения координат и импульсов распределены по вероятностному закону, и по мере эволюции системы увеличивается и область ее состояний Δp и Δq . На небольших временных интервалах неопределенность состояния будет нарастать медленно и движение системы будет устойчивым. Для таких систем классическая механика плодотворна.

В 60-е гг. XX в. была установлена **возможность случайных явлений**, от которых нельзя избавиться уточнением начальных условий и исчерпывающим описанием воздействий на систему, и в простых динамических системах, которые считались со времен Ньютона и Лапласа подчиняющимися определенным и однозначным законам механики. Такие движения возникают в механических и электрических нелинейных колебательных системах. Пример такого неустойчивого движения — шарик в двух ямках, разделенных барьером (рис. 13.1). При неподвижной подставке шарик имеет два положения равновесия. При колебаниях подставки он может начать перепрыгивать из одной ямки в другую после совершения колебаний в одной из ямок. После нескольких затухающих колебаний шарик займет в одной из ямок положение, называемое *устойчивым равновесием*. Периодические колебания с оп-

Рис. 13.1. Пример хаотического движения:*а* — шарик в потенциальных ямах; *б* — шарик на плоскости со стенками

522

ределенной частотой вызывают колебания с широким спектром частот. Положение же на границе между ямками будет *неустойчивым равновесием*. Физический смысл этих понятий применим к равновесию любых систем. Режим функционирования динамической системы устойчив, если малые возмущения затухают со временем, стремясь к нулю. Если же они нарастают — режим неустойчивый.

Кроме того, на систему могут действовать и некоторые случайные силы, которые даже при самой малой величине за длительное время действия приведут к непредсказуемым результатам. Такие системы чувствительны не только к начальным значениям параметров, но и к изменениям положений и скоростей в разных точках траектории. Получается парадокс: система подчиняется однозначным динамическим законам и совершает непредсказуемые движения. Решения динамической задачи реализуются, если они устойчивы. Например, нельзя видеть сколь угодно долго стоящий на острие карандаш или монету, стоящую на ребре. Но тогда задача из динамической переходит в статистическую, т. е. следует задать начальные условия статистическим распределением и следить за его эволюцией. Эти случайные явления получили название динамического хаоса.

В 1963 г. метеоролог Э.Лоренц описал **новый механизм потери устойчивости**, наблюдаемый в процессе конвекции при моделировании процессов возникновения турбулентности. Он обнаружил в фазовом пространстве трех измерений (координаты — скорость и амплитуды двух температурных мод) область, которая как бы притягивала к себе траектории из окрестных областей. Попадая в область, названную им *странным аттрактором* (лат. *attractio* — притяжение), близкие траектории расходились и образовывали сложную и запутанную структуру. Переход системы на такой режим означает, что в ней наблюдаются сложные непериодические колебания, очень чувствительные даже к малому изменению начальных условий. Эта чувствительность к малому воздействию получила красочное название — «эффект бабочки». Значит, небольшие флуктуации, подобные взмаху крыльев бабочки, могут вызвать хаотические режимы. Так как две близкие траектории разбегаются в фазовом пространстве, то предсказание движения по начальным данным не может быть точным. С этим связаны трудности предсказания погоды. До Лоренца советские математики Д.В.Аносов и Я. Г.Синай установили существование таких областей и исследовали устойчивость явлений в них.

Возникновением динамического хаоса считается переход к турбулентности, поскольку течение жидкости описывается детерминистическими уравнениями. Но детерминированность подразумевает однозначную связь причины и следствия,

523

предсказуемость и воспроизводимость, а когда говорят о хаосе, понимают нечто прямо противоположное. Но это понятие не столь простое. Обратимся для примера к броуновской частице. Под действием случайных толчков со стороны соседних молекул частица будет совершать непредсказуемые блуждания, и ее траектория будет выглядеть запутанной (что и наблюдается под микроскопом). Но при многократном наблюдении можно заметить, что эта запутанная траектория не повторяется даже при одинаковых начальных условиях, что соответствует интуитивным представлениям о хаосе.

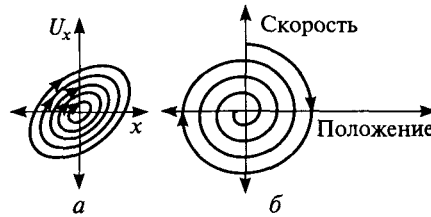
13.2. Порядок и хаос в больших системах. Понятие фрактала

Сложные системы состоят не только из большого числа элементов, но и большого числа разнообразных связей между ними. Для таких систем все труднее, а то и невозможно, вывести механизмы функционирования — у такой системы появляются свойства, которых не было у ее частей или элементов. Эволюцию динамических систем во времени оказалось удобным анализировать с помощью *фазового пространства* — абстрактного пространства с числом измерений, равным числу переменных, характеризующих состояние системы. Примером фазового пространства может служить пространство, имеющее в качестве своих координат координаты и скорости всех частиц системы. Для линейного гармонического осциллятора (одна степень свободы) размерность фазового пространства равна двум (координата и скорость колеблющейся частицы). Такое фазовое пространство есть плоскость, эволюция системы соответствует непрерывному

изменению координаты и скорости, и точка, изображающая состояние системы, движется по фазовой траектории (рис. 13.2). Фазовые траектории такого маятника (линейного гармонического осциллятора), который колеблется без затухания, представляют собой эллипсы: $mv^2/2 + (mv^2/2)x^2 = \text{const}$.

В случае затухания фазовые траектории при любых начальных значениях оканчиваются в одной точке, соответствующей точке

Рис. 13.2. Фазовая траектория маятника: без затухания (а) и с затуханием (б)



524

покоя в положении равновесия. Эта точка, или аттрактор, как бы притягивает к себе со временем все фазовые траектории. Это понятие является обобщением понятия равновесия: например, маятник из-за трения сначала замедляет колебания, а затем останавливается. На его фазовой диаграмме по одной оси откладывают угол отклонения маятника от вертикали, а по другой — скорость изменения этого угла. Получается фазовый портрет в виде точки, движущейся вокруг начала отсчета. Начало отсчета и есть аттрактор, поскольку как бы притягивает точку, представляющую движение маятника по фазовой диаграмме.

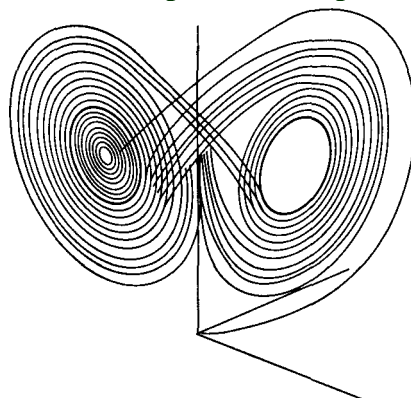
В более сложных движениях, например маятника часов с грузом на цепочке, груз играет роль механизма, подкачивающего энергию к маятнику, и маятник не замедляет колебаний. Если запустить часы энергичным толчком маятника, он замедлится до темпа, который обусловлен массой груза, после чего характер его движения останется неизменным. Если толчок будет слабым, маятник, замедляясь, вскоре остановится. Ситуации с сильным начальным толчком на фазовой диаграмме соответствует спираль, обвивающаяся все более плотно вокруг круговой орбиты, аттрактор будет в данном случае окружностью, т.е. объектом не более странным, чем точка. Разным маятникам соответствуют аттракторы, которые называют *предельными циклами*.

Все фазовые траектории, соответствующие разным начальным условиям, выходят на периодическую траекторию, которая отвечает установившемуся движению: если начальные отклонения были малыми, они возрастут, а если амплитуды были большими, то уменьшатся. Биение сердца тоже изображается предельным циклом — установившимся режимом. Если движение состоит из наложения двух колебаний разных частот, то фазовая траектория навивается на тор в фазовом пространстве трех измерений. Это движение устойчиво, а две фазовые траектории, начинающиеся рядом, будут навиваться на тор, не уходя друг от друга. Ситуация соответствует устойчивому установившемуся движению, к которому сама стремится.

При хаотическом движении фазовые траектории с близкими начальными параметрами быстро расходятся, а потом хаотически перемешиваются, так как они могут удаляться только до какого-то предела из-за ограниченности области изменений координат и импульсов. Так фазовые траектории оказываются расположенными достаточно близко друг к другу, создавая складки внутри фазового пространства. (Это возможно только при размерностях $n > 3$ — лишь в 3-м измерении начинают складываться плоские траектории.) Возникает область фазового пространства, заполненная хаотическими траекториями, — странный аттрактор. На рис. 13.3 изображен такой аттрактор, полученный Э.Лоренцом на ЭВМ. Видно, что система (изображаемая точкой) совершает быстрые нерегулярные колебания в одной области фазового пространства, а

525

Рис. 13.3. Странный аттрактор



затем случайно перескакивает в другую область, через некоторое время — обратно. Так динамический хаос «обращается» с фазовым пространством. От этих «хаотичностей» нельзя

избавиться. Они внутренне присущи системам со странными аттракторами. Хаотические движения в фазовом пространстве порождают случайность, связанную с появлением сложных траекторий в результате растяжения и складывания в фазовом пространстве. Важнейшее свойство странных аттракторов — *фрактальность*. Фракталы — это объекты, проявляющие по мере увеличения все большее число деталей. Их начали активно исследовать с появлением мощных ЭВМ. Объекты элементарной геометрии — прямые и окружности — природе не свойственны, структура вещества чаще принимает замысловато ветвящиеся формы, напоминающие обтрепанные края ткани. Примеров подобных структур много: это и коллоиды, и отложения металла при электролизе, и клеточные популяции, и форма облаков. И даже удивительно, что они долгое время были в стороне от магистральной линии развития науки. Описывая мир «языком математики», как выразился Галилей, наука использовала идеальные модели прямой, окружности и т.д., все более отдалялась от реальной природы, от «морфологии аморфного». Подобие объектов природы может выявляться по разным признакам, и математическое понятие фрактала выделяет объекты со структурами разных масштабов. Тем самым в этом понятии отражен иерархический принцип организации мира, и в некотором смысле другая идеализация его.

В одной из первых работ, выполненных в начале 60-х гг. XX в., изучалась именно такая модель. Развитие начинается с одной частицы — зародыша. Вводится правило: при касании первой частицы вторая «прилипает» к ней и остается на месте. Вторая частица может диффундировать к первой либо по случайной траектории, либо в результате обычного броуновского движения. Рост продолжается, ЭВМ описывает структуры размером до 100 тыс. частиц. Кривая зависимости между массой и радиусом подобной фигуры описывается степенным законом с показателем 2,5. Если процесс «прилипания» ограничить движением частиц только по случайным прямым, то этот показатель снижается до 2, т.е. площадь, заполненная материалом, растет как квадрат радиуса. При небольшом числе испытаний получаются как бы пятна с бахромой, а при большем росте — до нескольких миллионов частиц — эти кружева постепенно

526

исчезают, и структура вырисовывается все четче. Так, при электролизе образуется слой меди, масса которого растет не как куб радиуса (что можно было бы ожидать для металлической сферы), а по степенному закону с показателем 2,4. Получается, что «зародыш» то растет, то нет. Шарик меди тоже имеет фрактальную структуру.

Фракталы (от англ. *fractal* — дробный) имеют *дробную размерность*. Геометрию объектов, содержащих элемент случайности, описывают в рамках своеобразной дробной размерности. Термин «фрактал» был введен Б.Мандельбротом в 1977 г. в книге «Форма, случайность и размерность». Он считал, что введение фрактальных множеств позволяет объяснить и предсказать многие явления в самых различных областях. Пример — медленное впрыскивание подкрашенной краской воды в тонкий прозрачный слой вязкой жидкости между двумя близко расположенными пластмассовыми пластинками. Вода распространяется от места впрыскивания, образуя ветвящиеся радиальные узоры. Измеренная площадь прожилок растет по степенному закону как функция радиуса с показателем 1,7 (расчетная модель дает 1,68). При пробое диэлектрика тоже возникают разветвленные структуры разряда, связанные с фрактальными размерностями. Были воспроизведены и наиболее известные фрактальные формы, самовоспроизводящиеся структуры снежинок — их шестиугольные формы возникают из-за диффузии на треугольных решетках. Такие решетки были выбраны для удобства проведения численного эксперимента. К процессу роста добавляется шум — на каждом шаге точка роста определялась случайным образом из многих равновероятных вариантов. Манипулируя в математической модели вероятностями, можно управлять качеством шума, после чего проявляется анизотропия, делающая некоторые направления роста решетки предпочтительнее. Реальная диффузия молекул воды наблюдается в пространстве, окружающем снежинку.

Хаос порождает фракталы, а фазовая траектория фракталов обладает *самоподобием*, т.е. при выделении двух близких точек на фазовой траектории фрактала и последующем увеличении масштаба траектория между этими точками окажется столь же хаотичной, как и вся в целом. В программе ЭВМ это увеличение масштаба достигается уменьшением временного шага при решении динамических уравнений. Траектория броуновской частицы тоже обладает фрактальными свойствами. Множество Мандельброта воплощает достаточно общий принцип перехода от порядка к хаосу. Идея его состояла в том, чтобы вместо действительных чисел рассмотреть комплексные и наблюдать развитие процесса не на прямой, а на плоскости, т.е. увеличить и размерность от 1 до 2. Оказалось, что при переходе к хаосу важны границы между областями, и каждая точка стремится или к своему центру области (аттрактору), или остается на границе и не может принимать оп-

527

ределенные значения. С изменением параметров меняются области аттракторов и их границы. Если же граница превращается в пыль, взрываются и множества Мандельброта.

13.3. Пороговый характер самоорганизации и представление о теории катастроф

Пороговый характер самоорганизующихся процессов термодинамика связала с *неустойчивостью*: новая структура есть результат неустойчивости и возникает из флуктуаций. В «допороговом» состоянии флуктуации затухают и макроскопически не проявляются (например, в конвекционном потоке при малых температурах они рассасываются за счет сил вязкого трения). В состоянии выше порога флуктуации уже не рассасываются, а усиливаются, достигают макроскопических значений и выводят систему на *устойчивый режим*, создают новую структуру, возникающую после неустойчивости. Математически это связано с нелинейностью уравнений, описывающих систему вдали от равновесия. Если линейное уравнение имеет одно стационарное решение, то нелинейное — несколько. Система может принимать любое из этих состояний, и переход из одного в другое стационарное состояние соответствует преодолению порога.

Катастрофой называют скачкообразное изменение, которое может возникнуть в ответ на плавное изменение внешних условий. Для систем это означает потерю устойчивости. Область математики, занимающаяся катастрофами, названа *теорией катастроф*. Она является в некотором роде обобщением исследования функций на экстремум на случай многих переменных и опирается на теорию особенностей гладких отображений. Отображение поверхности на плоскость есть сопоставление каждой точки поверхности с точкой плоскости.

Исследования особенностей таких отображений начал в 1955 г. Г. Уитни, ознакомившись с работами Пуанкаре и Ляпунова, а также советских ученых — Андропова, развившего теорию бифуркаций, и Понтрягина, который ввел понятие *грубости* — структурной устойчивости системы. Важность исследований в направлении, названном К. Зиманом теорией катастроф, оценил французский математик Р. Тома. Он сформировал эту теорию и ее приложения. Сразу появились работы по применению теории катастроф к разным объектам (исследования биения сердца, физическая и геометрическая оптика, лингвистика, геология, эмбриология, гидродинамика, моделирование деятельности мозга и психических расстройств, восстаний в тюрьмах, поведения биржевых игроков и т.д.). Первые публикации по теории катастроф появились в 1970 г. Видный советский математик академик В.И. Ар-

528

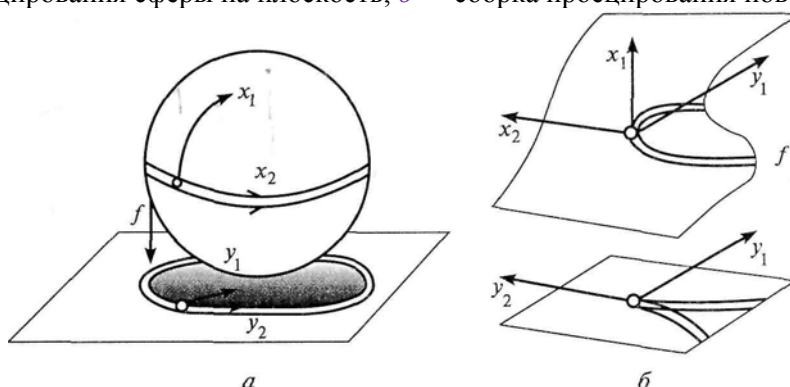
нольд так писал о них: «В журналах типа «Ньюс уик» сообщалось о перевороте в математике, сравнимом разве что с изобретением Ньютоном дифференциального и интегрального исчисления. Утверждалось, что новая наука — теория катастроф — для человечества гораздо ценнее, чем математический анализ: в то время как ньютоновская теория позволяет исследовать лишь плавные, непрерывные процессы, теория катастроф дает универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений».

Большинство окружающих нас тел ограничено гладкими поверхностями, но видимые контуры тел — это проекции ограничивающих поверхностей на сетчатку глаза. При этом могут возникать некоторые особенности: при проецировании сферы на плоскость в точках экватора образуется *складка*. На горизонтальной плоскости-проекции выделяется окружность, разделяющая сферу на внутреннюю и внешнюю, при этом точки внутренней сферы имеют по два прообраза (от двух точек сферы), а точки внешней — ни одной, точки окружности — один прообраз. При подходе с внутренней стороны к окружности два прообраза сливаются в один — это и есть особенность складки (рис. 13.4, *а*). Кроме того, Уитни нашел и другую особенность — *сборку* (рис. 13.4, *б*). Представление о ней можно получить, рассматривая устойчивость бутылки из-под молока. Уитни показал, что сборка и складка — устойчивы.

Точке экстремума соответствует равенство нулю производной при второй производной, отличной от нуля. В многомерном случае производные от функции U будут брать частные, и они должны быть равны нулю, а смешанные, т.е. вторые производные, отличны от нуля и \det

Рис. 13.4. Примеры проецирования поверхностей на плоскость:

а — складка проецирования сферы на плоскость; *б* — сборка проецирования поверхности на плоскость



529

$U_{ij} = 0$; если потенциальная функция представлена в квадратичной форме, и в случае, например, двух

переменных, $U = \sum \lambda_{ij}(c)x^2$ функция будет напоминать рельефную карту: вершины гор и седла связаны хребтами, имеются озерные впадины и седлообразные долины. При диагонализации функции выделяются направления главных осей линий максимального градиента. Если представить рельеф заполненным водой, то она соберется в озера, расположенные в низких частях долин. Минимум, притягивающий воду, получил название аттрактора, причем аттракторы разделяются хребтами, седлами, вершинами на различные бассейны притяжения.

Такая качественная рельефная картина изменится при наличии вырожденных точек, для которых одно или несколько значений $\det U_{ij} = 0$. Это условие получается при некоторых значениях управляющих параметров c_a . Если при изменении c_a система проходит через вырожденную точку, меняется вся топология, поэтому и говорят о катастрофе. При приближении к этой точке — границе перехода — критические точки рельефа начинают сближаться, а потом и вовсе сливаются. Множество точек c_a , отвечающих функции с $\det U_{ij} = 0$, разбивают пространство управляющих параметров на области с разными рельефами.

При пересечении границы областей, являющихся геометрическим местом особенностей, происходят катастрофы состояний системы. Поэтому математики искали эти области и исследовали системы на устойчивость в их окрестностях. Арнольд провел классификацию таких особенностей катастроф и получил удивительное совпадение с классификацией точечных групп, описывающих симметрию молекул, а также с правильными многогранниками в евклидовом пространстве (которыми представлял мир Платон) и простыми группами Ли. Пока причины этих взаимосвязей до конца не выяснены.

Приведем для наглядности примеры катастрофы сборки и складки. Для каждого типа катастроф рассматривается поверхность, зависящая от числа переменных и числа управляющих параметров. Обратимся к простейшей катастрофе складки (она похожа на складку на ткани) с одним управляющим параметром. Функция катастрофы задана $Cat(t, c) = x^3/3 + cx$. В области $c < 0$ все кривые подобны и имеют две критические точки; при $c > 0$ — кривые также подобны, но критических точек нет; точка c , равная нулю, в пространстве управляющих параметров является *сепаратрисой*. Катастрофы типа складки появляются в моделях нагруженных арок, триггеров, диссипативных структур, моделях релаксации.

Функция катастрофы сборки $Cat(x, a, b) = (1/4)x^4 + (1/2)ax^2 + bx$ зависит от одной переменной состояния и двух управляющих параметров. Сепаратриса сборки разделяет плоскость управляющих параметров на две области с одной и тремя критическими точками, ее линии имеют дважды вырожденные точки, а точка пересечения вырождена трижды. Потенциальные функции соответствуют некоторым точкам плоскости управляющих параметров. Модели с функцией сборки встречаются в механике конструк-

530

ций, при описании многих колебательных режимов, в динамике квантовых систем.

Теория катастроф позволяет свести огромное многообразие сложных ситуаций к небольшому числу точно изученных схем. Математические образы теории катастроф реализуются в волновых полях. Известны геометрические места точек, в которых происходит фокусировка волнового поля, называемые в оптике *каустиками*. При пересечении каустик происходит скачкообразное изменение состояния — меняется число лучей, приходящих в данную точку пространства. Для одной-двух переменных и не более пяти управляющих параметров существует семь типов элементарных катастроф. Все семь канонических катастроф имеют в каустиках свои образы. Теория катастроф, широко используемая в метеорологии, аэро- и гидродинамике, оптике, теории кооперативных явлений, квантовой динамике и др., подводит стандартную и эффективную базу под описание качественных изменений в нелинейных уравнениях, описывающих далекие от равновесия системы.

13.4. Математические закономерности эволюции. Понятие бифуркации

Если теория катастроф описывает области устойчивости структур, то развитие этой статической картины во времени дается *теорией бифуркаций*. Нелинейная система имеет целый спектр решений, и нужно определить, какие из них «ответвляются» от известного решения при изменении параметра. Изменения управляющих параметров способны вызывать катастрофические (большие) скачки переменных состояний, и эти переходы осуществляются почти мгновенно (скачком). Состояние системы, описываемой потенциалом $U(x, c_a)$, задается точкой x_b , в которой потенциал имеет минимум. При изменении внешних условий меняются управляющие параметры c , которые в свою очередь, влияют на изменения $U(x, c)$. Глобальный минимум может стать метастабильным или исчезнуть, а система перейдет из одного локального минимума в другой.

Момент перехода определяется свойствами системы и уровнем флуктуаций в ней. Выделяют два принципа: *принцип максимального промедления*, определяемый существованием устойчивого уровня, и *принцип Максвелла*, определяющий состояние системы глобальным минимумом. Каждому из принципов соответствует множество точек в пространстве управляющих параметров, в котором происходит переход из одного локального минимума в другой. Последовательность бифуркаций, возникающая с ростом неравновесности в системе, меняется, и процесс пойдет по разным

531

сценариям. Выше описано развитие турбулентности при движении жидкости по трубе в зависимости от

числа Re (пропорционального скорости потока). Движение становится неустойчивым и при больших Re характеризуется набором N колебаний с несоизмеримыми частотами $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$. Это квазипериодическое движение называют *динамическим хаосом*.

Приведем данную Л.П.Кадановым наглядную иллюстрацию перехода к хаосу, которую используют при рассмотрении биологических проблем. Пусть на изолированном острове выводятся летом насекомые численностью X_j и откладывают яйца. Потомство их появится на следующее лето численностью X_{j+1} . Рост популяции насекомых описывается первым членом в правой части уравнения $x_{j+1} = cx_j(1 - x_j)$, а убыль — вторым. При $c < 1$ популяция с ростом j вымирает и исчезает, в области $1 < c < 3$ — приближается к значению $x = 1 - 1/c$, которое получается при подстановке в уравнение вместо x_{j+1} и x_j их предельных значений; это область стационарного состояния. В диапазоне $3 < c < 3,4$ — две ветви решения, и численность колеблется между ними. Она растет резко от малого значения (откладывается много яиц). Перенаселенность, возникающая на следующий год, вновь резко снижает численность в последующем году, так что период колебаний численности — 2 года. Далее, при $3,4 < c < 3,54$ имеем уже 4 ветви, и возникает четырехстадийный цикл колебаний. Так период начинает удваиваться, и далее появляются 8, 16, 32, 64, ... ветвей.

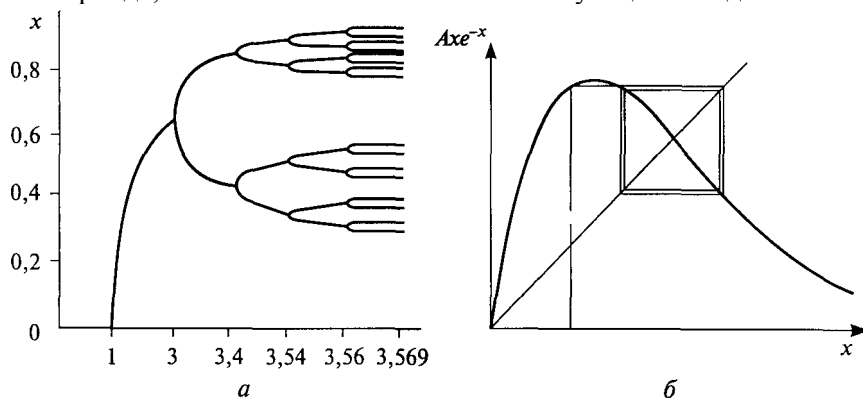
Итак, существует диапазон значений параметра c , когда поведение системы упорядоченно и периодически; происходит последовательное *удвоение* периода. Такие решения имеют место для широкого класса систем — химических, электрических, гидродинамических, механических и т.д. В 1978 г. М.Фейгенбаум нашел универсальные законы перехода к хаотическому состоянию при удвоении периода. Если выбрать соседние значения x_j в 2^n цикле, где $n = 4,66$ для всех систем, то разность между ними убывает с ростом n как a^n , где $a = 2,5$ и тоже является универсальным. Законы Фейгенбаума подтверждены на опытах в совершенно различных по своей природе системах. Иногда их называют (из-за удвоения) законами каскадов Фейгенбаума (рис. 13.5). При $c = 3,57$ период уже стремится к бесконечности, движение становится аperiodическим, поведение системы — хаотическим, происходит перекрытие различных решений. Все расчеты на ЭВМ делаются некорректными, зависящими от случайных процессов в самой вычислительной машине, решения для близких начальных условий оказываются далекими.

Сценарии перехода к хаосу могут быть и другими. Исследования сценариев связаны с анализом свойств странных аттракторов, к которым притягиваются точки (состояния системы) в многомерном фазовом пространстве. Введение понятия аттрактора — несомненная заслуга теории катастроф, как и пропаганда знаний об их бифуркациях. Сейчас к этим

532

Рис. 13.5. К пояснению законов Фейгенбаума:

a — каскад удвоений периода; b — колебания численности популяции в модели Мальтуса



терминам привыкли и фонемы речи, к примеру, называют аттракторами звукообразующей динамической системы.

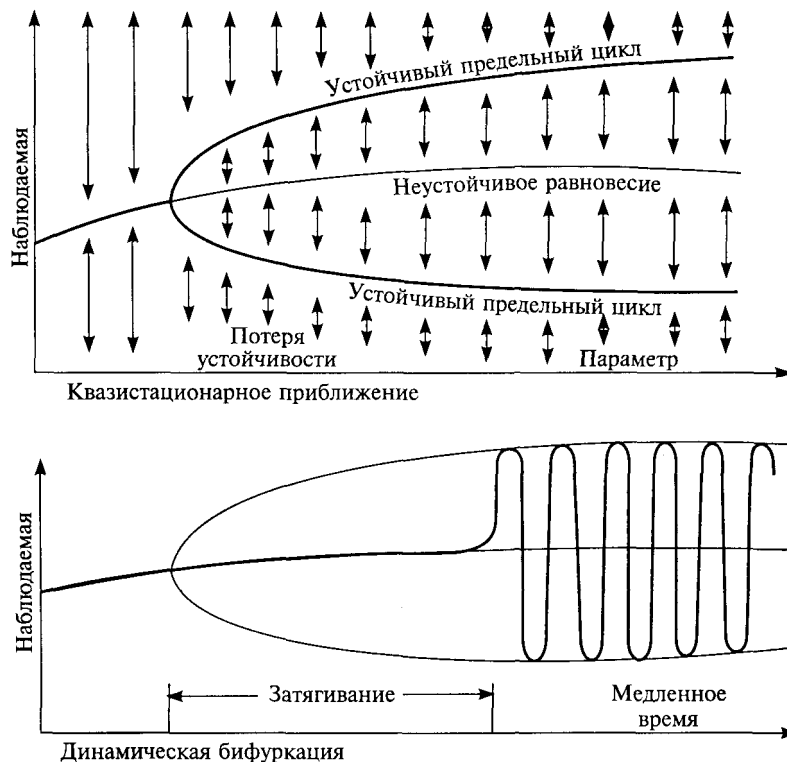
Если популяция растет так, что отношение прироста численности к общей численности остается постоянным, то говорят, что закон роста линейный, а рост — экспоненциальный. При приросте 5 % популяция увеличивает свою численность вдвое за 14 лет. Но для роста есть пределы, на что обратил внимание П. Ферхюльст еще в середине XIX в. Он заключил, что прирост должен быть нелинейным. *Уравнение Ферхюльста* используют и для описания свойств турбулентного потока при приростах около 200%. В этой области происходят колебания, и становится невозможным достижение оптимальной численности. Когда прирост превысит 245 %, происходит такое усложнение поведения систем, что возникает, хаос. Это и обнаружил Э.Лоренц для явлений в атмосфере.

Свойства аттракторов задаются набором траекторий в пространстве n переменных состояния, зависящих от времени как от параметра. В обычном аттракторе эти траектории простые, среди них есть замкнутые, называемые *предельными циклами*. В странном аттракторе траектории запутанные, не похожи ни на точки, ни на кривые, ни на поверхности; их представляют многослойными поверхностями. Странность состоит в том, что, попав в область странного аттрактора, точка (выбранное наугад решение) будет «блуждать» там и только

через большой промежуток времени приблизится к какой-то его точке. И поведение системы, отвечающее такой точке, будет сильно зависеть от начальных условий. Итак, при медленном изменении параметра наблюдается качественно новое явление затягивания потери устойчиво-

533

Рис. 13.6. Затягивание потери устойчивости при динамической бифуркации



Динамическая бифуркация

сти, описанное в 1973 г. М.А.Шишковой (рис. 13.6). В 1985 г. было показано, что это свойство имеет место во всех системах с медленно меняющимся параметром.

После прохождения параметра через бифуркационное значение, соответствующее рождению цикла или мягкому возникновению автоколебаний, система некоторое время остается в окрестности неустойчивого состояния, за которое параметр меняется на конечную величину. После этого система скачком переходит в момент бифуркации в автоколебательный режим (уже ставший жестким). Существование аттракторов с экспоненциально расходящимися фазовыми кривыми на них и устойчивость явлений установлены в начале 60-х гг. XX в. в работах С. Смейла, Д.А.Аносова, Я.Г.Синая. Независимо от этих работ Лоренц в 1963 г. описал наблюдавшийся им в численных экспериментах по моделированию конвекции в атмосфере аттрактор с разбегающимися фазовыми кривыми и указал на связь его с турбулентностью. Перепутывание частот при таком режиме оказывается принципиальным, получается, что частоты определены закона-

534

ми динамики и, следовательно, детерминированы. Поэтому и хаос назван детерминированным.

В 1975 г. американские ученые Т. Ли и Дж. Йорк опубликовали статью «Период три дает хаос», где доказали, что при некоторых условиях самопроизвольное появление моды с утроенной частотой возможно только вместе со всем остальным турбулентным спектром. Поэтому хаотический турбулентный режим имеет более сложную структуру, чем упорядоченный ламинарный. Принципиальным в теориях динамического хаоса является признание роли начальных условий, того обстоятельства, что в ходе эволюции система занимает не все точки «фазового пространства». В нем есть определенные места, «цепочки» их концентрации, статистические «аномалии», влияющие на всю микроструктуру. Исследования диалектики случайностей и регулярностей облегчаются возможностями моделирования этих процессов на ЭВМ. Исследования динамического хаоса показывают, что он способен породить не только «унылое равновесие», возникает «вторичная динамика», которую исследуют в синергетике.

Итак, в точке бифуркации поведение системы «разветвляется», становится неоднозначным. При достижении третьей бифуркации наступает состояние динамического хаоса, который скрывает внутреннюю упорядоченность. Проблема выяснения условий возникновения порядка из хаоса, по словам известного физика-теоретика Уилера, — задача номер один современной науки.

13.5. Синергетика — новый научный метод

Аналогию процессов, происходящих в сложных нелинейных системах, с фазовыми переходами отметили несколько ученых, работавших в квантовой электронике: немецкие ученые Грэхем и Хакен и итальянские —

де Джиржио и Скулли в 1970 г. Если рассматривать излучение лазера и лампы накачки, то можно сказать, что оно претерпело фазовый переход и изменило свои свойства — свет стал когерентным, более узким в спектральном отношении и усиленным по направлению испускания. Сначала такая аналогия казалась поверхностной, но с каждым параметром фазового перехода в парамагнетике удалось сопоставить соответствующий параметр квантовой генерации. Возражение, касающееся искусственности создания самого прибора, творящего эти превращения со светом, были сняты, когда открыли мазеры в космическом пространстве, где генерация происходила естественным путем.

Коллективные процессы Г.Хакен выделил во всех самоорганизующихся системах: коллективно организуются молекулы в узлах кристаллической решетки, элементарные магнитные моменты (спины) в ферромагнетике, вихри внутри жидкости, порождая види-

535

мую на макроскопическом уровне структуру. Возбуждаясь в рабочем веществе лазера, атомы самосогласованно и коллективно испускают когерентное излучение. Итак, *кооперативность* — общая черта процессов самоорганизации. Кроме того, инверсная населенность, как и неравновесное состояние в жидкостях, должна поддерживаться внешней средой, только в этом случае возникающие структуры будут устойчивы. Система должна быть открытой. Устойчивые структуры возникают при обмене с внешней средой энергией (или веществом — для биологических систем), которые могут поддержать отклонение от равновесия. Этот внешний поток не только гасит рост энтропии, но может привести к ее понижению. И еще: для самоорганизующихся систем неизменными атрибутами являются сложное движение, описываемое нелинейными уравнениями, и пороговый характер возникновения.

Эти самоорганизующиеся системы и процесс самоорганизации математически оформили следующим образом: сначала просто записали связь эффекта с его причиной в зависимости от времени, а потом исключили внешнее воздействие, предоставив систему самой себе. Хакен расширил систему так, чтобы включенные в уравнения внешние силы стали силами внутренними, и описал механизм нарастания внутренних флуктуаций с помощью введения стохастического члена. Так самоорганизация определяется характером взаимодействия случайных и необходимых факторов системы и ее среды. В дальнейшем он разработал *теорию лазерной генерации* как фазового перехода, а потом *теорию гидродинамических неустойчивостей* как фазовых переходов. Для них удалось получить не только теоретическое подтверждение факта существования ячеек Бенара, но и описание положения шестиугольных цилиндров и их диаметров. И каждый раз в этой аналогии открывались более глубокие черты. Развиваемый метод дал интересные результаты при рассмотрении фазового перехода — разрушения упругой конструкции (моста, например). Так стал работать новый метод — синергетический, основанный на идее синтеза.

Самоорганизация происходит при генерации в атомной системе. В кристалле твердотельного лазера имеются активные, возбужденные накачкой от внешнего источника атомы, которые работают как антенна и испускают цуг волн. При малой мощности накачки световые цуги испускаются независимо друг от друга, и лазер работает как обычная лампа, испуская некогерентный свет. Начиная с некоторого значения мощности накачки (*порогового*) все антенны начинают работать согласованно, атомы испускают свет в одной фазе, возникает гигантский цуг когерентного лазерного излучения, интенсивность излучения резко возрастает (на торцах кристалла — зеркала, отбирающие цуги). Переход лазера в режим генерации соответствует образованию ячеек Бенара. В сверхкритической области устанавливается стабильный режим лазера,

536

тогда как у простой лампы — неустойчивый. Очевидно, что лазер является системой, находящейся вдали от равновесия. Наблюдается кооперативное поведение атомов и излучения.

К основным свойствам самоорганизующихся систем относятся открытость, нелинейность, диссипативность. Система должна находиться в состоянии, далеком от равновесия.

Открытость системы обеспечивается непрерывным потоком вещества, энергии или информации, получаемым из внешней среды на поддержание определенного состояния. В таких системах флуктуации играют определяющую роль, могут привести к необратимому макроскопическому изменению состояния системы, разрушить созданный в ней порядок.

На *нелинейные системы* не распространяется принцип суперпозиции, т.е. возможно, чтобы совместные действия двух причин привели к результату, совершенно отличному от того, который был бы, если эти причины действовали по отдельности. Процессы в нелинейных системах носят пороговый характер — в состояниях, далеких от равновесия, слабые возмущения могут усиливаться и радикально перестроить систему. Нелинейные системы, открытые и неравновесные, сами создают в среде неоднородности. Между средой и системой может установиться положительная обратная связь (так, в реакции может вырабатываться фермент, присутствие которого стимулирует выработку его же самого). Важно найти эту петлю положительной обратной связи, и в системе начнется режим самоорганизации. В химии — это автокатализ, в молекулярной биологии — основа жизни. Системы неравновесные необычно и «чутко» реагируют на внешнее воздействие и «учитывают» их в своем функционировании. Поэтому некоторые слабые воздействия могут оказать на эволюцию системы большее влияние, чем сильные, но не адекватные собственным тенденциям системы.

Диссипативность — качественно своеобразное макроскопическое проявление процессов, происходящих

на микроуровне. Она проявляется в разных формах: в способности «забывать» детали некоторых внешних воздействий; в «естественном отборе» среди многих микропроцессов для обеспечения основной тенденции развития; в когерентности микропроцессов, устанавливающей темп развития, и пр. С диссипативностью связано понятие «параметр порядка», который выделяет только ведущие степени свободы из всех возможных для системы. Уравнения для параметров порядка намного проще, и основная задача — найти параметры порядка системы при моделировании поведения системы.

Примером возникающей самоорганизации являются вихревые структуры в виде двойной спирали, впервые обнаруженной в закрученных газовых потоках в трубке Ранка — Хилша (рис. 13.7, *а, б*) в Институте теплофизики СО РАН группой исследователей (Ю.Н.Дубнищев, В.А.Арбузов, П.П. и П.Я.Белоусовы).
Интерес

537

Рис. 13.7. Биспиральные вихревые структуры в закрученных потоках, проявляющиеся посредством визуализации поля оптической фазовой плотности (*а*) и поля скоростей в заданном сечении (*б*)

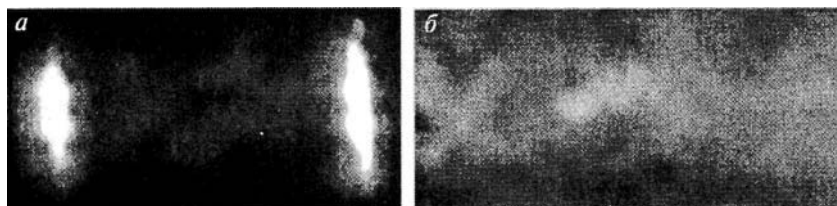
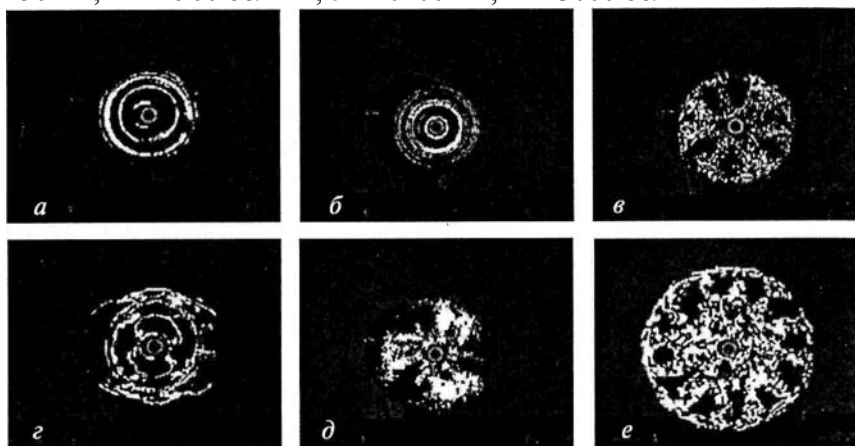


Рис. 13.8. Визуализированные волновые структуры на поверхности вращающихся пластин при различных угловых скоростях и радиусах:

а — 0140 мм, $\Omega = 700$ об/мин; *б* — 0120 мм, $\Omega = 600$ об/мин; *в* — 0140 мм, $\Omega = 300$ об/мин; *г* — 0150 мм, $\Omega = 1900$ об/мин; *д* — 0150 мм, $\Omega = 2900$ об/мин; *е* — 0200 мм, $\Omega = 3000$ об/мин



к таким системам связан с попытками построить адекватную физическую модель энергоразделения в закрученных потоках, где структуры возникают при определенных угловых скоростях. Еще один пример упорядоченных волновых структур, имеющих синергетическую природу и возникающих на поверхности вращающихся жидкостей и тонких пластин, показан на рис. 13.8.

Итак, переход от хаоса к порядку поддается математическому моделированию, причем универсальных моделей такого перехода оказалось не так много. Они пригодны в разных областях естествознания, в истории, экономике, экологии и пр. История развития природы — история образования все более сложных форм, которые обеспечивают эволюцию природы на всех уровнях организации — вплоть до самых высших. Э. Ферми и Д. Нейман в 50-е гг.

538

XX в. решали на ЭВМ задачи о возникновении *теплового хаоса* в цепочке грузов с нелинейными пружинками. Ферми, Паста и Улам (ФПУ) получили неожиданный результат: такая система описывается уравнением КдФ. Так солитоны обрели второе рождение (см. гл. 3). Они ведут себя как частицы, и были найдены в разных средах. Ярким приложением солитонной теории стало явление самоиндуцированной прозрачности, которое привело к идее «оптического телеграфа» — передачи светового солитона по стекловолокну.

13.6. Эволюционная химия. Возникновение упорядоченности в химических реакциях

Эволюционный этап развития химии, начавшийся с 60-х гг. XX в., связан с синтезом новых сложных,

высокоорганизованных соединений без участия человека. Необходимость решать эволюционные задачи у химиков возникла по следующим причинам. Во-первых, это мечта овладеть опытом «лаборатории живого организма». Во-вторых, ввести в химию идею истории, чтобы объяснить самопроизвольное восхождение от низших химических материальных систем к высшим. В-третьих, появились работы, указывающие на установленные опытным путем факты прогрессивной эволюции химических объектов через естественный отбор.

Эволюционный катализ, приведший к понятию эволюционной химии, связан с теорией А.П.Руденко. Самосовершенствование катализаторов в реакциях было открыто в работах А. Гуотми и Р. Каннингема в 1958—1960 гг. Обычно катализаторы в ходе реакции стареют, и их деятельность ослабевает, а здесь они перестраивались в сторону повышения активности и селективности. В 1964—1969 гг. А.П.Руденко, развивая идеи своего учителя А. А. Баландина о перестройке поверхности гетерогенных катализаторов под влиянием основной реакции, обобщил опыт действия катализаторов в различных реакциях и сформулировал теорию саморазвития каталитических систем. Процессы саморазвития химических систем, подводящие к *биогенезу*, тогда представлялись в русле идей А. И. Опарина. Саморазвитие систем происходит за счет постоянного поглощения катализаторами потока энергии, выделяющейся в ходе реакции. Таким образом, система является открытой, в ходе реакции происходит отбор каталитических центров с наибольшей активностью.

Освоение опыта живой природы — давняя мечта химиков. Еще Берцеллиус называл биокатализ основой основ лаборатории живого организма. Ориентацию на опыт живой природы проводили Либих, Пастер, Бертолле, Н.Н.Семенов и др. Н.Н.Семенов открыл разветвленные цепные реакции, что послужило сближению

539

химии и физики, подтолкнуло к изучению неравновесных систем. Но биокатализаторы очень быстро портятся и теряют свою активность. Встала проблема стабилизации ферментов и создания иммобилизованных ферментов — выделенных из живого организма и прикрепленных к твердой поверхности путем адсорбции. Они устойчивы, их можно использовать многократно. Эти работы были начаты И.В.Березиным.

Реакция Белоусова — Жаботинского — один из наиболее впечатляющих примеров возникновения самоорганизации в химических реакциях. В 1951 г. Б. П. Белоусов установил, что в растворе серной и малоновой кислот, сульфата церия и бромиды калия при добавлении в качестве индикатора ферроина можно следить за ходом окислительно-восстановительных реакций по изменению цвета или по спектральному поглощению. Как только все эти вещества сливают в пробирку, раствор начинает менять цвет с красного, означающего избыток Ce^{3+} , на голубой, соответствующий избытку Ce^{4+} . В зависимости от концентрации раствора цвет менялся периодически, и этот период четко сохранялся, поэтому такие реакции стали называть «химическими часами». Кривая изменения поглощения света показывала, что колебания отличаются от синусоидальных, а начиная с некоторого числа колебаний, определяемого концентрацией, спонтанно возникают неоднородности концентрации и образуются устойчивые красные и синие слои, сохраняющиеся в течение получаса. Поскольку реакция идет в замкнутой системе, она приходит в конце концов к состоянию равновесия.

Как выразился А.И. Осипов (МГУ), «можно сказать, что химический организм умирает, задущенный избытком энтропии, которую нет возможности выбрасывать в окружающую среду». Белоусов писал (1957): «В реакционной смеси возникает ряд скрытых, упорядоченных в определенной последовательности окислительно-восстановительных процессов, один из которых периодически выявляется отчетливым временным изменением цвета взятой реакционной смеси». В начале 50-х гг. это казалось невозможным. Понимание механизма происходящей реакции связано с работами А.М.Жаботинского, который с 1964 г. исследовал много сходных химических реакций. Сейчас реакция Белоусова — Жаботинского изучается, вошла в учебники и явилась толчком к развитию новой области науки, меняющей мировоззрение эпохи.

Образование структуры в жидкостях в этих химических реакциях заинтересовало И.Р.Пригожину с сотрудниками в начале 70-х гг. В ряде опытов картина изменения цвета как бы замирала, а затем возникали окрашенные слои или устойчивые пространственные структуры типа тех, которые получались в теоретической модели Тьюринга. Английский математик А. Тьюринг сформулировал задачу о возможности образования в реакторе в усло-

540

виях химической реакции устойчивых конфигураций промежуточных продуктов и построил теорию их образования (1952). Фигуры сохранялись до тех пор, пока не иссякал запас начальных веществ-реагентов. Это свойство роднило их с диссипативными структурами, которые должны непрерывно «подпитываться» энергией и веществом от внешней среды. В обеих ситуациях структуры возникали в открытой системе, находящейся в неравновесном состоянии, и при наличии внешней подпитки, а эффект достигался после преодоления некоего порогового значения меняющегося параметра. И группа Пригожина, переформулировав модель Тьюринга, создала свою, названную брюсселятором в честь города, где работали.

Они рассмотрели протекание реакции между двумя сортами непрерывно поступающих в реактор продуктов, причем количество этих веществ поддерживалось постоянным. После реакции продукты реакции выпадали в осадок, но все время в объеме присутствовали два промежуточных вещества. В реакции Белоусова промежуточные вещества периодически мерцали, создавая эффект изменения цвета раствора. Расчет дал

колебательный режим при определенном соотношении реагентов, изменение соотношений между реагентами менял характеристики колебаний концентраций промежуточных продуктов реакции.

Уравнения, описывающие этот процесс, совпали с уравнениями *автоколебательных систем* (электрических или механических).

Автоколебательные химические реакции нескольких типов были открыты в 70—80-е гг. XX в. Выход таких реакций меняется с течением времени; такие реакции были обнаружены и в живой природе. Изучение автоколебательных реакций составляет часть нестационарной кинетики. *Автоволновые процессы* — аналоги автоколебаний для распределенных систем — исследовались советскими учеными. Сам термин «автоволны» был введен одним из создателей нелинейной оптики академиком Р. В. Хохловым. Советская школа подошла к изучению явлений самоорганизации со стороны развитой теории колебаний и волн. В конце 50-х гг. в научной школе, созданной академиком Л. И. Мандельштамом, сложилось направление по *теории автоколебаний*. Эти работы продолжил академик А.А.Андронов, сформировавший Горьковскую научную школу. После того как работы Андропова получили известность, автоколебания стали обнаруживать всюду—в механике, радиотехнике, теории автоматического регулирования, химии, биологии, экологии. В это время в МГУ теорию волн развивали Хохлов и С.А. Ахманов, создавший к 70-м гг. свою школу *нелинейной оптики*.

Автоволны — это самоподдерживающиеся волны, которые распространяются в активных средах или средах, поддерживаемых энергетически. За счет внутренних источников среды автоволны способны поддерживать свои характеристики, поэтому автоволны были открыты при химических реакциях, реакциях горения, при пере-

541

даче возбуждения по нервным волокнам, мышцам, сетчатке глаза, при анализе численности популяций и т.д. Волна возбуждения движется по возбудимой среде без затухания, потери на диссипацию полностью поддерживаются подводом энергии извне.

Пример распространения автоволны — распространение фронта горения. В 1938 г. Зельдович и Франк-Каменецкий установили, что в однородной среде фронт горения движется с постоянной скоростью, определяемой параметрами среды и не зависящей от начальных условий, кроме того, остается неизменной и форма профиля этой волны. Для полной аналогии с биологической задачей нужно было наделить среду способностью к восстановлению. Оно имеет место при сгорании травы в степи — после сгорания (третьей стадии) трава вновь отрастает, так что степь может гореть вновь. Сегодня процессы типа горения с восстановлением лежат в основе исследования почти всех возбудимых сред. В реакции Белоусова—Жаботинского осуществляется процесс окисления с последующим подавлением его за счет выделения ингибитора. При горении вместе с повышением теплоты тоже может выделяться какое-то вещество, подавляющее горение. Если выделение ингибитора произойдет быстро, то он может прервать процесс горения, и для продолжения процесса нужно будет запускать новую волну и продолжать это до тех пор, пока не будет израсходовано все горючее. Длительность рефракторного состояния определяется временем, которое необходимо для рассасывания ингибитора (например, дыма).

При хорошем перемешивании продуктов в объеме модель сильно усложняется (ее называют точечной), но устойчивые во времени и пространстве структуры промежуточных продуктов сохраняются. Эти структуры спонтанно возникают под действием термодинамических сил в далекой от равновесия системе, когда ее параметры превышают критические значения, т.е. происходит перестройка в системе, называемая самоорганизацией. Группа Пригожина создала модель для изучения волновых явлений реакции Белоусова—Жаботинского, названную ими реакцией в системе БМФ (аббревиатура от слов: бромид — броммалоновая кислота — ферроин). В ней могут быть *самовозбуждающиеся волны*, или говорят об образовании волнообразных пространственно-временных диссипативных структур. Волна концентрации возникает в начале реакции, отражаясь от стенок реактора, ее источник — мелкие неоднородности среды или небольшие повышения концентрации кислоты, т.е. случайные неоднородности или флуктуации, которые до некоторых пор гасятся силами внутренней инерции. Помещая мелкие неоднородности в раствор, можно управлять этими волнами, делать их сферическими или спиральными.

Открытие Белоусовым **колебательной реакции** И.Пригожин назвал «одним из важнейших экспериментов нашего века». Колебательная реакция имеет в своей основе два типа молекул,

542

способных превращаться друг в друга. При хаотических столкновениях молекул был бы получен усредненный цвет, что и наблюдается вблизи равновесия. Вдали от него происходит иное — раствор меняет окраску синхронно. Получается, что молекулы как бы устанавливают связь между собой на больших расстояниях через большие промежутки времени, т.е. есть сигнал, на который молекулы действуют разом, система реагирует как целое. Раньше такое поведение считали присущим только живому. Пригожин рисует картину поведения систем с большим числом взаимодействующих субъединиц как вблизи равновесия, так и в удалении от него. При удалении от равновесия система «теряет иммунитет к возмущениям», становится неустойчивой, и если эти возмущения (автокатализ) достаточно сильны, система достигает точки бифуркации, в которой ее отклик на внешнее воздействие становится неоднозначным, возврат к начальным состояниям необязательным. Происходит необратимый переход в новое, *когерентное*, состояние: система приобретает

новую диссипативную структуру (образованную за счет рассеяния — диссипации — энергии). Суть когерентности — в «коллективной стратегии поведения» субъектов системы. Затем система может пройти и следующие точки бифуркации, приобретая черты историзма. Так начался новый уровень познания природы — эволюционный.

Подходы к проблеме **химической эволюции** И. Пригожина и А. П. Руденко основаны на неравновесной термодинамике, но отличаются по самоорганизующимся объектам. Пригожин исследует макросистемы с целью доказательства возможности самоорганизации. Поэтому он не описывает химическую эволюцию с естественным отбором. Руденко исследует самоорганизацию макросистем с целью воссоздания хода химической эволюции через отбор для выяснения биогенеза.

13.7. Возникновение самоорганизации в морфогенезе

Разрывной характер образования видов следует из анализа уравнений популяционной генетики, и этот процесс подобен *фазовому переходу* (М. В. Волькенштейн, Б. Н. Белинцев). Время существования вида гораздо более продолжительно, чем время его образования. На каждом скачке возникают новые признаки, часть из которых становится объектами отбора на той или другой стадии адаптации. Нуклеиновые кислоты и белки меняются постепенно, путем точечных замещений. В процессе образования видов и макроэволюции меняются качество белка, место и время его работы в организме. Поэтому и важна регуляция работы генов, о которой пока мало известно, поскольку регуляторные вещества функционируют в очень малых количествах.

543

Существует связь между историческим развитием (филогенезом) и индивидуальным развитием организма (онтогенезом). Образование структур в онтогенезе означает изменения в пространственном использовании основных клеточных механизмов, но не самих механизмов. Так, главные типы клеток позвоночных почти не изменились за 500 млн лет, менялись условия существования клеток от вида к виду. При этом важна *позиционная информация* (ПИ) — этот термин введен Л. Вольпертом (1969). Каждая клетка воспринимает информацию в соответствии со своей генетической программой, и различия в строении организмов определяются уже не самими клетками, а их относительным расположением. Позиционная информация предполагает наличие некоторого физического свойства, которое диктует выбор режима функционирования и пространственной ориентации, после чего начинается стадия трансляции ПИ. Такой подход позволяет разобраться в механизмах становления пространственной упорядоченности клеток, отвлекшись от деталей процессов внутри них.

Морфогены — специальные белковые молекулы — сообщают ПИ. Они могут подавлять или активизировать работу регуляторных генов. Морфогены образуют и *морфополя* — совокупности физико-химических процессов, протекающих в далеких от равновесия открытых системах. Математические модели таких процессов дают решение, которое показывает, что в первоначально однородной системе неоднородности (пространственные и временные) порождают упорядоченность. При этом неоднородности являются продуктом диффузии и автокаталитических реакций, происходящих с разными скоростями для разных веществ.

Механизм формирования пространственной упорядоченности в онтогенезе многоклеточных организмов принципиально по-новому объяснял почти 50 лет назад английский математик А. Тьюринг, когда почти ничего не знали о молекулярных процессах в клетке. Тьюринг показал, что однородное распределение химических реагентов по объему химического реактора при определенных условиях становится неустойчивым, и у системы появляются новые, коллективные черты поведения — в ответ на сколь угодно малые возмущения она покидает исходное состояние и эволюционирует в новое. Тьюринг выделил условия возникновения самоорганизации. Клетки могут свободно перемещаться и взаимодействовать друг с другом. При гидролитическом расщеплении АТФ выделяется энергия, которая служит источником работы. Малые изменения в поле морфогенов, изменения времени и места действия регуляторных генов приводят к существенным изменениям строения целого организма. Пример тому — человек и шимпанзе. Их белки и клетки почти одинаковы, отличия в последовательности аминокислот в 44 белках составляют не более 1%. Итак, регуляция синтеза белков определяет вид, а не

544

сами белки. Поэтому и направленная эволюция требует меньшего времени, чем потребовалось бы при простом переборе изменений в геномах.

Гены не постоянны, они могут изменяться не только замещениями нуклеотидов в геномах вследствие мутаций, но и из-за переноса генов внутри хромосом, от одной хромосомы к другой, от одного организма к другому. Это «непостоянство генома» ускоряет эволюцию и говорит о *единстве всего живого*. Генетические элементы могут перемещаться «по горизонтали», что используется в генной инженерии. Например, кишечную палочку «научили» синтезировать инсулин и интерферон. Все функции клетки и организма определяются белками, т.е. цепями из 20 типов аминокислотных остатков. Эти цепи могут сворачиваться в глобулы, достаточно плотные образования, похожие на несимметричные кристаллы. Для синтеза белков необходимы РНК и ДНК, служащие матрицами для сборки цепей. Нуклеиновые кислоты состоят из четырех сортов

нуклеотидов. Структурный ген — участок цепи ДНК, ответственный за синтез одной белковой цепи. Нуклеиновые кислоты представляют законодательную власть клетки, белки — исполнительную. В процессе эволюции меняются гены и соответствующие белки.

Эволюцию на молекулярном уровне позволяет проследить сопоставление однотипных белков разных видов организмов, можно построить и *эволюционное древо* на основе состава белка. Различие может быть связано с естественным отбором, но отбор определяется биологическими функциями белков, фенотипами. Однако не всегда однозначна связь «текста» первичной структуры цепи и пространственного строения белковой глобулы с биологической функцией белка. Не все мутации белков ведут к изменению их функций, часть их оказывается нейтральной. По теории *нейтралистской молекулярной эволюции* японского генетика М. Кимуры (1968) скорость эволюции белка не зависит от размера популяции, причем активная часть цепи эволюционировала медленнее, чем ее «каркас». Скорость эволюции белка за год он выражал отношением числа замещенных аминокислотных остатков к одному остатку. Она оказалась постоянной для разных линий эволюции при сохранении функций и пространственной структуры молекулы. Величины скоростей замещений были меньше 10^{-9} . Значит, время существования Вселенной недостаточно для построения макромолекул, если бы положение каждого звена фиксировалось отбором.

Выводы Кимуры об эволюции белков и нуклеиновых кислот не следует распространять на естественный отбор, относящийся к организмам. Нейтральность мутаций в «каркасе» белка во многом предопределена его строением и кодированием. Эволюция макромолекул отличается от эволюционного поведения организмов. Гомеостаз ведет к тому, что многие вредные мутации ведут себя

545

как нейтральные. Например, одна из мутаций ухудшила свойства белка-фермента, и он стал перерабатывать субстрат медленней. Тогда организм исправит ситуацию каким-то способом, может быть, увеличит количество этого ослабленного фермента.

Математические модели могут изменить представление биологов об *истоках упорядоченности* в эволюции. Ведь все живые организмы являются строго упорядоченными системами. Они обладают сложными структурами, которые поддерживали и воспроизводили себя благодаря слабо выраженному взаимодействию химических и поведенческих процессов. Со времен Дарвина биологи рассматривали естественную эволюцию как основной источник порядка.

13.8. Моделирование отношений между трофическими уровнями в биоценозах

Между видами существует связь, основанная на конкуренции за места обитания, за пищу и на «сожительстве» (например, лишайники как симбиоз грибов и водорослей). Широко распространена связь «паразит — хозяин», а также передача наследственных признаков через вирусы и бактериофаги (у бактерий).

В современной биологии одно из центральных мест занимают проблемы кооперативных эффектов и самоорганизации, соотношения «случая» и «необходимости». С появлением понятий биоценоза и биогеоценоза в биологических исследованиях стали применять методы математического моделирования, а использование ЭВМ для анализа процессов в сложных системах существенно обогатило науку о биосфере и экологию.

По распределению и численности видов имеется огромная информация, но ее нужно перевести на математический язык. Вводят «макроскопические характеристики», описывающие популяцию. Это число особей, соответствующее параметру порядка сложной системы. Оно «управляет» судьбой особей «в среднем». Если n — число особей (их плотность), то изменение n от скорости (числа) рождений g и числа смертей d можно записать как $dn/dt = g - d$. В простейшем случае $g = \gamma n$, $d = \delta n$, где коэффициенты не зависят от общей численности, а определяются доступностью пищи, климатическими условиями и т.п. Если эти внешние условия поддерживаются постоянными, то уравнение $dn/dt = \alpha n = (\gamma - \delta)n$ описывает растущую или убывающую по экспоненте популяцию. Значит, стационарного решения у этого уравнения нет, и рост не зависит от плотности, поэтому внешние условия должны зависеть от плотности. Наиболее важным из всех факторов, которые мы проигнорировали, вероятно, является истощение источников питания, который можно учесть введением

546

в уравнения члена $-\beta n^2$ (здесь предполагается, что пища поступает с постоянной скоростью). Тогда получается *уравнение Ферхюльста*: $dn/dt = \alpha_0 n - \beta n^2$.

При этом могут встретиться ситуации: «конкуренция—сосуществование»; «хищник—жертва»; «симбиоз». При сосуществовании различные виды не питаются одной и той же пищей, не поедают друг друга, размножаются в разных местах. Тогда уравнения для численности записываются как $dn/dt = \alpha_1 n - \beta n^2$, $dm/dt = \alpha_2 m - \beta m^2$. Ситуация усложняется, если виды живут или пытаются жить за счет одного и того же источника пищи или зависят от одних и тех же жизненных условий. Пример: растения, извлекающие фосфор из почвы. При этом одни растения закрывают листьями другие, лишая их солнечного света, или другой пример — птицы, которые строят гнезда в одних и тех же дуплах, и т.п. Математически это соответствует установлению генерации в лазере или автокаталитической реакции между двумя группами молекул. Решение показывает,

что выживет только один тип, наиболее приспособленный. Это выживание может быть достигнуто улучшением индивидуальных констант и адаптацией. Если перекрываются источники пищи N, M :

$$dN/dt = \gamma_1(N_0 - N) - \mu_{11}n - \mu_{12}m,$$

$$dM/dt = \gamma_2(M_0 - M) - \mu_{21}m - \mu_{22}n,$$

где $\gamma_1 N_0$ и $\gamma_2 M_0$ — скорости поступления пищи; $(-\gamma_1 N)$, $(-\gamma_2 M)$ — убыль пищи за счет внутренних причин типа гниения. Рассматривая правые части уравнений («силы») в плоскости n, m , можно найти условия, при которых возможно сосуществование. Обобщение на случай многих видов и источников пищи производится аналогично. Поэтому понятно, какую важную роль играют экологические ниши для выживания видов и почему виды так приспособлены к ним. Примером такого сосуществования служит распределение растительности по высоте, что изучается специально в биогеографии. Эта модель проста, но позволяет сделать оценки относительно динамики популяций при введении еще одного параметра, отвечающего за появление новых видов.

Гены могут претерпевать мутации, образуя аллели. Мутации происходят случайно, но частота их может меняться под воздействием внешних факторов (повышение температуры, добавление химических агентов, ультрафиолетовое облучение и т.п.), поэтому можно считать, что мутации оказывают «мутационное давление», благодаря которому возникают особи новых типов. Новые свойства сначала будут рецессивными и только через несколько поколений станут доминантными.

Пусть число особей новых типов, возникших из-за случайной мутации, равно u . Их показатели рождения и гибели иные, и но-

547

вая популяция возникнет только при наличии флуктуаций, которые будем описывать некой флуктуирующей силой и введем ее в уравнения роста популяций:

$$dn_j/dt = \gamma_j n_j - \delta_j n_j + F_j(t).$$

Пусть функция $F_j(t)$ зависит от прежней популяции и факторов окружающей среды. Такие уравнения можно записать для разных типов, возникающих в системе. Так, система «подвидов» подвергается «давлению отбора», и это можно учесть, используя вышеприведенные уравнения, если считать, что условия окружающей среды (пища, например) остались прежними. Тогда для любого из подвидов, пользующихся тем же источником пищи, получим уравнение:

$$dn_j/dt = \alpha_j(g_0 - \sum g_i n_i) n_j - \chi_j n_j + F_j(t).$$

Если скорость мутаций у определенных видов мутантов мала, то выживут только наиболее приспособленные. Как отмечал Хакен, размножение видов можно заменить циклом $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots$, который постулировался при описании эволюции макромолекул. Итак, возникновение новых видов благодаря мутациям (флуктуирующей силе) и отбору (вынуждающей силе) можно рассматривать как аналог неравновесного фазового перехода второго рода, т. е. аналогично процессам в лазере.

Модель Вольтерра—Лотки была одной из первых экологических моделей. В любом биоценозе происходит взаимодействие между всеми его элементами: особи одного вида взаимодействуют с особями и своего вида, и других видов. Эти взаимодействия могут быть мирными, а могут иметь связь типа «хищник-жертва». Было замечено, что численность хищных рыб колеблется в обратной пропорции относительно колебаний численности мелких рыбешек, которые служат им пищей. Анализ этих колебаний позволил математику Вито Вольтерра вывести (1926) уравнения, описывающие этот процесс. Если бы в биоценозе было только два вида (очень большое упрощение), то и в этом случае динамика численности каждого из видов сильно отличалась бы от картины их независимого существования.

Примером анализа таких структур может служить эволюция численности зайцев и волков, которая характеризуется колебаниями во времени. Изменение численности животных установлено по числу заготовленных шкур. Абстрагируясь от различных обстоятельств, так или иначе влияющих на численность зверей, можно проанализировать важнейшую зависимость: зайцы едят траву, а волки — зайцев. Если бы жили одни зайцы и корма было достаточно, то их численность росла бы по экспоненциальному закону, а если бы жили только волки, то они вымирали бы. При их совместном существовании скорость изменения численности зайцев и волков связа-

548

на с частотой их столкновений, т. е. пропорциональна количеству тех и других с некоторым коэффициентом. Уже эти соображения приведут к системе уравнений, и при определенных условиях система «хищник—жертва» придет в равновесие.

В случае неожиданной флуктуации (смерть волка или зайца, отстрел во время охоты и т.д.) равновесие нарушается и система приходит в движение. Она ведет себя как *колебательная система*, численности «хищников» и «жертв» начинают колебаться синфазно, с отставанием. Объяснение простое: рост численности зайцев приводит к увеличению питания для волков, но уменьшает количество травы, так что вскоре численность волков вырастает, а зайцев — уменьшается. Количество травы увеличивается, но запасы пищи для волков уменьшаются, и их численность падает. Тогда поголовье зайцев снова растет, и процесс повторяется. Режим колебаний с определенным периодом оказывается *устойчивым*. Такая система

описывается уравнениями: $dn/dt = \alpha_1 n - \alpha_1 m$, $dm/dt = \beta m n - 2\chi_2 m$, где первое уравнение описывает количество жертв n , второе — количество хищников m . Эти уравнения имеют периодическое решение. Стационарное решение соответствует полному вымиранию, и оно единственное устойчивое. В природе такое может случиться, но биологи указывают на возможность животных-жертв найти убежище, не доступное хищникам, так что некоторая часть их выживет. Модель может усложниться введением нескольких типов жертв, которыми может питаться один хищник, и другими вариантами.

Ситуация «симбиоз» тоже моделируется, как и ситуации «хищник—жертва» и «конкуренция — сосуществование». Симбиоз отражает кооперацию отдельных видов в борьбе за существование, когда один вид помогает или покровительствует другому (как, например, кооперация пчел или деревьев). Поскольку скорость размножения одного вида зависит от наличия другого, то, пренебрегая внутривидовым подавлением $-\beta_1 n^2$ и $-\beta_2 m^2$, имеем:

$$dn/dt = (\alpha_1 + \alpha'_1 m)n - \delta_1 n,$$

$$dm/dt = (\alpha_2 + \alpha'_2 n)m - \delta_2 m.$$

$$dn/dt = (\alpha_1 + \alpha'_1 m)n - \delta_1 n,$$

$$dm/dt = (\alpha_2 + \alpha'_2 n)m - \delta_2 m.$$

Здесь стационарный случай соответствует $n = m = 0$. В этих простых схемах не хватает очень многих факторов — смены климата и погоды, связи возраста особи и смертности, колебаний запасов пищи в разное время года и на разных территориях и т.д. Но использование даже простых моделей при разных, эмпирически учтенных тех или других параметрах дает интересные результаты.

Строя математические модели и проводя полевые испытания, ученые пытаются понять, каким образом паразиты и их хозяева коэволюционировали в тесные сообщества. Компьютерные модели этих процессов соответствуют «гонке вооружений» в ходе эво-

549

люции. Паразиты должны все время приспосабливаться, чтобы получить от хозяина больше ресурсов для роста своей популяции, а хозяин всячески старается этого не допустить. Биологи-эволюционисты считают, что существование полов с эволюционной точки зрения неудачно, и половые различия должны бы постепенно исчезнуть, но этого не происходит. Вероятно, потому, что пол является неким «секретным оружием», сохраняющим большую устойчивость хозяина: ведь паразит приспосабливается обычно к определенному его типу. Как только хозяева становятся жертвами, численность менее распространенных типов хозяев увеличивается, и наоборот. Исследования 90-х гг. XX в. показали, что бесполое рыбы чаще поражаются паразитами, чем разнополые. Те же результаты получены и на птицах — наличие паразитов наносит ущерб яркому оперению, и самки не выбирают таких самцов.

Созидательный характер симбиоза показала Л. Маргулис, исследуя роль естественного отбора в эволюции. Она предположила, что эукариотические клетки, имеющие внутренние органеллы, произошли от симбиоза более простых безъядерных клеток. Митохондрии и хлоропласты содержат иные гены, чем ядра клеток эукариот, но похожи на гены некоторых бактерий. Возможно, им не нужно было изобретать дыхание и фотосинтез методом «проб и ошибок». Большинство травоядных животных зависят от микроорганизмов, живущих в их кишечнике и переваривающих потребляемую животными клетчатку. Эволюционную схему, показывающую, как травоядные животные могли развиваться от симбиоза их предков и микроскопических паразитов растений, очертил П. Прайс. Паразит приобрел способность производить ферменты для переваривания веществ, составляющих организм его хозяина-растения. Животное, вступив в симбиоз с паразитом, смогло использовать для себя продукты ферментации растительной массы. Успех в освоении новых пищевых ресурсов обеспечил преимущества в естественном отборе таких животных. Жизнь даже небольшого озера невероятно сложна и многообразна, так что описать и «проверить алгеброй» эту достаточно простую систему почти невозможно, хотя такие попытки имеют место. Во многих странах разработаны системы моделирования гидробиоценозов — акватории, соединенные напрямую с ЭВМ, которые сами ведут наблюдения и подсчитывают объекты, т.е. система сама корректирует модель. Например, для учета химико-биологических превращений нужно знать интенсивность роста водорослей, фотосинтеза, смертность каждого вида, скорость разложения органического вещества. Конечно, такие разработки очень дороги, но в конечном счете обещают значительный экономический результат.

Химическое равновесие в биосфере опирается на биотический круговорот. Хотя отдельные циклы изучены недостаточно, ясно, что система находится на грани порядка и хаоса и может быть выведена из этого состояния неустойчивого равновесия даже малым воздействием. Ряд ученых (Л.Маршалл, М.И.Будыко, Л.Беркнер и др.) считают, что резкое уменьшение углекис-

550

лоты в атмосфере с появлением фотосинтеза приводило к похолоданию и оледенению Земли и, естественно, к нарушению существовавших циклов. Собственно, это сейчас и делает индустриально вооруженный человек. Биосфера сформировалась по своему плану, без участия человека, и биогеоценозы пока еще находят резервы, чтобы справиться с вмешательством человека, но неизвестно, насколько их хватит.

Качественно новый этап развития биосферы начался с появлением человека в конце третичного периода, хотя сначала его деятельность мало отличалась от деятельности других существ. Беря у биосферы все необходимое, человек отдавал ей то, что могли использовать другие, т.е. включился в биотический круговорот. Добывание огня выделило человека из ряда других животных. При этом человек не только сумел расселиться в районы холодного климата, пережить оледенения и защититься от хищников, но и научился

уничтожать органические остатки, заменив в чем-то микроорганизмы. Так с малых шагов началось ускоряющееся изменение равновесия в биосфере.

13.9. Элементы теории самоорганизованной критичности

Системы, состоящие из многих взаимодействующих элементов, постоянно самоорганизуются и могут достичь некоторого критического состояния, в котором даже малое событие вызывает цепную реакцию, могущую привести к катастрофе. Когда происходит что-то непредвиденное или катастрофа, то всегда ищут причину. Например, когда узнали о гибели динозавров по отпечаткам на окаменелостях, одни палеонтологи приписали их исчезновение падению крупного метеорита, другие — извержению вулкана. Землетрясение геологи связывают с неустойчивостью вдоль разлома земной коры. Когда рушится рынок акций, находят где-то неконтролируемую продажу товара.

При исследовании сложных систем часто пользуются теми же методами, что и при исследовании простых систем, так как они хорошо разработаны и проверены. Большую систему делят на малые подсистемы, изучают каждую из них по отдельности и считают, что реакция или отклик в каждой из них пропорционален внешнему возмущению. Описывают динамику больших систем в терминах равновесного состояния, которое изредка нарушается внешним воздействием. Но оказалось, что многие хаотические системы не поддаются такому анализу. П. Баком, К. Визенфельдом и Ч.Тангом (США) была разработана теория *самоорганизованной критичности*.

Согласно этой теории, многие составные части системы эволюционируют естественным образом к критическому состоянию,

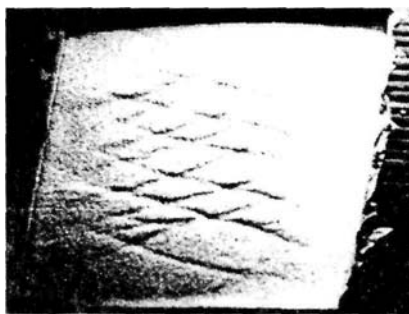
551

в котором малое возмущение может вызвать цепную реакцию, способную повлиять на любое число элементов системы. И хотя в составных частях происходит больше незначительных событий, чем катастроф, цепные реакции разных масштабов вошли в динамику системы, т. е. малые события вызывает тот же механизм, что и крупные. Кроме того, составные части системы не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Считается, что глобальные характеристики не зависят от микроскопических механизмов, поэтому их нельзя понять, разбивая систему на подсистемы и анализируя их отдельно. Эта модель исследовалась и улучшила понимание процессов в эволюции земной коры, на рынке акций, в экосистемах и других больших системах, которые ранее анализировали по частям.

Идея теории самоорганизованной критичности началась с наблюдений и опытов с кучей песка. Г.Хелд, проводивший эксперименты по компьютерному моделированию, разработал устройство, которое медленно и равномерно — по одной песчинке — насыпало песок на круглую подложку. Песчинки сначала оставались в месте падения, потом громоздились в кучу, а когда склон становился очень крутым и достигалось критическое состояние, одна песчинка вызывала катастрофу. Песчинка падала сначала спокойно, но, достигнув неустойчивых песчинок, вызывала лавину — разновидность цепной реакции или ветвящегося процесса. Как только «активные» песчинки скатывались с кучи, процесс прекращался. Куча сохраняла свою крутизну и высоту, потому что вероятности прекращения активности и ее ветвления в среднем равны. Если крутизна будет меньше критической, то лавины будут слабее, а при большей кривизне — значительно возрастут.

Эксперименты с мокрым песком показали, что сначала лавины будут меньшего размера, чем в сухой куче, и крутизна превзойдет критическую, но затем резко произойдут обвалы и падения. Такая система неустойчива по многим параметрам, а ее критическое состояние весьма устойчиво («суб- и суперкритические» крутизны стремятся стать «критическими», сбрасывая лишние песчинки). Хотя песок сыплется с постоянной скоростью, его количество меняется со временем, и график этой величины — хаотический сигнал разных длительностей. Возникающие при этом структуры, полученные при различных типах деформации мокрого песка в Институте горного дела СО РАН (Новосибирск, 1984), упорядочены (рис. 13.9).

Рис. 13.9. Упорядоченные структуры, возникающие на поверхности песка при развитии сдвиговых деформаций



Сигнал называют *фликкер-шумом* или *шумом мерцания* типа

552

$1/f$, если прошлые события в памяти сохраняются. «Белый», или «случайный», шум означает отсутствие корректировки динамики с прошлыми событиями. Шум мерцания широко распространен в природе: в активности Солнца и излучении галактик, в протекающем через резистор токе, в потоке воды в реке. Шум

мерцания содержит наборы всех длительностей и всех амплитуд сигналов, возникающих, когда система, находящаяся в критическом состоянии, порождает цепные реакции всех амплитуд и длительностей.

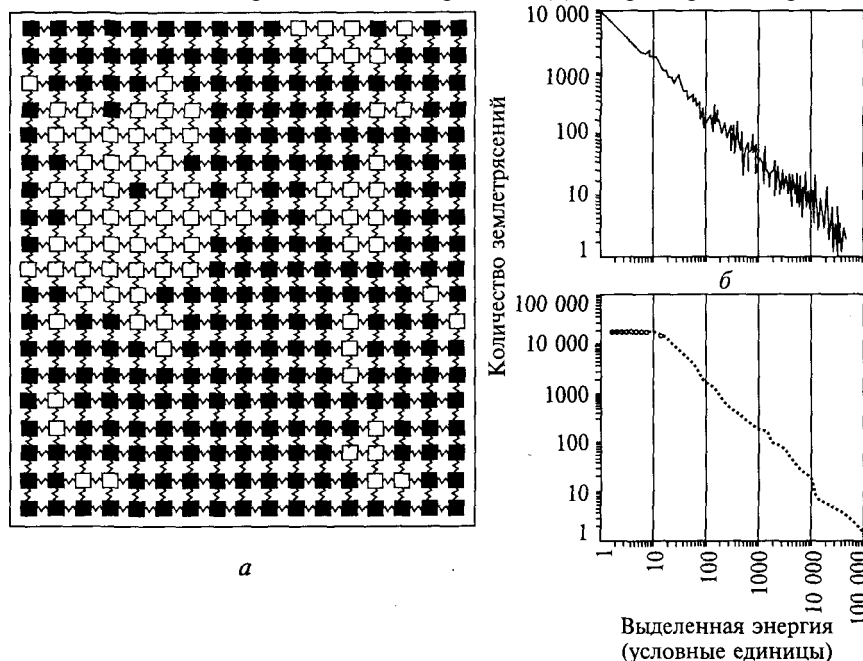
Построенная в то же время математическая модель помогла понять динамику землетрясений, экосистем и турбулентности в жидкости. Еще в 1956 г. геологи Бено Гутенберг и Чарлз Рихтер (введший шкалу Рихтера) установили закон связи числа сильных и слабых землетрясений, который носит их имена. Согласно этому закону, число землетрясений, высвобождающих за год определенное количество энергии E , пропорционально E^{-b} , где $b \approx 1,5$, и не зависит от географического района. Следовательно, сильные землетрясения происходят реже слабых, и все они связаны с одним и тем же процессом. В качестве последнего обычно называют *механизм проскальзывания*: блоки коры слипаются, а затем скользят относительно других блоков, образуя разломы. При скольжении блоков возникшее напряжение снимается и распространяется на соседние районы.

Этот механизм был проверен на опытах, поставленных В. Бобровым и М. Лебежкиным, наблюдавшими «землетрясения», амплитуда и частота которых были связаны степенным законом. Они провели опыты с алюминиевым и ниобиевым стержнями и получили близкие результаты, хотя механизмы процессов в земной коре и модели отличались. Потом была создана компьютерная модель земной коры, состоящая из двух плит, — упругой и жесткой, взаимодействующих посредством трения. На этой модели результаты проверялись несколько раз, при этом записывались распределения сил до и после взаимодействия, а не детали динамики. Сначала регистрировались слабые «землетрясения», потом система эволюционировала к критическому состоянию, в котором регистрируются как слабые, так и сильные «землетрясения». Равномерное увеличение силы в целом уравнивалось высвобождением ее на границе. Энергия, выделяемая во время землетрясения, связана в модели с числом событий проскальзывания, происходящих после возникновения одиночной неустойчивости в каком-то «эпицентре». Если подсчитать число землетрясений каждой величины за длительный период, то получается закон Гутенберга—Рихтера (рис. 13.10). Катастрофические землетрясения представлены частью графика, относящейся к более высоким значениям энергии, а слабые — к низким. С. Обухов показал, что в четырех и более измерениях отдельные ветвящиеся процессы не-

553

Рис. 13.10. Модель землетрясения

(а), график расчетов модельных экспериментов землетрясений (б) и характеристики реальных землетрясений (в)



зависимы и $b = 1,5$. Это подтверждает предположение о том, что земная кора находится в критическом состоянии.

Эта модель не только объясняет эволюцию землетрясений, но и описывает распределение их эпицентров. Степенные законы и ранее применяли для анализа распределений таких объектов, как горы, облака, галактики, вихри в турбулентных потоках. Показатель степени числа r вычисляется по числу объектов внутри сферы радиуса r . Такое распределение называют *фракталом*, и число фракталов в природе велико. Авторы описываемой теории считают фракталы мгновенными «срезами» самоорганизующихся критических процессов. Фрактальные структуры и шум мерцания — пространственные и временные «отпечатки» самоорганизованной критичности.

Задача прогнозирования землетрясений осложнена зависимостью от начальных условий; кроме того, иногда сказывается влияние событий, далеких от эпицентра. Численные эксперименты показали, что неопределенность начальных условий растет со временем по степенному, а не по экспоненциальному закону, как в системах с развитым хаосом, т.е. соответствует эволюции на грани хаоса или состоянию «слабого

хаоса». В этом проявляется самоорганизованная критичность, и поэтому некоторые

554

прогнозы возможны. Например, если погода есть явление хаотическое и 100 обсерваторий собирают достаточно информации на двухдневный прогноз, то 1000 обсерваторий могли бы обеспечить прогноз на четыре дня. Если погода — явление слабохаотическое, то 1 000 обсерваторий обеспечили бы прогноз на 20 дней вперед. Вместо погоды можно говорить о куче песка или землетрясениях. Например, если известно, что распределение автомобилей на дорогах описывается шумом мерцания, то движения с попеременными остановками и троганием с места можно рассматривать как критические лавины, которые распространяются по потоку автомобилей.

В рассмотренных выше случаях теория самоорганизованной критичности применялась к системам с сохраняющимся числом частиц. Анализируя игру Конуэя «Жизнь», имитирующую возрастание сложности в биосистеме, авторы данной теории установили, что распределение живых ячеек является фракталом, который можно описать степенным законом с показателем степени 1,7. Таким образом, число живых ячеек колебалось со временем так же, как размеры лавин в куче песка, и система самоорганизовалась в критическое состояние.

Флуктуации в экономике, как заключили Ф.Андерсон и Б.Артур, также могут быть вызваны лавинами в самоорганизованном критическом состоянии системы. Б. Мандельброт из корпорации IBM проанализировал такие показатели, как индекс Доу-Джонса, и обнаружил флуктуации, соответствующие шуму мерцания. Различные метастабильные состояния экономики могут быть рассмотрены как метастабильные состояния кучи песка или земной коры. В других экономических моделях состояния более устойчивы, и большие агрегатные флуктуации могут возникать только от внешних ударов, влияющих на разные секции одинаково. Но причины их отыскать трудно, пример тому — депрессия 30-х гг. XX в. в США. В модели самоорганизованной критичности причины могут быть и при отсутствии таких «толчков». Большие флуктуации являются внутренним и неизбежным свойством динамики этой модели экономики. Такая проверка была проделана, и оказалось, что при изменении спроса на продукт нескольких компаний случайным образом на малую величину может возникнуть «лавина» в продаже и производстве.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. В чем заключается явление самоорганизации? Приведите примеры из области химии и физики. Почему они не могут быть описаны с позиций классической науки?

2. Как строится термодинамика открытых систем? Что такое устойчивые и неустойчивые равновесные состояния? Поясните понятия простой и сложной системы.

3. Как возникают структуры из хаоса в неорганической и живой материях? Каковы условия их образования? Приведите примеры из разных областей естествознания.

555

4. Что такое синергетика и каково ее значение для современной картины мира? Каков механизм эволюции в соответствии с представлениями синергетики?

5. Какие этапы можно выделить в развитии самоорганизующихся систем? Что такое фазовое пространство и как оно используется в моделировании сложных систем?

6. Поясните понятие диссипативной структуры по И. Пригожину.

7. Каково соотношение случайного и закономерного в концепции развития? Какую роль сыграл принцип элементарного беспорядка в естествознании?

8. Поясните понятия «хаос», «бифуркация», «катастрофа». Как теория катастроф связана с синергетикой?

9. Какие системы могут находиться в высокоупорядоченном состоянии? Каковы необходимые условия возникновения «самоорганизации» и существуют ли достаточные?

10. Дайте представление о прямой и обратной связях в сложной системе. Поясните связь процессов в земной коре с теорией самоорганизованной критичности. Дайте примеры использования этой теории.

Глава 14. КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА БИОСФЕРНОМ УРОВНЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВОЙ МАТЕРИИ

14.1. Биосферный уровень организации жизни. Основы учения В.И.Вернадского о биосфере

Биосферный уровень — высшая форма организации жизни на Земле. На этом уровне происходит объединение всех круговоротов веществ и превращения энергии в единый круговорот. Живое организовано по типу иерархичных систем: переход с одного уровня на другой связан с сохранением функциональных механизмов, действовавших на предыдущем уровне, и с появлением новых структур и функций, новых качеств. Уровень представлен биосферой — областью активной жизни. Она охватывает *аэросферу* (нижнюю часть атмосферы), *гидробиосферу* (гидросферу), *террабиосферу* (поверхность суши) и *литобиосферу* (верхнюю часть литосферы). Биосфера — достаточно тонкий слой: микробная жизнь распространена до высот 22 км над поверхностью, а в океанах наличие жизни обнаружено на глубинах до 10—11 км ниже уровня моря. В земную кору жизнь проникает меньше, микроорганизмы найдены при бурении до глубин 2 — 3 км. Случайно живая материя попадает и в слои, лежащие рядом «над» и «под», их называют *пара-и метабиосферой* соответственно. Но «пленка жизни» покрывает всю Землю, даже в пустынях и льдах обнаружены следы живого. Распределение жизни крайне неравномерно. В почве (верхние слои литосферы), гидросфере и нижних слоях атмосферы — самое большое количество живого вещества.

Разработка учения о биосфере имеет свою историю. Одним из первых естествоиспытателей, смотревших на Землю как на целое, был М.В.Ломоносов. Он писал в работе «О слоях земных», что «чернозем не первообразная и не первозданная материя, но произошел от согнтия животных и растущих тел со временем», что бурый уголь, каменный уголь и чернозем — результаты влияния организмов на грунт. Ломоносов дал общий очерк геологии Земли, доказывал ее древность как планеты. В то время даже окаменелости — ископаемые остатки организмов — далеко не всеми воспринимались как следы некогда бывшей жизни. В 1802 г. Ламарк в «Гидрогеологии» указывал на роль живых организмов в геологических процессах. В книге А. Гумбольдта «Космос» собрано много материала о влиянии живого на геологические структуры.

Зарождение отечественной *агрохимии* связано с Д.И.Менделеевым. Он исследовал проблемы питания растений и повышения урожайности

557

сельскохозяйственных культур. Эффективностью минеральных и органических удобрений занимались А.Н.Энгельгардт и Д.Н.Прянишников. Возникшая в начале XX в. геохимия исходила из принципов эволюции. *Почвенным лесообразованием* занимался В. А. Обручев, положив начало *мерзлотоведению*, он изучал тектонику и геологию. В.В.Докучаев своей работой «Русский чернозем» открыл *почвоведение* как научную дисциплину, стоящую на стыке геологии, биологии и химии. У него почва — особое природное тело, имеющее огромное значение для сельского хозяйства. Он дал первую в мире классификацию почв, изложил учение о ландшафтно-географических зонах, разработал планы борьбы с засухой, предусмотрев в них ряд агрономических и лесомелиоративных мер. Вместе с ним работали М.М. Сибирцев и П. А. Костычев. Сибирцев участвовал во многих экспедициях в южные степи России, написал первый учебник «Почвоведение» (1889). Костычев показал связь свойств почв с жизнедеятельностью растений и микроорганизмов, роль человека в изменении этих связей. Он установил (1886) решающую роль низших организмов в образовании перегноя (гумуса). Немецкий ученый Г. Гельригер показал опытным путем симбиоз бобовых культур с клубеньковыми бактериями (1888), что оказалось важным в *агрономии*.

Русский ученый В. Р. Вильямс доказал роль биологических факторов (природных сообществ высших зеленых растений и микроорганизмов) в формировании плодородия почв. Он первым подчеркнул значение биологического круговорота элементов в формировании не только органической, но и минеральной части почв, разработал научные основы травопольной системы земледелия (1914). Докучаев, преподававший минералогию, определил жизненные интересы В.И.Вернадского еще в студенческие годы. Вернадский исследовал эволюцию минералов земной коры (1908), создал геохимическую классификацию химических элементов, разработал учение о миграции атомов в земной коре, заложил основы генетического направления в минералогии, и именно общие проблемы минералогии и геологии привели его к концепции биогеохимии (1917). «Биосфера» Вернадского дает целостную картину механизма формирования земной коры с учетом определяющего влияния жизни.

В.И.Вернадский создал учение о биосфере как об активной оболочке Земли, в которой совокупная деятельность живых организмов — *геохимический фактор* планетарного масштаба и значения. Термин «биосфера», введенный (1875) Э.Зюссом, относился к совокупности организмов, обитающих на поверхности

Земли. В понятие живых организмов Вернадский включил и человека. Он выделял в биосфере *косное* (солнечная энергия, горные породы, минералы и т.д.) и *биокосное* (почвы, поверхностные воды и органические вещества). Хотя живое вещество по массе и объему составляет незначительную часть биосферы, оно играет основную роль в геологических процессах, связанных с изменением нашей планеты.

558

По Вернадскому, биосфера — это живое вещество планеты и преобразованное им косное вещество. Понятие «биосфера» — фундаментальное понятие биогеохимии, а не биологическое и не геологическое. Биосфера организует процессы на Земле и около Земли, в ней происходят биоэнергетические процессы и обмен веществ вследствие жизнедеятельности. Живой организм — неотъемлемая часть земной коры, могущая изменять ее. Живое вещество — совокупность организмов, участвующих в геохимических процессах. Организмы берут из окружающей среды химические элементы, строят из них тела, возвращают их в ту же среду и в процессе жизни и после своей смерти. Потому живое вещество связывает биосферу воедино, является системообразующим фактором. Изменения в живом веществе происходят существенно быстрее, чем в косном, поэтому в нем пользуются понятием исторического времени, а в косном — геологического. В ходе геологических времен растет мощь живого вещества и его воздействия на косное вещество, и только в живом веществе за эти времена происходят качественные изменения. И живое вещество, возможно, имеет свой процесс эволюции, вне зависимости от изменения среды.

Если «жизненный цикл» отдельного организма конечен и его существование не беспредельно, то живое как целое можно считать геологически бессмертным. Геологически жизнь вечна, поэтому если отдельный индивидуум со временем теряет возможность совершать работу и прекращает свое существование, то сам процесс жизни отличается непрерывным ростом возможности совершать внешнюю работу. Эту идею он выразил в трех принципах, которые назвал *биогеохимическими*:

1 — свободная (биогеохимическая) энергия стремится в биосфере к максимальному проявлению;

2 — при эволюции видов выживают те организмы, которые своей жизнью увеличивают свободную энергию;

3 — заселение Земли должно быть максимально возможным в течение геологического времени.

Эти принципы выражают закон только живой природы и не противоречат законам термодинамики. Весь поток живого вещества от самых простейших до самых развитых форм, включая разум человека и общественный труд, является той формой движения материи, где действует закон убывания энтропии, тогда как она растет для неорганической материи. И эти два вида материи связаны в единое целое. Закон возрастания энтропии Вернадский успешно применял для объяснения космической эволюции Земли. А рождение биосферы рассматривал как планетарно-космическую «особую точку» — качественный скачок, до которого на поверхности нашей планеты преобладали процессы неживой природы, а после которого стали преобладать процессы в живой при-

559

роде. Под действием лучистой энергии возникает и необратимо развивается органическая жизнь.

Вернадский считал, что жизнь на Земле возникла одновременно с формированием планеты: «Твари Земли являются созданием космического процесса, необходимой и закономерной частью стройного космического механизма». Среди множества закономерностей, имеющих место в биологии, геологии, биохимии и геохимии, Вернадский выделил основные эмпирические принципы.

1. *Принцип целостности* биосферы обеспечивается самосогласованностью всех процессов в биосфере. Жизнь ограничена узкими пределами — физическими константами, уровнями радиации и пр. *Гравитационная постоянная* определяет размеры звезд, температуру и давление в них. Если она станет меньше, звезды будут иметь меньшие массы, их температура станет недостаточной для протекания ядерных реакций; если чуть больше, звезды перейдут свою «критическую массу», выйдут из общего круговорота и превратятся в черные дыры. *Постоянная электромагнитного взаимодействия* определяет химические превращения, отвечает за электронную оболочку атомов и прочность связей в молекулах. *Константа слабого взаимодействия*, отвечающего за превращения элементарных частиц, при своем изменении «подорвет» весь наш мир. *Константа сильного взаимодействия*, отвечающего за стабильность ядер атомов, тоже не должна меняться, иначе в звездах реакции пойдут по-другому, могут не образоваться углерод и азот. Да и непонятно, возможна ли будет вообще жизнь нашего типа.

2. *Принцип гармонии биосферы и ее организованности* связан с предыдущим. Законы преобразования энергии на Земле, законы движения атомов есть отражение гармонии Космоса, ритмичности движения небесных тел. Основа существования биосферы — положение Земли в Космосе, наклон земной оси к эклиптике, определяющий климат и жизненные циклы всех организмов. Солнце — основной источник энергии биосферы и регулятор биологических процессов. Как отметил еще Ю. Р. Майер, «жизнь есть создание солнечного луча».

3. *Космическая роль биосферы в трансформации энергии* — можно рассматривать эту часть живой природы как дальнейшее развитие одного и того же процесса превращения солнечной световой энергии в действенную энергию Земли. Биосфера является одним и тем же космическим аппаратом с самых древнейших геологических времен. Жизнь все это время оставалась постоянной, менялась только ее форма. Само живое

вещество не является случайным созданием. Источники энергии геологических явлений — космическая, преимущественно солнечная; планетная, связанная со строением и космической историей Земли; внутренняя энергия материи — радиоактивность. Живое вещество активно трансформирует солнечную энергию в химическое молекулярное движение и в сложность биологических структур.

560

4. *Растекание жизни* — проявление ее геохимической энергии, аналог закона инерции неживой материи. Мелкие организмы размножаются быстрее, чем крупные. Скорость передачи жизни зависит от плотности живого вещества.

5. *Автотрофные* организмы все нужное для жизни берут из окружающей их косной материи и не требуют для построения своего тела готовых соединений другого организма. Поле существования зеленых автотрофных организмов определяется прежде всего областью проникновения солнечных лучей.

6. *Космическая энергия* вызывает давление жизни, которое достигается размножением. Размножение организмов уменьшается по мере роста их количества.

7. *Формы нахождения химических элементов*: горные породы и минералы, магмы, рассеянные элементы, живое вещество. Земная кора — сложный механизм, где постоянно движутся атомы и молекулы, происходят разнообразные геохимические круговороты, определяемые в значительной мере деятельностью живого вещества. Закон бережливости в использовании живым веществом простых химических тел: раз вошедший элемент проходит длинный ряд состояний, и организм вводит в себя только необходимое количество элементов.

8. Жизнь на Земле полностью определяется полем *устойчивости зеленой растительности*. Пределы жизни определяются физико-химическими свойствами соединений, строящих организм, их неразрушимостью в определенных условиях среды. Максимальное поле жизни определяется крайними пределами выживания организмов. Верхний предел жизни обусловлен лучистой энергией, присутствие которой исключает жизнь и от которой предохраняет озоновый слой. Нижний предел связан с достижением высокой температуры. Интервал в 432 °C (от -252 до +180 °C) является предельным тепловым щитом.

9. *Принцип постоянства количества живого вещества* в биосфере. Количество свободного кислорода в атмосфере того же порядка, что и количество живого вещества ($1,5 \cdot 10^{18}$ кг и $10^{17} — 10^{18}$ кг). Скорость передачи жизни не может перейти пределы, нарушающие свойства газов. Идет борьба за нужный газ.

10. *Всякая система достигает положения устойчивого равновесия*, когда ее свободная энергия равняется нулю или приближается к нему, т.е. когда вся возможная в условиях системы работа произведена. Понятие устойчивого равновесия исключительно важно.

Антропный принцип, выдвинутый Г. М.Иддисом (1958), связан с первым из перечисленных здесь принципов Вернадского и состоит в точном соответствии значений мировых констант с возможностями существования жизни. Удивительная согласованность ряда величин производит впечатление, что может существовать скрытый принцип, упорядочивающий всю Вселенную. К этому

561

факту обращались очень многие. Сейчас его формулируют в двух вариантах — слабом и сильном. Как выразился известный американский физик Дж. Дайсон: «Если мы приглядимся ко Вселенной и увидим, как много случайностей послужили нам во благо, то кажется почти, что Вселенная знала, что мы появимся». Это — одна из формулировок слабого принципа, в английской литературе — WAP. Но он не отвечает на многие вопросы, например, почему Вселенная такова, что допустила зарождение жизни. А, может, не нужно создавать теорий, которые не допускают существование наблюдателя? Сильный принцип — возникновение жизни закономерно во Вселенной, но, может, появление наблюдателя и есть цель эволюции Вселенной?

Геологическую роль живого Вернадский классифицировал по пяти категориям: энергетическая, концентрационная, деструктивная, средообразующая, транспортная. Живые организмы творят миграцию химических элементов в биосфере посредством своего дыхания, питания, обмена веществ, непрерывной сменой поколений. Биогеохимическая энергия живого является источником энергии преобразования геосфер.

14.2. Распределение на Земле солнечной энергии. Биотический круговорот

Лишь небольшая часть солнечной энергии, поступающей на Землю, улавливается биосферой (рис. 14.1). Ультрафиолетовая часть спектра, составляющая около 30 % всей солнечной энергии, доходящей до Земли, почти полностью задерживается атмосферой. Половина поступающей энергии превращается в теплоту и затем излучается в космическое пространство, 20 % расходуется на испарение воды и образование облаков и только около 0,02 % используется биосферой (см. рис. 12.4). В процессе фотосинтеза зеленые растения и водоросли усваивают эту энергию и запасают в форме Сахаров. От этого процесса зависит все существование биосферы.

Солнечная энергия преобразуется в процессах брожения и дыхания в специальных структурах клеток растений в энергию химических связей. Эта энергия высвобождается и используется живыми организмами. В центре этих превращений в клетке находится АТФ, которая синтезируется из АДФ и H_3PO_4 за счет световой энергии или энергии, выделяемой при брожении или дыхании. При гидролизе АТФ выделяется энергия, необходимая для совершения всей работы живого организма, — от создания градиентов концентрации ионов

и сокращения мышц до синтеза белка (см. гл. 11 — 12).

Биотический круговорот состоит из разных круговоротов (рис. 14.2). Каждый биоценоз — модель биосферы в миниатюре. Иногда выделяют *биоценотический уровень* организации жизни, представлен-

562

Рис. 14.1. Схема солнечно-земных связей

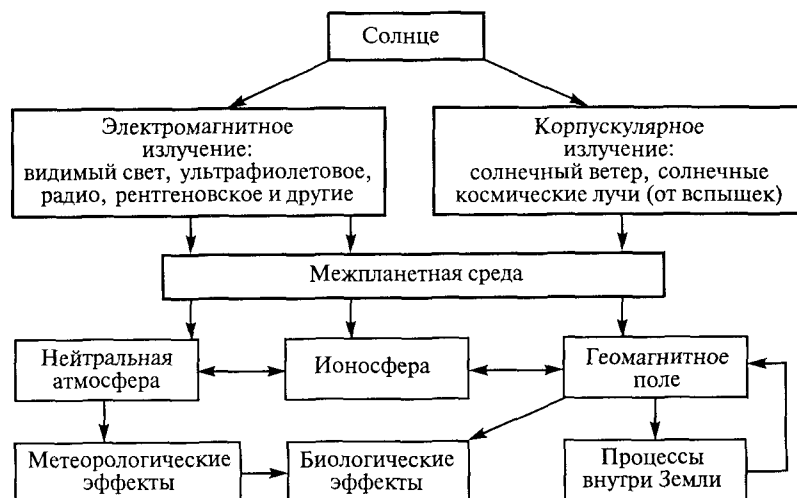
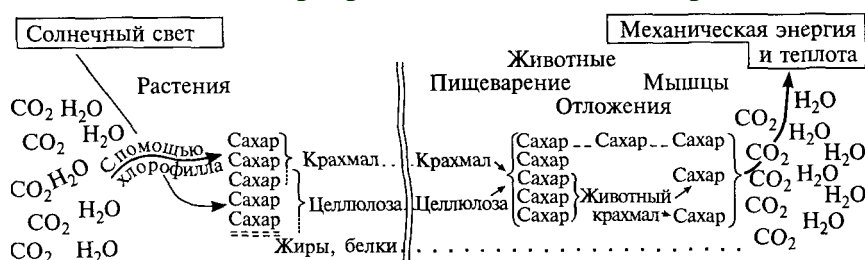


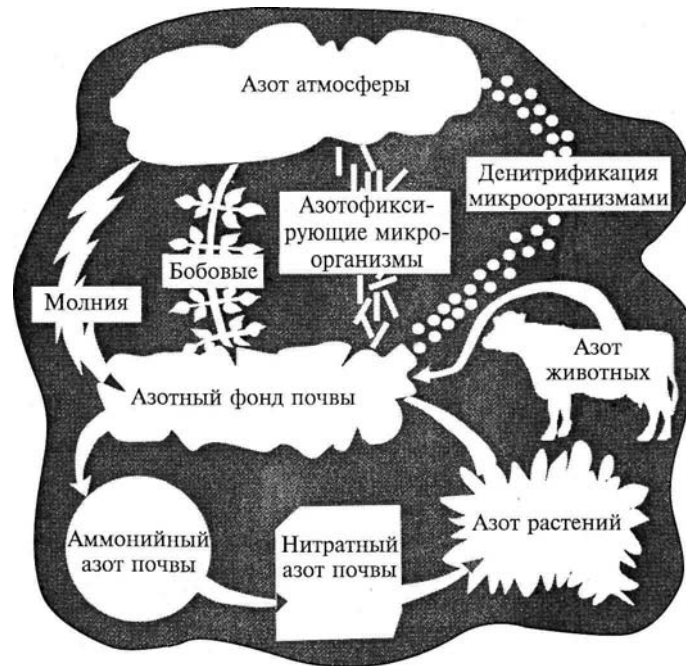
Рис. 14.2. Превращения солнечной энергии



ный биоценозами (экосистемами). Они представляют собой системы, состоящие из взаимозависимых сообществ организмов и абиотических факторов среды, которые сложились в ходе исторического развития. Экосистемам присуще динамическое равновесие между организмами и абиотическими факторами. Важны и исторические факторы формирования биоценоза, и климат, и ландшафт, и многое другое. Известный американский эколог Е. Одум предложил систему структурирования экосистем. Например, экосистема леса включает биоценозы различных типов лесов — хвойных, лиственных, тропических, каждый из которых характеризуется своим круговоротом веществ. Английский ученый Ч. Элтон в 1960 г. обратил внимание на разную насыщенность жизнью различных биоценозов.

563

Рис. 14.4. Круговорот азота в биосфере



ней. Частично энергия рассеивается при переходе от продуцентов (зеленых растений) к травоядным, а затем и к плотоядным животным (редуцентам), поэтому необходима постоянная подпитка биосферы солнечной энергией.

Биотический круговорот органических веществ — основа биосферы. В закономерностях этого круговорота решена проблема развития и длительного существования жизни. Мы не говорим «бесконечного», потому что все на Земле имеет конец: сама Земля представляет собой ограниченное тело, конечен запас минеральных элементов и т.д. «Единственный способ придать ограниченному количеству свойство бесконечного, — писал В. Р. Вильямс в книге «Агрономия», — это заставить его вращаться по замкнутой кривой. Зеленые растения создают органическое вещество, не зеленые разрушают его. Из минеральных соединений, полученных из распада органического вещества, новые зеленые растения строят новое органическое вещество, и так без конца» (рис. 14.4).

Жизнь на Земле идет именно таким путем. Каждый вид — это только звено в биотическом круговороте. Непрерывность жизни обеспечивается процессами синтеза и распада, каждый организм отдает или выделяет то, что используют другие организмы. Особенно велика в этом круговороте роль *микроорганизмов*, которые

превращают останки животных и растений в минеральные соли и простейшие органические соединения, вновь используемые зелеными растениями для синтеза новых органических веществ. При разрушении сложных органических соединений высвобождается энергия, теряется информация, свойственная сложно организованным существам. Любая форма жизни участвует в биотическом круговороте, и на нем основана саморегуляция биосферы. Микроорганизмы при этом играют двоякую роль: они быстро приспосабливаются к разным условиям жизни и могут использовать различные субстраты в качестве источника углерода и энергии. Высшие организмы не обладают такими способностями и потому располагаются выше одноклеточных в экологической пирамиде, опираясь на них как на фундамент.

Суммарную годовую продукцию фотосинтеза Земли в $46 \cdot 10^{12}$ кг органического углерода оценил в 1967 г. советский физиолог А.А.Ничипорович. Для производства такого количества углерода нужно связать $170 \cdot 10^{12}$ кг углекислоты и $68 \cdot 10^{12}$ кг воды, в результате чего образуются $115 \cdot 10^{12}$ кг сухого органического вещества и $123 \cdot 10^{12}$ кг кислорода. При этом усваиваются $18,55 \cdot 10^{12}$ Дж солнечной радиации. Но в процессе фотосинтеза участвуют не только вода и углекислота. Ежегодно используются около $6 \cdot 10^{12}$ кг азота, $2 \cdot 10^{12}$ кг фосфора и других элементов (калий, кальций, сера, железо, медь, кобальт, молибден и пр.). Большое количество воды тратится на испарение. Более точные расчеты дают в 2 раза больший прирост продукции, причем фитомасса океана, составляющая 0,01 % суммарной, дает 25,8% всей первичной продукции Земли. Объясняется это тем, что на суше первичная продукция создается достаточно медленно растущими цветковыми растениями, а в океане — быстро размножающимся планктоном. Из сопоставления всей биомассы растений ($2400 \cdot 10^{12}$ кг) с величиной ежегодной продукции ($235,5 \cdot 10^{12}$ кг) можно сделать вывод, что ежегодно возобновляется менее 10 % биомассы (рис. 14.5).

Часть этого вещества ($232,2 \cdot 10^{12}$ кг) должна потребляться животными и микроорганизмами, суммарная масса которых $23 \cdot 10^{12}$ кг. Растения ежегодно продуцируют органическое вещество, составляющее примерно 10 % их биомассы, а деструкторы должны перерабатывать эту массу органики, которая в 10 раз превышает их массу. Так что компоненты биотического круговорота должны быть тщательно подогнаны. В круговороте

неорганики тоже наблюдаются определенные соотношения. По данным Е. Рабиновича (1951), весь кислород в атмосфере оборачивается через организмы примерно за 2000 лет, углекислота — за 300 лет, вода — за 2 млн лет. За время существования жизни на Земле не только углекислота и кислород, но и вода успели пройти через живое вещество не одну тысячу раз. Распределение производства органики по поверхности Земли весьма неравномерно. В среднем на 1 га приходится

567

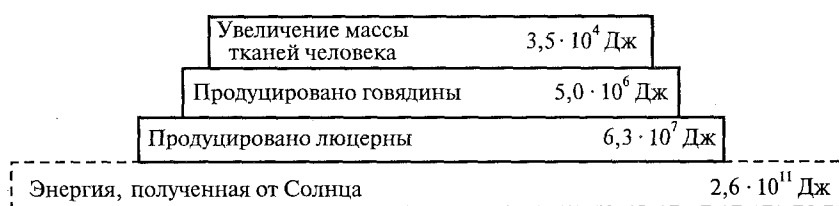
Переработка пищи в организмах сопровождается выделением энергии, частично запасаемой в форме химической энергии и используемой для совершения работы. Животные, поедая растения, а хищники — травоядных животных, освобождают ее для себя, сжигая сахара и другие питательные вещества при помощи кислорода. Устанавливаются *трофические уровни* (рис. 14.3). В отличие от простейших существ, у которых сжигание веществ может происходить в любой части организма, высшие животные обладают специальной системой, распределяющей по организму кислород и энергоносители. В легких кровь поглощает кислород и выделяет углекислый газ, в кишечнике она получает питательные вещества. Процессы переваривания пищи обеспечивают разложение сложных компонентов пищи на более простые, которые усваиваются кишечником и поступают в кровь, при этом высвобождается энергия. Конечные продукты обмена веществ (избыток солей, воды, чужеродные и токсичные соединения) поступают через почки в мочу и выводятся из организма.

В организме постоянно совершается работа: перекачивается кровь, поглощаются питательные вещества, происходят процессы возбуждения молекул, в которых запасается *энергия, выводятся* отходы жизнедеятельности и вредные вещества и т.д. Для создания *упорядоченных систем* (высокого уровня генетической или нервной организации) тоже необходима энергия. Эффективное функционирование систем обеспечивается также информацией о внешнем и внутреннем окружении. Работа состоит в выработке сигналов, регулирующих энергетические процессы, организующих биоструктуры, контролирующих расход энергии и т. п. (см. рис. 11.10). Животные не получают нужную энергию непосредственно от Солнца. Для добывания пищи им нужна *сенсорная система* ее обнаружения (глаза, уши, нос или сонар — ультразвуковой локатор, иные органы) и *мускульная система*, приводящая в движение руки, ноги, плавники, крылья и т.д. Кроме того, у животных имеются *регулирующие системы* — железы, выделяющие гормоны, и *нервная система*.

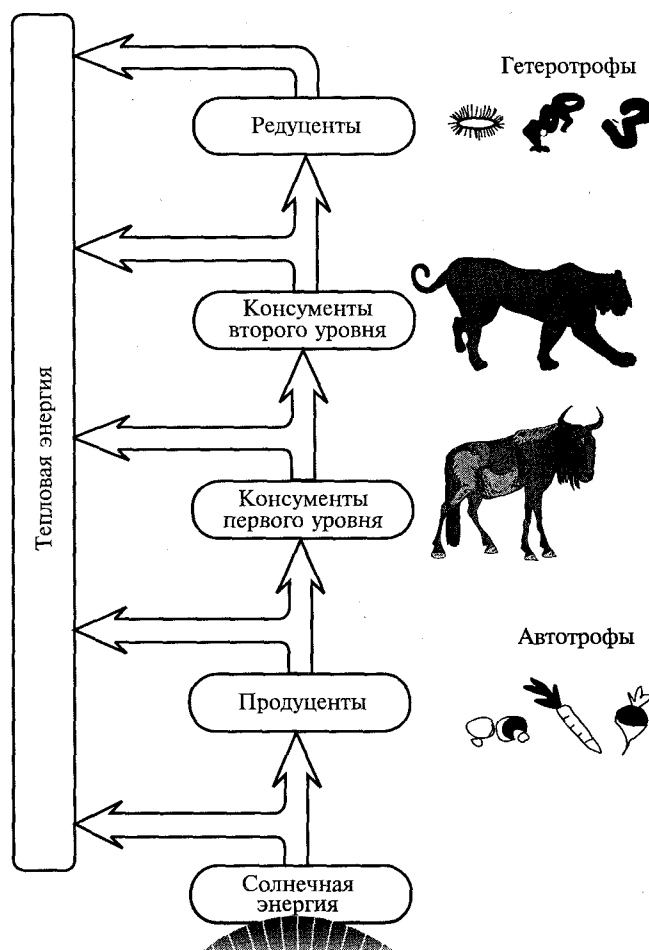
Удовлетворение энергетических потребностей организмов происходит в рамках равновесия, которое устанавливается между различными организмами данной среды обитания (экосистемы). Среди обитателей выделяют два типа организмов: одни способны непосредственно использовать солнечную энергию и перерабатывать в пищу вещества из неживой окружающей среды (автотрофы), другие зависят от остальных производителей энергии, т. е. сами не производят необходимую им пищу (гетеротрофы) (см. рис. 14.3). Все элементы, из которых построены организмы, многократно используются в биосфере, тем более что масса всего живого, когда-либо заселявшего Землю, много больше массы самой Земли. *Обмен энергии* в биосфере отличается от *круговорота веществ* в

564

Рис. 14.3. Пирамида преобразования энергии (а) и передача энергии по трофическим уровням (б)



а

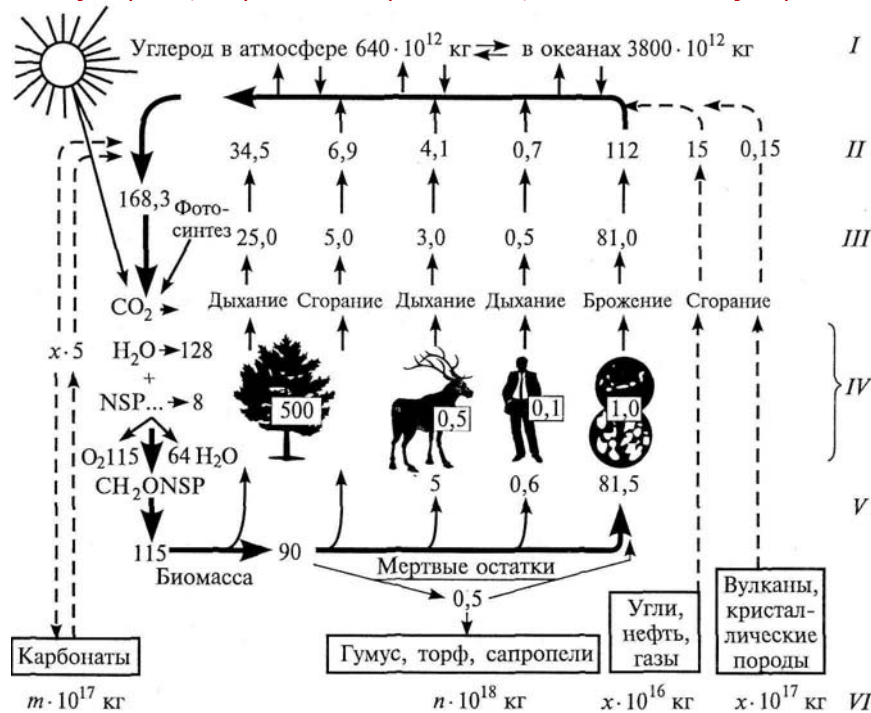


б

565

Рис. 14.5. Круговорот органических веществ (в млрд кг) в биосфере:

I — количество CO_2 в составе угольной кислоты в атмосфере и гидросфере; *II* — количество CO_2 , выделяемого в атмосферу; *III* — количество окисляемых органических веществ; *IV* — группы организмов и биомасса организмов каждой группы; *V* — масса пищи и субстратов, потребляемых организмами; *VI* — количество углерода в литосфере



160,9 т растительной массы при годовой продукции 11,5 т (в тропиках — около 440 т, а в пустынях — около 7 т). Интенсивность кругооборота характеризуется скоростью накопления и разложения мертвого органического вещества, которое образуется при опадании листьев и отмирании организмов. Этот круговорот — основа организации жизни в планетарном масштабе, о чем говорил Вернадский.

14.3. Связи между организмами в экосистеме

Биосфера — совокупность всех живых организмов вместе со средой обитания. Эту среду составляют вода, нижняя часть атмосферы и верхняя часть земной коры, населенная микроорганизмами. Живые организмы и среда непрерывно взаимодействуют и

568

находятся в тесном единстве, образуя целостную систему. Как самая глобальная система на Земле биосфера состоит из ряда подсистем. Вернадский впервые в своих лекциях в Сорбонне в 1923 — 24 гг. указал на геологические функции живого вещества, разработал представление о совокупности всего органического мира как единого целого. Эти лекции вдохновили двух молодых людей — Тейяра де Шардена и Ле Руа — на раздумья о месте и назначении человека в природе. Фактором, объединяющим все уровни организации живого в единое целое — биосферу, — является **биотический обмен веществ**.

Биосфера — единство живого и минеральных элементов, вовлеченных в сферу жизни. Она — иерархически построенное единство, включающее разные уровни жизни: особь, популяция, биоценоз. В процессе исторического развития сложились различные группы организмов — сообщества, взаимодействующие со своей средой обитания. Крупнейшие наземные сообщества, тесно связанные с определенными природными зонами и поясами, называются **биомами**. Растения и животные существуют в тесной зависимости от окружающей неживой природы и от других организмов, испытывают на себе их воздействие и приспосабливаются к ним. **Биоценоз**, или **сообщество**, — это совокупность растений или животных, населяющих участок среды обитания. **Биогеоценоз**, или **экосистема**, — это совокупность сообщества и среды его обитания. Биоценоз — живая часть биогеоценоза — состоит из популяций организмов разных видов, в них сосуществуют популяции видов с разной историей (как и наблюдаемые звезды, каждая из которых имеет свой возраст и свою историю).

Жизнь распределена по земной поверхности крайне неравномерно и в различных природных условиях принимает вид относительно независимых комплексов — биогеоценозов (или экосистем). Каждый из уровней относительно независим от других, давая возможность эволюционировать всей макросистеме. Биогеоценозы могут включать в разных биомах представителей от многих сотен до многих тысяч видов живых организмов.

Экология — особый раздел биологии, который занимается изучением взаимоотношений совместно живущих организмов и их зависимости от внешней среды. Этот термин предложил немецкий биолог-

эволюционист Э.Геккель (1866). В буквальном смысле этот термин означает науку о «доме», «месте обитания». Но эта наука стала активно развиваться только через столетие. В зависимости от уровня организации живого различают *аутоэкологию*, которая изучает взаимодействие отдельных видов со средой, и *синэкологию*, изучающую сообщества.

Принцип устойчивости — один из главных в экологии. Многокомпонентные системы не всегда отличаются от малокомпонентных по степени устойчивости, вероятно, устойчивость эко-

системы определяется не числом видов, а их экологическими особенностями. Для понимания функциональной структуры биосферы важны экологические ниши, определяющие положение вида в цепях питания. Строится пирамида питания, состоящая из нескольких трофических уровней. Низший уровень занимают автотрофные организмы, получающие питание из косного вещества. Это — в большинстве своем растения. Выше располагаются гетеротрофные организмы, питающиеся биомассой растений (травоядные). Затем — гетеротрофы более высокого порядка, питающиеся травоядными животными и т.д. (см. рис. 14.3). Эта пирамида связана с круговоротом веществ в биосфере. Круг замыкают бактерии и грибы, способные разлагать органические вещества. Пирамида более устойчива, если трофических уровней больше. Но чем больше трофических уровней, тем выше потери энергии в системе. Было установлено, что два вида, занимающих одну нишу, не могут существовать неограниченно долго в одном месте.

Различные виды организмов образуют друг с другом связи, многие из которых жизненно необходимы, а источником энергии для них служит излучение Солнца. Каждый биоценоз является трансформатором солнечной энергии в свою собственную. Сложная структура экосистем — необходимая предпосылка поддержания устойчивости. Вернадский выделил несколько условий существенности взаимосвязей в экосистемах: а) каждый организм может существовать только при условии постоянной связи с внешней средой (в том числе и с неживой природой, и с другими организмами); б) жизнь изменила нашу планету, при этом организмы все шире распространились по ней, стимулируя перераспределение энергии и веществ; в) размеры популяции растут до тех пор, пока среда может поддерживать их дальнейшее увеличение, после чего наступит равновесие; численность популяции всегда почти равновесна, колеблется около равновесного значения.

Принцип равновесия для живых систем играет огромную роль. Общее равновесие в биосфере поддерживает множество равновесий между разными ее компонентами. Равновесие в живой природе динамично, это колебания около точки устойчивости. Если они не изменяются, говорят о *гомеостазе*. Гомеостатический механизм поддерживает в живом организме параметры внутренней среды таковыми, чтобы препятствовать воздействиям внешней среды, например температура, кровяное давление, частота пульса поддерживаются такими механизмами. Естественные биоценозы могут сохраняться долгое время, а могут изменяться, например заболачивается озеро, образуется торфяник, на месте болота вырастает лес. Таким образом развиваются не только организмы и виды, но и экосистемы. Постоянное взаимодействие всех компонентов биогеоценоза может стать причиной его изменения, а толчком к этому может служить небольшое изменение.

570

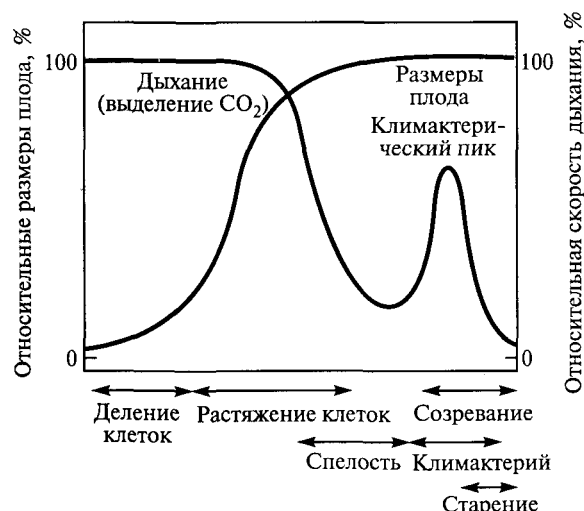
Экологические сукцессии (от лат. *successio* — **преемственность**) — закономерные изменения биоценоза, связанные с его эволюцией. В результате ряда процессов биоценоз приобретает новые возможности для увеличения разнообразия. Экологи называют сукцессию переходом биоценоза из стадии развития и стабилизации в состояние климакса. Биоценоз развивается по схеме развития своих компонент (рис. 14.6). Численность разных компонент периодически чередуется.

Пример: песчаная дюна — трава — сухой дубовый лес — влажный лес из дуба — климаксовый лес из бука и клена. Относительная независимость биоценозов, связи между которыми ограничиваются посредниками из неживых компонент биосферы — минеральными солями, газами атмосферы, водой, обеспечивает устойчивость всей биосферы и ее способность к эволюции.

При этом оказалось, что при развитии систем в направлении повышения устойчивости увеличивается разнообразие. Раньше казалось, что менее сложные виды дают дорогу более сложным и становятся ненужными, но это неверно. Снижение разнообразия, имеющее место в современных условиях, стало опасным для устойчивости биосферы.

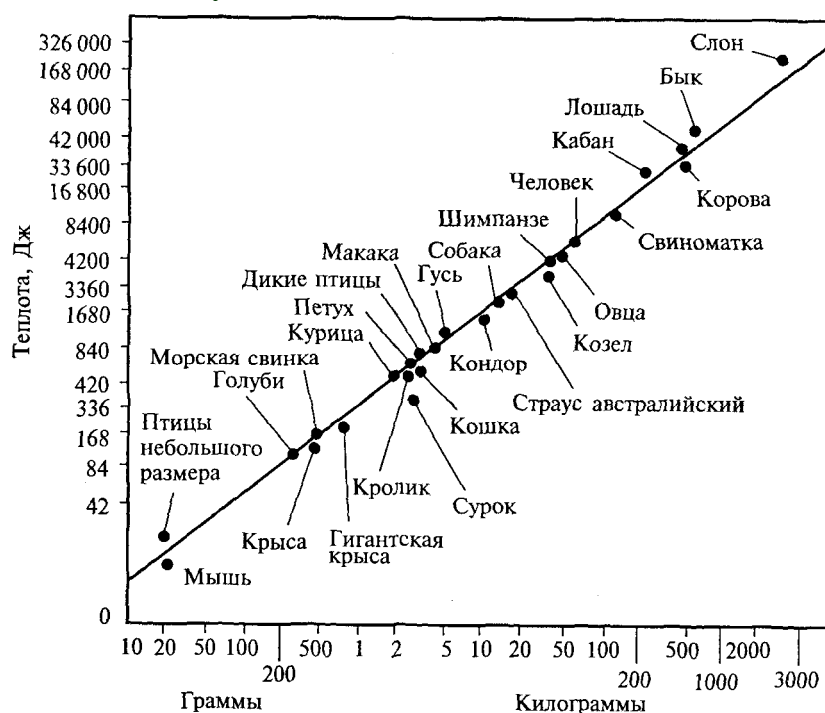
Распространенность видов в биоценозах закономерна — чем меньше масса организма (и выделяемая им теплота), тем больше численность особей, причем наибольшим распространением отличается сравнительно небольшое число видов (рис. 14.7). В растительности высокотравной степи Оклахомы Э.Райс (1952) отме-

Рис. 14.6. Стадии роста и созревания плода растения, приведенные в относительных размерах, и интенсивности дыхания



571

Рис. 14.7. Связь между количеством выдыхаемой теплоты и массой тела



тил, что 84 % трав составляли 9 видов, а на долю остальных 20 видов приходилось только 16%. При изменении условий жизни первыми начинают вымирать специализированные к данным условиям виды, а виды с более широким спектром возможностей выживают.

14.4. Самоорганизация в формировании климата

Понятие *климата* возникло еще в Древней Греции (от греч. *klima* — **наклон**). Термин был введен древнегреческим астрономом Гиппархом. Люди уже тогда понимали, что погодные условия зависят от наклона земной поверхности к солнечным лучам. До XIX в. считалось, что климат определяется высотой Солнца над горизонтом. В соответствии с этим выделяли несколько климатических поясов (12 или 36), границы которых проходили почти параллельно экватору, но средние погодные условия в этих поясах все равно отличались. А. Гумбольдт (1845) определил, что «климат — специфическое свойство атмосферы, которое зависит от непрерывного совместного действия подвижной поверх-

572

ности моря, изоборуженной течениями противоположных температур, излучающей тепло сушей, которая определяет громадное разнообразие в отношении своей орографии, окраски и состояния покрова». К климату относится то, что не может быть выражено в терминах погоды.

Погода — это совокупность значений метеорологических параметров в любой момент времени в данной

точке пространства. Существует предел предсказуемости погоды в 2 — 3 недели.

Под *климатом* понимают усредненные во времени характеристики, сейчас обычно за это время выбирают 100 лет. Оказалось, что столетние средние данные одинаково устойчивы для всей планеты, поэтому сам климат считается глобальной характеристикой. Вековые изменения приписывают изменению климата. На протяжении человеческой жизни (в среднем 75 лет) климат почти не меняется, поэтому погода рассматривается как нечто колеблющееся около постоянной синусоиды времен года, и заметить изменчивость климата удалось только науке. Климатическая система включает компоненты, находящиеся между собой в сильной взаимной зависимости: океан, атмосферу, поверхность суши, биосферу. И для описания климата Земли нужно знать совокупность статистических характеристик всех компонент системы. Период метеонаблюдений порядка 100—150 лет, а спутниковые виды наблюдений еще более недавние. Проследить за историей климата Земли можно только по очень ограниченному числу показателей или косвенных признаков.

Для человечества существенна зависимость от климата. И хотя в XXI в. возможно преодолеть последствия таких аномалий, зависимость от климата не ослабевает. Да и человеческая деятельность стала оказывать влияние на климат. Так, климат вблизи созданных водоемов уже отличен от климата окружающих мест, меняется газовый и аэрозольный состав атмосферы, все меньше остается лесов, появляются пустынные или заболоченные территории. Рост населения земли и развитие цивилизации требуют увеличения потребления энергии, сырья, продовольствия, расширения пахотных земель и т.д., что способно существенно повлиять на изменение климата на больших пространствах. Наука *климатология* призвана использовать знания о климате и его изменениях при планировании и управлении хозяйственной деятельностью, но пока она не способна однозначно оценить последствия суммарного воздействия на климат факторов естественного и антропогенного происхождения.

В 1967 г. была начата подготовка международной научной Программы исследования глобальных атмосферных процессов при поддержке ООН. Она должна была обеспечить долгосрочные прогнозы погоды на 3 — 5 дней и на средние сроки (2 — 3 недели). К началу 80-х гг. была принята Всемирная климатическая программа, которая предусматривала три состав-

573
ляющих: сбор данных о климате и использование этих данных на практике, исследование влияния климата на деятельность человека; изучение изменений климата под влиянием природных и антропогенных факторов. Несмотря на важность изучения климата только в середине XX в. наука начала переходить от описания климата к объяснению его.

Для климата важна **величина солнечной энергии**, приходящаяся на единицу поверхности Земли за сутки. Световая мощность, попадающая на единичную площадку, или *освещенность*, пропорциональна косинусу угла между направлением на источник света и нормалью к площадке и обратно пропорциональна квадрату расстояния r : $E = s(a/r)^2 \cos \varphi$, где $s = 1360 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; a — среднее расстояние до Солнца. Расстояние до Солнца в течение года меняется в пределах 3,3 %, т. е. разница в освещенности Земли примерно 7 %. Угол наклона площадки к Солнцу меняется каждый час, день, год и зависит от широты местности. Из-за большой теплоемкости земной поверхности, особенно покрытых водой участков, остывание за ночь не очень велико, и солнечная энергия, поступающая за сутки, — важная характеристика климата данной широты. Тепловые характеристики — важные параметры климатической системы. Отражательные свойства поверхности фиксируются таким параметром, как альbedo поверхности; важны тепловые свойства поверхности, теплообмен атмосферы с подстилающей поверхностью суши и океана, уровень океана, положение ледников и т.д. Математические модели общей циркуляции атмосферы позволяют восстановить режим климатической системы с учетом этих факторов в различные времена года. Использование численных экспериментов с разными типами моделей циркуляции атмосферы позволяет усовершенствовать модели климата и уточнить картину изменений климата.

Знание эволюции климата важно для понимания процессов его изменения. Основную информацию дают геологические и палеонтологические данные, дополняемые данными археологии и истории, относящимися к последнему периоду истории Земли. Для эпохи голоцена используют сведения из архивов и летописей. По данным палеонтологии восстановили вид поверхности суши, ее ландшафта, растительности, орографии, температуры поверхности океана. Для количественных характеристик климата прошлого используют методы геохимии. Изотопный анализ позволил выделить в истории Земли несколько крупных ледниковых эпох; последний был около 650 млн лет назад. Были периодические похолодания и потепления, менялся состав атмосферы. Более надежные данные о климате есть лишь за последние 2 млн лет, когда формировалась биосфера (четвертичный период). Тогда температура Земли была порядка 15 °С и колебалась при переходе от ледниковых эпох к межледниковым в пределах 5—10 °С. За этот период были и длительные оледенения (\approx по 70 — 120 тыс. лет), и более

574
короткие межледниковые периоды (\approx по 15 — 20 тыс. лет). Данные термины вовсе не означают, что Земля была в этот период полностью покрыта льдом или свободна от него.

Методами спектрального анализа различных косвенных климатических показателей были выделены три

периодичности колебаний климата. Период в 100 тыс. лет связан с таким же периодом колебания эксцентриситета орбиты Земли, период в 40 — 43 тыс. лет — с периодическими изменениями наклона экватора к плоскости орбиты, а период в 19 — 23 тыс. лет — с прецессией орбиты. Таким образом, отмеченная периодичность связана с изменениями приходящей на Землю солнечной энергии, вызванными колебаниями орбиты нашей планеты. Начало истории цивилизации приходится на последний межледниковый период, начавшийся около 10—15 тыс. лет назад, — *голоцен*. За этот период климат неоднократно менялся. Около 7 — 8 тыс. лет назад, когда наступило потепление после ледникового периода, растаял сначала скандинавский ледяной покров, затем — льды в Северной Америке, а 4,5 тыс. лет назад — лабрадорские льды. Отступила на север граница зоны вечной мерзлоты. Озеро Чад имело размеры Каспийского моря, а уровень воды в нем превышал уровень воды Каспия на 40 м. Около 4 тыс. лет назад стало холоднее и суше, и многие субтропические зоны стали превращаться в пустыни (в Сахаре, Аравии, в долине Инда). Ряд цивилизаций переместились на возвышенности и долины рек Тигра, Евфрата и др. Потепление отмечалось в VIII — XII вв., потом в XIV—XIX вв. — похолодание, а сейчас — потепление. Деятельность человека вносит все большие коррективы в ход этих процессов.

Излучение Солнца во время своего образования было на 30 % слабее нынешнего, и потом светимость Солнца стала возрастать пропорционально времени. Этот так называемый *парадокс молодого Солнца* должен быть сказаться на климате планет: если бы атмосфера 4 млрд лет назад была такой, как сейчас, то она находилась бы в замороженном состоянии еще 2 млрд лет назад. Но данные по изучению осадочных пород этого не подтверждают. По крайней мере, 3,8 млрд лет назад на Земле уже были океаны, поэтому должна была измениться и земная атмосфера. Планеты земной группы, вероятно, когда-то были похожи друг на друга. Они состояли почти из одинаковых пород, имели сходные по составу атмосферы и были достаточно большими, чтобы удерживать воду на поверхности. Разница в климате возникла из-за разного круговорота углекислого газа при обмене им между корой и атмосферой. Как и водяной пар, углекислый газ — газ парниковый, так как он, пропуская солнечный свет, поглощает теплоту планеты и переизлучает часть ее к поверхности. Расчеты, проведенные на ЭВМ, показывают, что умеренный климат Земли обязан своим происхождением особенностям механизма газового обмена: при

575

остывании планеты количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, и наоборот. Марс потерял способность возвращать газ в атмосферу, потому он «заморожен», Венера, наоборот, не имеет механизма выведения углекислого газа из атмосферы, а Меркурий вообще не способен удерживать атмосферу, и Солнце определяет температуру его поверхности.

Климат менялся вместе с эволюцией планет. Предполагают, что в отдаленном прошлом был значительный *парниковый эффект*, и аммиак (эффективный поглотитель инфракрасного излучения) мог бы создать более теплый климат на Земле, если бы составлял сотые доли процента воздуха. Но под действием света аммиак разлагается на азот и водород — газы, не создающие парникового эффекта, и он должен был все время выделяться из недр планеты для сохранения теплоты. Углекислый газ не так быстро разрушается светом, его достаточно много на Земле (хотя в атмосфере его давление всего 30 Па, но наличие его в карбонатных породах достаточно для создания давления и в $6 \cdot 10^6$ Па). Если бы в первоначальной атмосфере Земли его было даже несколько тысяч Паскалей, то создаваемого им парникового эффекта было бы достаточно для того, чтобы вода не замерзала. По оценкам М.Харттра, снижение содержания CO_2 в атмосфере происходит со скоростью, компенсирующей возрастание светимости Солнца. Сравнивая аналогичные расчеты для разных расстояний от Солнца, он получил, что при расстоянии от Солнца меньше 1 а. е. на 5 % атмосфера нагрелась бы настолько, что океаны испарились бы в результате разгоняющегося парникового эффекта, а на расстояниях, больших на 1 %, — разгоняющего оледенения, т.е. только в узкой полоске расстояний между 0,95 и 1,01 а. е. Земля смогла избежать этой катастрофы климата.

Этот режим *саморегуляции*, или *отрицательной обратной связи*, обеспечил нашей планете устойчивость климата. Вряд ли появление жизни на Земле в таком узком кольце Солнечной системы — это случайность. Скорее всего, содержание CO_2 менялось в соответствии с изменением температуры поверхности Земли. Эта обратная связь могла обеспечиваться карбонатно-силикатным геохимическим циклом, который способен отвечать за 80 % обмена CO_2 между планетой и ее атмосферой на временных интервалах более 0,5 млн лет.

Началом цикла карбонатного метаболизма можно считать растворение атмосферного углекислого газа в водяных каплях и образование угольной кислоты. Дождевые осадки разрушали горные породы, состоявшие из соединений кальция, кремния и кислорода. Угольная кислота вступала в реакцию с породами на поверхности, высвобождая ионы кальция и бикарбоната, которые поступали в грунтовые воды, а затем в океан, где оседали в скелетах и раковинах планктона и других организ-

576

мов, состоящих из карбоната кальция (CaCO_3). Останки этих организмов откладывались на океанском дне, формируя осадочные породы. Дно моря расширялось, через много тысяч лет эти породы приблизились к краям континентов. Дно подтягивало их под берег, они попадали в земные недра, где на них действовали давление и температура. Карбонат кальция соединился с кремнием, образуя силикатные породы и выделяя углекислый газ. Газ вновь попадал в атмосферу через извержения вулканов и срединно-океанические хребты.

Цикл завершился (см. рис. 10.3, б).

Изменения температуры земной поверхности влияют на количество CO_2 в атмосфере и величину парникового эффекта. Пусть по какой-то причине на Земле стало прохладнее. Тогда меньше воды испарится из океана, меньше выпадет дождей, уменьшится эрозия почвы, вызванная осадками. Для CO_2 уменьшится скорость покидания атмосферы, а скорость регенерации в процессе карбонатного метаболизма и поступления в атмосферу останется на прежнем уровне. Будет накапливаться CO_2 , усилится парниковый эффект и восстановится более теплый климат. Если по какой-то причине на Земле произойдет потепление, обратная связь сработает в другую сторону, и равновесие установится. Предположим, что все океаны вымерзли, дожди прекратились, содержание CO_2 в атмосфере возросло. При современной скорости выделения его давление в 10^5 Па создается за 20 млн лет, такого количества углекислого газа хватит на поднятие средней температуры до $+50^\circ\text{C}$. Значит, льды растают, и восстановится нормальный для жизни климат.

В круговороте углекислого газа большую роль играют организмы, определяющие изменения климата. Около 20 % CO_2 , не участвующего в карбонатно-силикатном обмене, выводится из атмосферы фотосинтезирующими растениями. При гниении растений и окислении в почве накапливается CO_2 , и его оказывается в почве больше, чем было 400 млн лет назад до появления растений. Поэтому превращение силикатных материалов в осадочные карбонатные породы происходит быстрее. По расчетам исчезновение растений повысило бы температуру на 10°C за счет отрицательной обратной связи силикатно-карбонатного цикла.

Во многих геохимических процессах, в том числе в круговороте азота, углерода и серы, ключевую роль играют бактерии. Если бы эти процессы прекратились, то почва, атмосфера и вода стали бы непригодны ни для каких форм жизни, поэтому эти примитивные одноклеточные организмы можно назвать организаторами жизни на Земле. Увеличение температуры и возросший парниковый эффект создали бы на Земле климат, который был в середине мелового периода 100 тыс. лет назад: теплый и подходящий для некоторых форм жизни (включая и динозавров). По расчетам только водяной пар, дающий сейчас наибольший вклад в парниковый эффект, не мог бы обеспечить стабильные тепловые условия на планете при меняющейся светимости Солнца.

577

Если бы подобные процессы существовали на Марсе, они не смогли бы удержать климат в достаточно узких пределах. В атмосфере Марса углекислый газ создает давление только в 600 Па, что позволяет обеспечить парниковый эффект на уровне 6°C . Фотографии, полученные станциями «Маринер» и «Викинг», подтвердили, что поверхность Марса покрыта каналами, которые могли образоваться при выходе на поверхность глубинных вод, когда на Марсе было теплее. Геологи не определили, насколько когда-то температура Марса была выше. Может быть, тогда было больше (раз в 100) углекислого газа, обеспечивающего парниковый эффект. Но Марс меньше Земли по массе почти в 10 раз, и круговорот CO_2 должен быть слабее. Оценки возраста каналов по количеству покрывающих их метеоритных кратеров показывают, что он старше 3,8 млрд лет. Замедление процесса круговорота CO_2 произошло из-за механизма возврата газа в атмосферу, поскольку на Марсе, вероятно, не была столь выражена тектоника плит. Вулканическая лава покрывала карбонатные остатки, они погружались на глубины, где под действием давления высвобождался газообразный CO_2 , и по оценкам, так могло продолжаться примерно 1 млрд лет. Видимо, Марс из-за меньших размеров охлаждался быстрее, чем Земля: у него было меньше внутренней теплоты, которую он из-за большего отношения площади поверхности к объему скорее терял, его недра охлаждались, теряя способность высвобождать углекислый газ из пород. Углекислый газ из атмосферы постепенно накапливался в грунте, планета становилась все тоньше, меняя климат, и сейчас Марс имеет воду только в замороженном виде.

На Венере почти нет воды. Одни ученые считают, что ее там было не больше, чем нужно для образования гидратированных минералов, так как Венера образовалась из слишком горячей части туманности; другие — что воды было почти столько, сколько и у Земли, но она, попав в верхние слои атмосферы, распалась под действием солнечного света, а водород улетучился в космическое пространство.

Концепцию **разгоняющегося парникового эффекта** предложил Хойл (1955). Сейчас считается более подходящей теория *влажного парника*, так как при давлении 10^5 Па и водяного пара, и углекислого газа водяной пар занял бы 50 % объема, и большая часть его покинула бы атмосферу. Воздух в такой атмосфере охлаждался бы медленно, на высотах около 100 км образовалась бы холодная ловушка (слой, где низкая температура и высокое давление создают минимум точки насыщения). В ней и происходила бы фотодиссоциация воды, а из-за расположения ее на большой высоте водород ускользал бы в Космос. Для сравнения: у Земли такая ловушка расположена на высоте между 9 и 16 км (вблизи границы тропосферы и стратосферы), поэтому наш водяной пар успевает сконденсироваться, стратосфера оказывается сухой, не позволяя улетучиться водороду. Так к своему сухому и горячему состоянию пришла атмосфера Венеры. Если там и были океаны, они постепенно бы испарились, прекратилось образование карбонатов, CO_2 стал накапливаться в атмосфере. Газообразные соединения серы хорошо растворяются в воде. Сначала их

578

было мало, но затем они стали накапливаться и образовывать облака из серной кислоты, из которых сейчас

состоит атмосфера Венеры. К ней приходит солнечного света почти вдвое больше, чем к Земле, но ее кислотные облака отражают до 80 % света, и она получает теплоты и света от Солнца меньше, чем Земля. При отсутствии парникового эффекта Венера была бы не намного теплее Марса и холоднее Земли.

Светимость Солнца растет примерно на 1 % в 100 млн лет, т.е. через 1 млрд лет на Земле могут возникнуть условия, угрожающие существованию жизни и сохранению воды на ней. Многие из механизмов отрицательной обратной связи, которые способствовали стабилизации климата на ней в течение 4,5 млрд лет, могли бы действовать и на другой планете, расположенной дальше от Солнца в расширенном современными расчетами коридоре до 1,5 а. е., или на Марсе, будь он побольше сам и будь побольше его атмосфера. Итак, уже найдена полоса условий существования жизни для обнаруженных у какой-то звезды планет. Поверхность Земли пока представляется нам «космической чашкой Петри», где жизнь может зародиться и эволюционировать к достаточно сложным формам.

14.5. Концепции эволюции растительного и животного мира

Первые клетки, начало биологической эволюции, появились еще в **архейскую эру**. Следы жизни были незначительны, обнаружены остатки анаэробных автотрофных предшественников синезеленых водорослей. Переход к фотосинтезу, длительный, завершился около 1,8 млрд лет назад, изменив нашу планету. Атмосфера стала кислородной, возник озоновый слой, затрудняющий путь ультрафиолетовому излучению к поверхности Земли. Кислотность морской воды, наоборот, уменьшилась. Произошел переход от *прокариотов* к *эукариотам*. У них ДНК уже сконцентрирована в хромосомы, сосредоточенные в ядре клетки. Эта клетка воспроизводится почти без изменений, и в неизменной среде эти новые, «дочерние» клетки имеют преимущества при отборе.

В протерозое, длившемся 2 млрд лет, мир был населен еще одноклеточными, и только началось разделение клеток на растительные и животные. *Растительные клетки* покрывались более жесткой оболочкой, которая защищала их, но и мешала перемещению при добывании пищи. Эти клетки совершенствовались для накопления питательных веществ в процессе фотосинтеза — образовывались клетки как с автотрофным, так и гетеротрофным питанием. Обе эти группы участвовали в биотическом круговороте веществ и взаимно дополняли друг друга. *Животные клетки* были покрыты более эластичной оболочкой, не мешающей им пере-

двигаться в поисках пищи, которой им служили другие клетки, — растительные или животные. Эти качества совершенствовались, животные клетки поглощали все более крупные частицы, пропуская их через свою оболочку; естественный отбор ускорял эти усовершенствования.

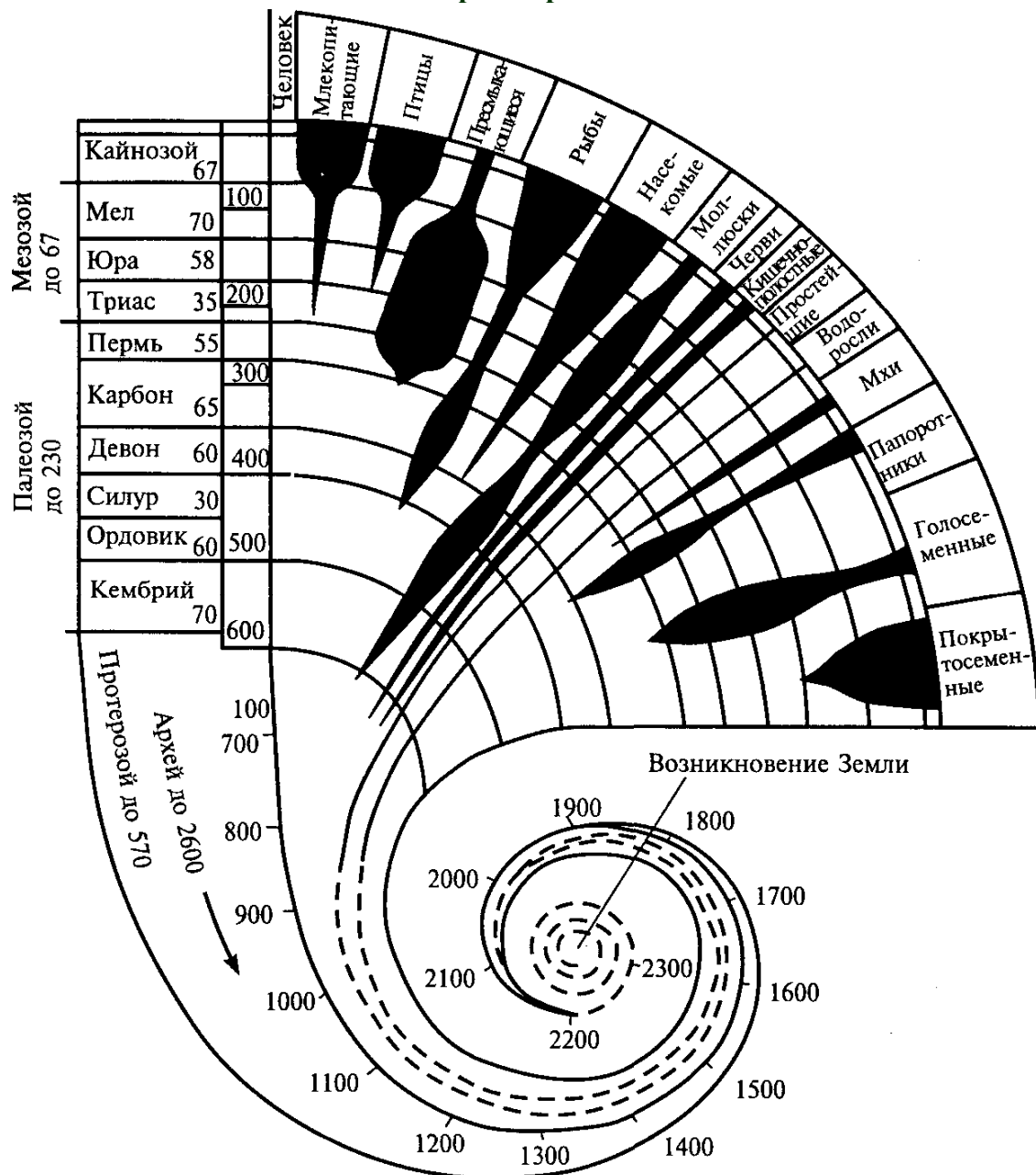
Следующий этап развития жизни и усложнения ее форм — появление полового размножения (≈ 900 млн лет назад). Его достоинство — в увеличении разнообразия видов и ускорении эволюции. Первые многоклеточные представлены губками, кишечнополостными, членистоногими. Их эволюция шла в направлении совершенствования способов передвижения и дыхания, лучшей координации деятельности клеток и пр. И за 100 млн лет усложнилась организация многоклеточных организмов с дифференцированным телом, органами и тканями, имеющими различные функции.

В протерозое и начале палеозоя растения живут в морской воде: бурые и зеленые водоросли прикреплены ко дну, а в толще воды находятся красные и золотистые водоросли. Из-за повышения солености морей животные, усваивая минеральные соли, смогли образовывать жесткий скелет (рис. 14.8).

В **кембрии**, длившемся 100 млн лет, произошел гигантский «взрыв» жизни. В море появились почти все виды животных, которые впоследствии развивались и совершенствовались: ракообразные, кораллы, моллюски, трилобиты, плеченогие, иглокожие. Среди окаменелостей кембрия находят немало остатков скелетов животных, похожих по строению на современные, которых не находили в докембрийских пластах. Этот скачок и определил границу между эрами на шкале геологического времени Земли. Но лишь немногие из видов животных, населяющих кембрийские моря, стали предками существующих ныне форм. Большинство видов вымерли, их считают «ошибками» природы.

Появление огромного разнообразия видов изменило и отношения между животными. Все шире распространялись организмы, питающиеся животной пищей, появились хищники, стали складываться современные типы животных сообществ, связанных пищевыми цепями. Обнаружены окаменелости хищников, поверженных ими жертв и у отдельных животных — приспособления для борьбы с хищниками. В ряде новых типов впервые возникли *раковина* и *экзоскелет*. У некоторых трилобитов развились длинные шипы, затруднявшие нападение хищников, которые стали важным элементом среды обитания. Как объяснить такой «взрыв» разнообразия форм 570 млн лет назад? Сильно изменились концентрации фосфатов, изотопов серы и стронция в морской воде, и, вероятно, еще в протерозое на поверхности суши в результате взаимодействия минералов, климатических условий и бактерий стала образовываться *почва*. Это подготовило выход на сушу растений, а

Рис. 14.8. Биогеохимическая связь эволюции живого и планеты Земля, представленная в виде «спирали времени»



затем и животных. К началу кембрия при обилии питания в морских водах раскололся суперконтинент, и возникли протяженные береговые линии с тропическим климатом. Считают, что тогда геном был существенно проще, и меньше мутаций оказывались летальными. Эта генетическая пластичность при обилии незанятых экологических ниш и привела к взрыву разнообразия видов. В ордовике (500 млн лет назад) в море появились плотоядные, имеющие длину до 10 м, и небольших размеров первые позвоночные — животные, имеющие скелеты. Вероятно, это были бесчелюстные рыбообразные, покрытые чешуей, которая помогала им спастись от хищников. Господствовали иглокожие, трилобиты. В конце ордовика начался переход на сушу первых споро-

581

вых растений, заселявших берега пресных водоемов. В морях распространились полухордовые (типа ланцетника). Поверхность Земли была красноватой из-за коррозии минералов железа в кислородной атмосфере.

В период **силура**, наступившего еще через 100 млн лет, появились **позвоночные** — панцирные рыбы — и продолжилось заселение суши растениями. Переход на сушу сопровождался изменениями в приспособляемости их к новой среде. Так, сильно возросла масса тела (на величину выталкивающей силы). В воздухе нет питательных веществ, выше содержание кислорода, и он пропускает свет и звук иначе, чем вода. Переселявшиеся на сушу растения получали эволюционные преимущества — при обилии солнечного света фотосинтез становился более совершенным. Чтобы ограничить испарение влаги, стала формироваться водонепроницаемая оболочка, для обеспечения питанием в новой среде развивалась корневая система, для

укрепления и поддержания в условиях суши формировалась и древесина. Происходила дифференциация тела на корень, стебель и лист. Изменилась и репродуктивная система — на суше оказались непригодными для размножения свободно плавающие половые клетки, стали формироваться семена и споры. *Спорофитная ветвь* оказалась более приспособленной к жизни, ее представляют высшие растения. *Гаметофитное* направление представлено мохообразными. К концу силура поверхность Земли вблизи водоемов приобрела зеленый цвет: из древних голосеменных и прогимноспримов появились и животные — паукообразные (типа современных скорпионов).

В девоне появились *двоякодышащие*, т. е. помимо дыхания в воде они могли дышать и легкими, а также *хрящевые* рыбы — акулы и скаты. У акул сложная система поведения, прекрасные обоняние и электромагнитная система ориентации, почти не изменившиеся за прошедшие 400 млн лет. В этот период появились и *костистые* рыбы; двоякодышащие пресноводные рыбы, вероятно, дали жизнь первичным земноводным, а затем и сухопутным позвоночным. Постепенно вырабатываются разные способы укрепления каркаса тела: помимо внутреннего каркаса у позвоночных складывается и наружный — у насекомых. Появившиеся *насекомые* обладают достаточно сложной системой отражения, врожденные рефлексы преобладают над приобретенными, по всему телу распределены нервные центры, тогда как у позвоночных развивается в основном мозг и преобладают условные рефлексы над безусловными. Эти различия возрастали и стали проявляться после перехода к жизни на суше. В девоне возникли *грибы*, сушу освоили пауки и клещи.

В карбоне климат был теплый и влажный, Земля покрылась морями и большими заболоченными территориями, широко распространились кораллы и моллюски. В условиях постоянного лета

582

разрослись густые тропические леса папоротникового типа. Началось активное заселение суши животными. Первыми из позвоночных, приспособившимися к новым условиям среды, стали *рептилии*. Яйца рептилий покрыты скорлупой, предохранены от высыхания и снабжены питанием для эмбриона. Некоторые уходили в воду (мезозавры), а другие, наоборот, удалялись от воды. Растения карбона тоже уже приспособились удерживать воду и защищать семена от высыхания, мощные споровые растения достигали высоты 40 м. К концу периода распространяются голосеменные, у которых происходит переход от одинарного набора хромосом к двойному. Так растут генетические возможности организмов. Дальнейшая эволюция шла по совершенствованию семян. Переход к семенному размножению обладал рядом эволюционных преимуществ, и семенные растения разрастались. Появились первые хвойные. К концу периода карбона (285 млн лет назад) климат стал более засушливым, земноводные, которые преобладали эти 60 млн лет каменноугольного периода, стали вытесняться пресмыкающимися, способными удаляться на большие расстояния от водоемов.

В конце палеозойской эры, в **перми**, воздух осваивают огромное количество насекомых. Появились и покрытосеменные растения. Такие семена могли переносить животные, и растения формировали средства, привлекающие животных. *Цветковые* — чрезвычайно разнообразны по цвету, форме и запаху. И сейчас в тропических лесах почти 80 % составляют покрытосеменные растения. Земноводные (амфибии) жили на суше; у них усовершенствовалось легочное дыхание, развились пятипалые конечности с плечевым и бедренным суставами. Но размножались они с помощью икры, которую метали в воду, поэтому они не могли удаляться далеко от водоемов. В связи с этим господство земноводных на Земле было непродолжительным.

Мезозойская эра продолжалась 170 млн лет и закончилась 70 млн лет назад. Она разделена на три периода: триасовый, юрский и меловой. Ее называют эрой пресмыкающихся, распространившихся по всей планете и достигших огромного разнообразия. Некоторые рептилии стали хищными, а другие — травоядными. В триасе размеры динозавров достигли 6 м в длину и увеличивались по мере овладения планетой. Появились черепахи, крокодилы и первые млекопитающие. В юрский период (длвшийся 60 млн лет) возникли *птицы*, но первые (археоптерикс) напоминали не только птиц, но и рептилий. Развивались морские рептилии — ихтиозавры и плезиозавры, появились летающие ящеры — птеродактили. К меловому периоду относится появление гигантских растительноядных динозавров — брахиозавров (длиной до 30 м, массой до 50 т). В конце мезозоя климат стал более холодным, сократились площади областей с богатой растительностью, что

583

привело к гибели сначала растительноядных, а затем и плотоядных динозавров. Преимущество в развитии при похолодании получили теплокровные животные — птицы и млекопитающие.

Кайнозойская эра, которая началась 67 млн лет назад, разделена на три периода: палеоген, неоген и четвертичный. Преобладают цветковые растения, насекомые, птицы и млекопитающие; прогрессируют покрытосеменные растения, формируя новые систематические группы. В начале палеогена (палеоцене) после вымирания динозавров почти все экологические ниши на суше, воде и воздухе заняли млекопитающие, среди них появились и первые хищные. Млекопитающие имели большое преимущество перед господствовавшими ранее пресмыкающимися, так как меньше зависели от перемен окружающей среды. Они имели более развитый мозг, вынашивали детенышей в теле матери и питали их через плаценту, поддерживали постоянной температуру тела. От первых хищников произошли копытные, от некоторых видов насекомоядных — приматы. В неогене появились многочисленные виды обезьян, а в конце периода — плиоцене (8 — 3 млн лет назад) сформировались почти все современные семейства млекопитающих (тогда их было 140, сейчас —

около 95). Часть млекопитающих ушла в море: китообразные и ластоногие.

Палеоген и неоген иногда называют *третичным периодом*, а четвертичный период — *антропогеном*. Этот последний период, начавшийся 3 млн лет назад, характеризуется заметным похолоданием. Северное полушарие четырежды подвергается оледенению. Вымирают многие крупные животные: мамонты, саблезубые тигры и др. Природа принимает почти современный вид, в животных формируются тенденции стадного образа жизни. При этом у млекопитающих переход к стадному образу жизни не вел к потере индивидуальности, как у насекомых, а, наоборот, подчеркивал ее. Эти тенденции вели к возникновению человека. Эволюционное отделение ветви, которая привела к появлению современного человека, произошло примерно 13 — 7 млн лет назад. В эмбриональном развитии человека есть черты, похожие на черты всех животных типа хордовых, класса млекопитающих, подкласса плацентарных и отряда приматов.

14.6. Человек — качественно новая ступень развития биосферы

Современные представления о человеке связаны с феноменом его появления как итога эволюции органического мира. Некоторые ученые считают началом выделения человека — появление *прямохождения*. Останки такого человека найдены в Эфиопии, им около 4 млн лет. По ним можно видеть, что тогда не было ни

огня, ни орудий труда. Прямохождение освободило руки, развивалась рука для иных целей — на ней выделился большой палец. Появление огня датировано 1,4 — 1,9 млн лет. Выделяет человека из животного мира не только использование огня, но и захоронение трупов. В Кении найдено захоронение человека в возрасте *человека умелого*, которому 1,8 млн лет. Считается, что заселение Европы и Азии шло с Ближнего Востока. В районе Горно-Алтайска академик А. П. Окладников обнаружил следы гоминизации на отметке 1,5 млн лет.

Появление человека — качественно новый этап развития биосферы, который обеспечил *разум человека*. Благодаря разуму человечество стало самоорганизующейся системой. Еще в прошлом веке И. М. Сеченов говорил, что понять человека можно только в единстве плоти, духа и природы, частью которой он является (1861): «Организм без внешней среды, поддерживающей его существование, невозможен, поэтому в научное определение организма должна входить и среда, влияющая на него». Сходство человека с животным определяется не только элементарным составом и строением тела (те же белки и нуклеиновые кислоты, те же структуры и органы), но и поведением. Кроме того, человеческий зародыш проходит во внутриутробном развитии все стадии эволюции вида. Дополнительные доказательства: рудиментальные органы, атавизм, многие черты поведения. У животных, как и у человека, развита система общения с помощью тех или иных сигналов.

Изучив огромный материал по зародышевому развитию губок, иглокожих, кишечнотелостных и других беспозвоночных, наши естествоиспытатели И.И.Мечников и А.О.Ковалевский обосновали идею *единства происхождения всего органического мира*. Развивая эти исследования и обнаружив внутриклеточное пищеварение в подвижных клетках соединительной ткани беспозвоночных, Мечников разработал теорию *фагоцителлы* — теорию происхождения многоклеточных организмов (1880). Фагоцитоз — это способность особых, блуждающих клеток активно захватывать и уничтожать различные инородные тела (в том числе и микробы). Если побеждают фагоциты, больной выздоравливает, в противном случае — умирает. У высших животных, например, типичными фагоцитами (пожирателями) являются белые кровяные тельца — лейкоциты. Процесс проникания лейкоцитов через стенки сосудов к месту воспаления — одно из наиболее интереснейших явлений природы. На многих опытах с холерными микробами (в том числе и на самом себе) Мечников доказал, что фагоцитоз играл наибольшую роль в формировании невосприимчивости организма к инфекциям.

В притягательную для любого человека область явлений психики впервые проник И.М.Сеченов. Он первым высказал положение о наличии

связи жизненной деятельности клетки с внешней средой. Сеченов доказал, что психическая жизнь человека и, в частности, его сознание являются результатом деятельности мозговых клеток (1863). Он утверждал, что все акты сознательной и бессознательной жизни человека по способу прохождения — только рефлексы, причем источником рефлексов могут быть как внутренние, так и внешние раздражители. У человека в качестве таких источников могут быть нравственные регуляторы. Демонстрируя в опытах на себе скорость прохождения рефлекса, он силой воли задерживал скорость некоторых из них. Отсюда — особая роль столкновения человека с жизнью, воспитания в широком смысле слова в нравственной регуляции поступков, а значит, и в скорости тех или иных реакций организма. Эти исследования дали основания И. П. Павлову утверждать, что «приближается важный этап человеческой мысли, когда физиологическое и психологическое, объективное и субъективное действительно сольются и... отпадет естественным путем противопоставление моего сознания моему телу». Павлов перешел от изучения связей организма с окружающей средой, осуществляемых нервной системой, к исследованиям функций больших полушарий головного мозга. Он разделил рефлексы на безусловные и условные. В 1925 г. он открыл при своей лаборатории две клиники —

нервную и психиатрическую, в которых применял для лечения результаты, полученные в исследованиях высшей нервной деятельности. Таким образом, он показал, что ряд нарушений душевной деятельности (например, шизофрения) связан с подчеркнутым проявлением так называемого охранительного торможения.

Исследуя качественные различия высшей нервной деятельности человека и животных, Павлов разработал учение о двух сигнальных системах: первой, общей для обоих, и второй, свойственной только человеку. Высшие животные способны понимать слова и эмоции, но они не способны к формированию отвлеченных понятий. Мышление животных всегда конкретно, тогда как человек формирует обобщения, понятия. При помощи второй сигнальной системы осуществляется высшее человеческое отвлеченное мышление. Способность к понятийному мышлению отражает *интеллект человека*. Человек имеет план своей работы, он способен сознавать и понимать происходящее в мире. Развитая речь позволила расширить общение с помощью слов, к этому не способны животные. Недаром — «в начале было Слово». Оно способствовало организации людей в общество. Человек не только способен к труду, но и целенаправленно изготавливать орудия труда.

Мир живого — самоорганизующийся. Подобно тому как биосфера — самоорганизующая целостность, таковы и все ее уровни. Для животного мира формой организации является стадо. Социальное поведение животных — это эволюционный механизм, определяемый преимуществами общественной жизни. Постепенно потребность в обеспечении безопасности у животных становилась высшей потребностью, сформировала соответствующие инстинкты. Сначала была анонимная стая, потом появилась безличная,

586

затем личная семья. *Этология* (от греч. *этнос* — поведение, характер, нрав) — наука о поведении животных — показывает, что в животном мире есть общественная жизнь с эмоциями и чувствами. К.Фриш экспериментировал с пчелами, а К.Лоренц и Н.Тинберген изучали более сложное поведение многих видов птиц, рыб, млекопитающих и насекомых.

Проблема соотношения социального и биологического интересов ученых и философов во второй половине XX в. Любовь — сдерживающий агрессию фактор, эволюционно выгодный, поскольку обеспечивает репродукцию. У большого числа видов существует *иерархическая* форма организации, в том числе и у высших животных. Управляет такой организацией чаще всего одна особь, но встречается и *коллегиальное* управление. Пчелы, муравьи и термиты живут колониями, организованными по кастовому признаку. Приматы имеют более гибкую систему, в которой возможно перераспределение ролей. Есть группы, которые ведут непримиримую борьбу за первенство, такими являются сообщества крыс — спутников человека. По Лоренцу, «крыса пользуется теми же методами, что и человек: традиционной передачей опыта и его распространением внутри тесно сплоченного сообщества... Там, где отбор производится соперничеством сородичей самим по себе, — там существует огромная опасность, что сородичи в слепой конкуренции загонят друг друга в самые темные тупики эволюции». К 80-м гг. позиция Лоренца сместилась в сторону большей гуманизации человека и общества. Биологизация человека ведет не только к пассивности в воспитании, она может служить и идейным основанием различных форм расизма. Но к началу XXI в. был расшифрован геном человека, и стало известно, что расовые отличия в нем отсутствуют.

Человек — биосоциальное существо. Он прошел путь эволюции, сформировалось общество, и человек — его *социальный продукт*. Разрушение в человеке его социальной сущности — возврат к животному миру. Эти проблемы обсуждались еще в античности: киники видели природу человека в его естественном образе жизни, Эпикур — в его чувствах (одинаковых у человека и животных), стоики — в разуме. Сейчас этим занимается наука — *социобиология*. Поэтому человек обречен на развитие, на самоусовершенствование через индивидуальность и через общество. Индивидуальность оттачивает миропонимание, общество ставит рамки, в которых индивидуальное миропонимание играет положительную роль в обществе. Появление противоречий между индивидуальным и общественным отражает инерцию в развитии; она спасает от крайних флуктуаций в развитии индивидуальности и действий индивида в отношении общества. Но слишком большая инерционность общества может и «задавить» личность, если индивидуальность не будет ее учитывать, т. е. система «личность — обще-

587

ство» развивается в самосогласованном режиме: личность созревает в обществе, а общество создается под влиянием личности. Единство биологического и социального — основа феноменологии человека. Примеров нарушения этого баланса в человеческой истории предостаточно, и все они поучительны. Многократно общество расправлялось с индивидуальностью, чем наносило ущерб своему развитию. Часто и гениальная личность ввергала общество в различные авантюры.

Общество тоже прошло определенную эволюцию. Существует *культурно-историческая концепция*, идущая из Древней Греции. Геродот противопоставлял Европу — мир эллинских полисов и Азию — персидскую монархию. Деление на пролетариат и буржуазию в некотором роде соответствует этой концепции. Согласно другой концепции, история общества — единый процесс развития всей планеты. Сначала общество опиралось на четыре империи — Ассирийскую, Персидскую, Македонскую и Римскую. А. Дж. Тойнби в качестве единицы всемирной истории выбрал национальное государство, пытаясь совместить эти оба подхода. Потом заменил новой единицей — *локальной цивилизацией*. Он выделил среди

«неевропейских» 21 цивилизацию в 16 регионах планеты. Среди цивилизаций — «примитивные» и «цивилизованные». Развитие общества идет через мимесис (подражание). В примитивных цивилизациях — это подражание предкам, т. е. общества статичны. Цивилизованные общества динамичны: подражают личностям, которые «бросают вызов» трудностям и преодолевают их через усилия. Этими вызовами могут быть природные катаклизмы, нападение чужеземцев или распад предыдущих цивилизаций. Объединительные тенденции развития обществ Тойнби связал с мировыми религиями, среди которых — *зороастризм, иудаизм, буддизм, христианство, ислам*. При этом он постепенно пришел к идее «экуменического» видения истории, считая, что главное последнее единение может быть достигнуто на базе объединенной религии.

Универсальный эволюционизм исходит из представления, что возникновение духовного мира человека, его планеты и Вселенной — результат самоорганизации, саморазвития человека как биологического вида и общества как структур человечества.

14.7. Концепции коэволюции и ноосферы

Химическую эволюцию можно трактовать как результат взаимодействия химических элементов, биологическую — организмов, концепция коэволюции объясняет эволюцию в схеме «хищник— жертва», когда оба объекта должны постоянно совершенствоваться. Концепция коэволюции объясняет существование альтруизма

588 у животных — заботу о потомстве, повиновение вожакам, взаимопомощь в трудных условиях и т. д.

Гипотеза о Гее—Земле возникла на основе концепции коэволюции, учения о биосфере и экологии. Ее сформулировали химик Дж. Лаклок и микробиолог Л. Маргулис, выделив неравновесность атмосферы Земли. Это обычно считается признаком жизни, ведь присутствие жизни обнаруживается через изменение химического состава атмосферы. Применив к Земле системный подход, Лавлок ввел понятие *геофизиологии*. Они посчитали, что сохранение в течение длительного времени химической неравновесности атмосферы определено совокупностью жизненных процессов. На ранней Земле существовал механизм автоматического регулирования тепловых процессов, осуществляемый двуокисью азота. Так возникало препятствие для потепления при росте яркости солнечного света — механизм обратной связи. Изменение яркости солнечного света увеличивает разнообразие, способность регулировать температуру поверхности Земли, т.е. увеличивается биомасса.

Но Земля — саморегулирующаяся система. Это связано с наличием биоты и окружающей среды, которая способна менять химический состав атмосферы и поддерживать столь важное для жизни постоянство климата. Когда эта система находится в состоянии, близком к границам саморегуляции (стресс), то даже малое изменение какого-то параметра способно вызвать переход в новое стационарное состояние («эффект бабочки», см. гл. 13). Жизнь на Земле — сеть связей, обеспечивающих саморегуляцию системы. Маргулис предположила, что эукариотические клетки произошли от симбиоза прокариотических (типа бактерий), митохондрии — от аэробных бактерий, а хлоропласты были тогда фотосинтезирующими бактериями. Поэтому *симбиоз* — один из наиболее созидательных факторов эволюции. Совместная жизнь является источником разнообразия, приводит к появлению новых видов и признаков. Эта симбиотическая эволюция хорошо согласуется с идеями синергетики. Образование колонии, к примеру, можно описать так. Начальной флуктуацией служит локальное увеличение концентрации комочков земли, возникшее в какой-то точке пребывания колонии термитов. Каждый такой комочек привлекателен для других, поскольку пропитан гормонами. Флуктуация разрастается до размеров, ограниченных радиусом действия гормона. Так целесообразность на уровне организмов становится целесообразностью на уровне сообщества.

Попытку научно обосновать качественные изменения взаимодействия природы и общества под влиянием деятельности человека предпринял Вернадский. Он считал, что Земля и Космос — единая система, в которой жизнь и живое вещество играют важную роль. Вернадский ссылаясь на минеролога и биолога Д. Д. Дана — современника Ч.Дарвина, который показал, что эволюция

589 живого вещества идет в определенном направлении. Он указал, что в ходе геологического времени (более 2 млрд лет) наблюдаются скачкообразный рост и усовершенствование центральной нервной системы (мозга), начиная с ракообразных и моллюсков до человека, этот необратимый односторонний процесс Дан назвал *цефализацией*. Исходя из геологической роли человека А.П.Павлов говорил об антропогенной эре. В XX в. человек не только закончил карту Земли, вышел в Космос и осмотрел ее со стороны, он благодаря средствам связи стал частью единого человечества. Развитие Человека и Общества в природной среде становятся неразрывными. Но по массе своей человечество составляет ничтожную долю массы планеты, значит, сила в растущем разуме, в цефализации.

Появление человека не только изменило биосферу, но и результаты ее *планетарного влияния*. Начался переход простого приспособления организмов к разумному поведению и целенаправленному изменению окружающей природы разумными существами. Постепенно человек стал решающим фактором преобразования планеты, и последствия появления человека разумного на Земле многофункциональны.

Человек вывел много новых растений и животных, увеличив разнообразие природы, но многие виды в силу разных причин оказались на грани уничтожения или уже исчезли. Живая природа активно реагирует на вмешательство в нее человека. Быстро возросла, например, невосприимчивость грызунов и насекомых к ядам, которые использует человек. Появляются самые разные мутанты. Человек создает *техносферу*, не составляющую целостную систему с биосферой, не способствующую созданию новых запасов энергии. Уничтожение полезных ископаемых и живого, изменение ландшафтов и состава атмосферы ставит биосферу уже на грань катастрофы.

Вернадский говорил, что «биосфера перейдет однажды в сферу разума — ноосферу. Произойдет великое объединение, в результате которого развитие планеты делается направленным силой Разума». Сам термин «ноосфера» возник на семинаре, где выступал Вернадский со своей концепцией биосферы. Его широко использовали Э.Ле Руа и П.Тейяр де Шарден, но понимали его как «оболочку мысли» на планете. По мнению Тейяра де Шардена, возникновение мысли — явление, которое знаменует собой «трансформацию, затрагивающую состояние всей планеты».

Ноосфера — это высшая ступень интеграции всех форм существования материи, когда любая преобразующая деятельность человека будет основываться на научном понимании естественных и социальных процессов и органически согласовываться с общими законами развития природы. Это высший этап эволюции системы «природа—общество», который только формируется и должен быть, если человечество хочет жить без глобальных потрясе-

590

ний. Такой тип отношений «природа — общество» соответствует коэволюции. В структуре ноосферы можно выделить человечество, совокупность научных знаний, сумму техники и технологий в единстве с биосферой.

Солнечная энергия запустила геохимические циклы круговорота химических элементов, в которые втягиваются все новые массы вещества. Образовавшиеся толщи осадочных пород запасли энергию биомассы (в форме газа, угля, нефти). Эти преобразования планетарного масштаба и произвели человека — носителя Разума. Человек зависит от биосферы, он — ее порождение. Чтобы подчинить своему развитию среду обитания, он должен овладеть биосферными процессами, иначе будет обречен как биологический вид. Но обеспечение коэволюции человека, природы и общества требуют введения некоторых ограничений деятельности. Поэтому переход в ноосферу означает обязанность человека взять ответственность за дальнейшую эволюцию биосферы в целом, т. е. и за себя, действуя по принципу «не навреди». В учении о ноосфере Вернадский впервые осознал и попытался осуществить синтез естественных и общественных наук в исследовании глобальной деятельности человечества. Живое вещество преобразует верхнюю оболочку Земли, постепенно человек становится силой геологического масштаба, поэтому и несет ответственность за эволюцию планеты. Сам он использовал это понятие в разных смыслах: как состояние планеты, когда человек становится преобразующей геологической силой; как область активного проявления научной мысли; как основной фактор перестройки и изменения всей биосферы.

Ноосферный этап (этап допустимого развития) состоит в том, что экономические и экологические проблемы взаимоотношений с биосферой определяются не выживанием человечества, а сохранением экосферы в гармонии живой и неживой материи, сохранением гармонии природы с сохранением ресурса животного и растительного миров, сосуществующих в биоценозах и экосистемах.

Отношения в системе «человек—природа» строились по-разному в разных культурных традициях. В классической западноевропейской культуре: природа — пассивный материал для проявления творческих возможностей человека; в восточной культуре она — источник благоговейного почитания до полного растворения в ней человеческого начала; в российской — сложилась самоценность природы, она — активный материал, соразмерный статусу человека и мироздания. Вернадский наметил для достижения этапа ноосферы серию мероприятий: решить проблему разумной плотности народонаселения и оптимальной численности жителей Земли; ликвидировать бедность; расширить границы биосферы и выйти в космос; открыть новые источники энергии; оценить допустимость и достаточность экономического развития в рамках

591

сбалансированного самовосстановления биосферы; исключить войны из жизни общества; поднять культуру человека на всех уровнях организации общества.

Сходные предложения были разработаны биофизиком А. Л. Чижевским — создателем *гелиобиологии*. Он установил связь между цикличностью процессов на Солнце и явлениями в биосфере. Его концепция, основанная на богатом фактическом материале, доказывала существование космических ритмов и их связь с биологической и общественной жизнью. Чижевский ввел представление о компенсаторно-защитной функции биосферы, необходимой для существования живых организмов на Земле. О расселении человечества в будущем в космосе говорили представители течения «русский космизм», идеологами которого были Н.Ф.Федоров, К. Э.Циолковский.

Концепция устойчивого развития основана на биотической регуляции среды. Мир в целом в своем техническом, экономическом и социально-политическом развитии приблизился к точке бифуркации — рубежу, за которым равновероятны выход на качественно новый (более высокий) уровень бытия системы и ее

гибель. Поэтому переход на путь устойчивого развития предлагает не только установление необходимого баланса между потреблением и воспроизводством природных ресурсов при минимальном загрязнении среды, но и обеспечение устойчивого роста благосостояния, социальной защищенности и возможностей гармоничного развития каждого. Устойчивое развитие — это альтернатива неустойчивости мира, означающая развитие системы в режиме ее внутреннего динамического равновесия. В начале XXI в. слово «выживать» стало одним из самых употребляемых в национальном и международном лексиконе. И здесь велика роль ценностных установок общества и, значит, субъективного фактора истории — особая ответственность ложится на правящие политические структуры, принимающие решения и организующие изменения в массовом сознании. Они составляют духовную основу устойчивого развития. Как выразился У.Черчилль, «Пессимист видит препятствия в каждой возможности, а оптимист — возможности в каждом препятствии».

Словосочетание «устойчивое развитие» появилось после Конференции по окружающей среде и развитию, которая состоялась в Рио-де-Жанейро в июле 1992 г. Это экономически поступательное движение или устойчивость темпов экономического роста, при котором уровень давления на окружающую среду компенсировался бы темпами восстановления ее свойств. Преодоление трудностей, стоящих перед современным человечеством, не может быть достигнуто ни средствами магического мышления, ни призывами «вернуться к гармонии с чистой природой». Тут требуется мышление рациональное, которое способно не только предвидеть ката-

592

строфы, но и в ряде случаев указать пути их недопущения. «Сложное переплетение вопросов экологии, экономики и политики можно распутать методами математического моделирования», — считают современные ученые Р. Г. Хлебопрос и А. И. Фет в книге «Природа и общество». Итак, единственная возможность выживания человечества при росте потребностей — это использование механизма природной среды как саморегулирующейся системы. В этом смысл ноосферных преобразований.

14.8. Естественно-научная картина мира и общественная мысль

В Древней Греции науки о природе и обществе были тесно взаимосвязаны. Начало разделению духа и материи положило атомистическое учение. Эпоха Возрождения открыла экспериментальный путь исследования природы и математическую формулировку теорий, следствия из которых проверялись опытным путем. Отделение гуманитарного знания от естественно-научного относится к Новому времени. Исключив из описания мира Бога и человека, наука способствовала бурному росту промышленности. Но, как стало ясно в последнее время, научный рационализм имел для Человека и Природы и отрицательные последствия.

Естественно-научные достижения породили уверенность, что любыми процессами можно управлять так же, как предсказывать траекторию движения небесных тел. Поскольку физика шла по пути рассмотрения простых систем и простых моделей, которые старались применять к системам реальным и которые описывали наиболее существенные черты явлений вблизи положения равновесия, то этому следовали и другие науки. В механистический век Т. Гоббс описывал государство как машину, где шестернями служат граждане. «Невидимая сила» рынка А. Смита действовала как сила всемирного тяготения. Да и квантовая механика строилась по образу классической — уравнение Шредингера линейно, для волновой функции выполняется принцип суперпозиции. Это привело к неопределенности собственных значений, к невозможности единообразно описать процесс измерения. В копенгагенской трактовке квантовой механики пришлось говорить о расщеплении суперпозиции состояний (прибора и квантовой системы) или о коллапсе волнового пакета. Оказалось, что процесс измерения вдали от равновесия необратим и линейное мышление работает лишь в ограниченных условиях.

Биосоциальные явления имеют сходство с физико-техническими, несомненно их волновая природа. Периодичность общественных событий связывают с цикличностью самой природы и человека, периодической повторяемостью его потребностей. А.Л.Чижевский писал: «Если бы мы попытались графически представить

593

картину многообразия этой цикличности, то получили бы ряд синусоид, накладывающихся одна на другую или пересекающихся одна с другой... В этом бесконечном числе разной величины подъемов и спусков сказывается биение общемирового пульса, великая динамика природы, различные части которой созвучно резонируют одна с другой». В экономике, например, известно несколько рынков со своей динамикой, которые подвержены различным циклам. Так, годичный цикл определяет сельскохозяйственный или туристический рынки, отсюда сезонные распродажи овощей, зерна, топлива, путевок. Экономические модели циклов деловой активности строились в 30-е гг. (модели Хансена— Самуэльсона или Лундберга — Метцлера) и были линейными, а для объяснения нерегулярностей вводился внешний толчок. Аналогичные циклы были выделены Питиримом Сорокиным в истории открытий и изобретений, прослеженных им с XV в.

Сейчас понятно, что окружающий нас мир представляет собой сложную систему, скорее иерархию взаимодействующих систем, когда каждая из этих подсистем должна рассматриваться как открытая; физическая картина мира изменилась. Новое мировоззрение основано на идее эволюции и единства мира, на понятиях вероятности и самоорганизации, на нелинейных взаимодействиях. Этот взгляд неминуемо должен

проявиться и в гуманитарных знаниях, и не просто по внешней аналогии. Процессы описываются одними математическими уравнениями, на одном языке. Сформировалась *междисциплинарная методология* для объяснения процесса образования макроскопических явлений, возникающих вдали от равновесия в открытых системах при превышении некоторого порогового значения фактора внешнего воздействия из-за возникновения нелинейных взаимодействий на микроуровне. Макроскопическими явлениями могут быть различные виды световых или химических волн, жидкостей, растения, популяции, рынки, ансамбли атомов, молекул, клеток, организмов, животные... Они возникают из-за взаимодействия на микроуровне между разными силами, разными частицами. Процессы описываются одинаково, и хотя в каждой предметной области конкретные выводы могут отличаться, общая эволюционная тенденция остается.

Американский астрофизик член Римского клуба Э.Янч, например, считает, что флуктуационную теорию эволюции нужно развить до политической теории и что именно так поступил К.Маркс на основе естественно-научных знаний своего времени, когда описывались равновесные процессы и каждая замкнутая система стремилась к состоянию равновесия. Поэтому равновесная и статичная картина мира прошлого века не могла не завершиться теорией бесклассового общества как конечной точки движения всей человеческой истории. С микроскопической точки зрения общество состоит из индивидов со своими стремлениями, желаниями,

594

убеждениями. Но развитие рынков, наций, культур не отражается простой суперпозицией своих частей. Тот же А. Смит подчеркивал, что намерения индивидов несущественны для рынка, баланс поддерживается «невидимой рукой», т.е. нелинейным взаимодействием потребителей и производителей. Поведение сложных систем в общественных науках должно быть описано нелинейными моделями. Стандартные экономические модели должны быть переформулированы в терминах нелинейностей, и введение нелинейностей привело к понятию странных аттракторов в экономике, когда небольшие отклонения в начальных условиях приводили к существенному изменению траектории (так называемый «эффект бабочки»).

Пока социальные волновые процессы только исследуются, но понятия, сложившиеся в теории колебаний, уже применяются для их анализа. Развитие общества представляют спиралевидным необратимым процессом с элементами повторяемости и цикличности, описываемым диалектическими законами «отрицания отрицания» и «единства и борьбы противоположностей». Социальный или экономический порядок интерпретируется с помощью представлений синергетики — с использованием аттракторов фазовых переходов. Социологические исследования включают теорию «управляемого общественного прогресса», основанную на общей «социологии конфликтов», анализ специфики социальных институтов культуры, политики и экономики, а также концепции самоорганизации и самоуправления общественных систем.

Новое мировоззрение, опирающееся на достижения современных естественных наук, связано с понятиями вероятностей, случайностей, выбора, информации и ее кодирования. Стремительное развитие и вторжение кибернетики и ЭВМ в нашу жизнь по своим последствиям гигантски превышают перемены в обществе после изобретения книгопечатания. Микро- и нанoeлектронные технологии, вызвавшие небывалый количественный рост и снижение стоимости вычислительной техники, сделали доступными массовому потребителю ЭВМ и компьютерные *информационные сети*. Динамику информационных технологий также можно моделировать. Общество переходит от традиционных производств, связанных с товаром, к индустрии знания, работающего на получение информации и экономию информационных средств. Отсюда задача совершенствования отношений между человеком и средствами информации. Изменения коснулись и средств передачи и переработки информации. В образовательных технологиях снижается роль личной беседы, лекции, общения с учителем. На смену им приходит дистанционное образование, использующее современные каналы связи и общемировые информационные ресурсы, например система Интернет. Человечество переходит от индустриальной эпохи к *постиндустриальной*, или *информационной*. Это

595

означает, что источники информации доступны любому человеку в любой части Земли. И наоборот — генерируемая людьми новая информация мгновенно становится достоянием всего человечества.

Полученный вывод, что самоорганизация есть результат собственного, внутренне необходимого изменения системы, распространяют и на общественные процессы. Фактически это переход от стихийной эволюционно-биологической организации к социально-организованному уровню материальных структур. Благодаря дальнейшему развитию общественно-трудовой деятельности, зачатки которой Кропоткин отметил в особенностях группового поведения животных, человечество от животной формы перешло к социальным формам взаимодействия с окружающей природой. Исследование закономерностей прогрессивной эволюции можно построить, выделив три положения: 1) усложнение организации биотической среды (взаимодействие живого с живым) — решающий фактор эволюции; 2) внутренние процессы, определяющие направление развития, есть результат предыдущих этапов развития; 3) антропогенный фактор имеет доминирующее значение в процессе эволюции. Изучение естественной предыстории человечества на основе представлений о самоорганизации систем открывает возможности создания целостной теории эволюции.

Академик Н.Н.Моисеев считал каждый ее этап бифуркационным, т.е. само развитие может в любой момент пойти непредсказуемым путем. Но с развитием интеллекта человек приобрел способность гибкого реагирования на внешнюю информацию, предвидения событий и принятия соответствующих решений. При

возникновении новых общественных отношений был отброшен первобытный стадный коллективизм, преодоление которого шло скачкообразно, через диалектическое отрицание. Росли дифференцированность особей и групп, и эти «морфологические» изменения стали важными для обеспечения эволюционной эффективности форм интеграции. Больше шансов на оставление потомства имели как сильные особи, так и выделяющиеся по своим интеллектуальным и другим (личностным) особенностям индивиды, а также члены стада, выражавшие лучшие качества коллектива. В межстадных коммуникациях проявлялись свойства открытых систем, и межгрупповой отбор определял успех групп, которые были более передовыми в способах групповой организации: обеспечивали надежную природную основу для фиксации, накопления и передачи опыта в процессе социогенеза.

Высокая степень потенциальных возможностей человека и низкая степень их реализованности в случае неэффективной организации современного общества указывают на опасные тенденции развития. Оно может идти как в сторону саморазвития, так и в

596

сторону самораспада. Когда в XVIII в. Мопертюи выдвинул свой экстремальный принцип для величины, названной в механике действием, Эйлер отметил, что реальные траектории из всех возможных выбираются не обязательно по идее минимума действия вдоль них, возможен и максимум. Главное, что первая производная — нулевая, т.е. удовлетворяет условию экстремума. И, развивая аналогичную естествознанию схему, можно сказать, что в живой природе реальным оказывается максимум экстремума действия, а в неживой — минимум. Если обратиться, например, к книге «Поиски вымышленного царства» Л.Н.Гумилева, то в ней название каждой главы как бы отражает определенный уровень организации общества, пассионарность представляется физическим действием, а экстремальные ситуации в жизни общества сопровождаются состоянием крайнего дискомфорта. Перспектива движения к развитию или распаду определяется уровнем самоорганизации общества.

К числу критериев, определяющих высокий уровень самоорганизации и, следовательно, относительную устойчивость общественных систем, относят «способность системы противостоять деструктивным тенденциям и воздействиям окружающей среды, поддерживать определенное соотношение равновесных и неравновесных процессов, уровень градиентов и т.д.» В отличие от такой общественной системы малоэффективная организация существует только благодаря временным субъективным факторам или внешним условиям. При этом нарастают ее внутренние противоречия, а вмешательство в естественнoисторический процесс происходит хаотически.

Развитие общества зависит от его самоорганизации, определяемой объективными и субъективными причинами. Из субъективных причин обычно выделяют содержание сознания, уровень образованности и меру интеллектуализации мышления, состояние духовного опыта и культуры. Процесс самоорганизации обеспечивается, как показывает исторический опыт человечества, самоуправлением при достаточной компетентности в осмыслении и оценке событий, определении путей и средств достижения цели. В этом случае происходит ориентация в сторону интересов развития общества, исключая возможность подтасовки и обмана, рассчитанных на некомпетентность и неосведомленность большинства людей.

Логика самоорганизации общественного процесса отражает единство институтов культуры, политики и экономики, становится ведущей идеей человеческого взаимопонимания и общественного развития. В теории управления необходимо хорошо знать свойства объекта, его реакции на управляющие воздействия и уметь направлять их на достижение поставленной цели. Понимание и формальное определение цели — задача не менее сложная, чем само управление. Нахождение компромисса при

597

многих противоречивых тенденциях в таких сложных системах, как «общество — окружающая среда», представляет собой один из примеров решения подобных задач. Существует раздел математики, посвященный анализу конфликтных ситуаций, где под компромиссом понимается коллективное решение, не нарушающее интересы всех сторон (устойчивость систем). История показывает, что неспособность достичь компромисса вызывала войны и другие конфликты, отбрасывавшие человечество назад.

Всякий компромисс достигается определенной последовательностью шагов и действий. Например, для разрешения экологических проблем необходимо учесть все ограничения, нарушение которых означало бы нарушение гомеостатического состояния. Это позволило составить формальную систему запретов, или минимум условий, необходимых для обеспечения гомеостазиса.

Современные проблемы сочетания противоречивых интересов в управлении экономикой, а также теория и практика военного дела вызвали к жизни математический аппарат описания конфликтных ситуаций вообще, т.е. общую стратегию. В 1944 г. в США была опубликована книга математика и физика Джона фон Неймана и экономиста Оскара Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение», в которой рассматривались вопросы математического описания способов принятия решений, типичных для конкурентной экономики. Впоследствии теория игр превратилась в общую математическую теорию конфликтов, описывающую экономические, военные и правовые коллизии, столкновения, связанные с биологической борьбой за существование, различные игровые стратегии. При использовании игр с противоположными интересами (антагонистическая игра) оптимальной считается стратегия, направленная на достижение максимального

выигрыша. Конкуренция здесь является разновидностью конфликта. В центре внимания теории — оптимизированные правила поведения, ведущие к победе одной из сторон.

Вопросы для самопроверки и повторения

1. Охарактеризуйте биогеоценозный уровень организации живой материи. Дайте определения понятиям «биогеоценоз», «экологическая ниша», «биоценоз». Чем определяется их устойчивость, какие связи существуют между организмами в экосистеме?
2. Каково значение круговорота веществ для биосферы?
3. Назовите основные выводы учения Вернадского о биосфере.
4. Как формировался климат на Земле и каковы перспективы его изменения?
5. Какие факторы определяли изменение климата планет? Чем доказывается единовременное происхождение тел Солнечной системы? Каковы размеры «пояса жизни» в Солнечной системе?
6. Опишите этапы эволюции жизни до появления человека.

598

7. В чем суть концепции коэволюции и как она развивалась? Как в ней совместились взгляды Дарвина и Кропоткина?
8. Обоснуйте на основе эволюционных представлений о развитии структурных уровней организации живой материи становление ноосферы. Существует ли ноосфера в настоящее время?
9. Как происходила эволюция с позиции концепции коэволюции? Поясните выражение «Земля — живой организм». Как оценивается роль пассионариев по теории Гумилева и синергетики?
10. В чем феномен человека? С какого времени начинается человеческая история? Как Вы понимаете проблемы социальной экологии, этологии и социобиологии?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закрывается последняя страница книги...

Даже если Вы читали ее для того, чтобы грамотно ответить на экзамене, автор надеется, что книга не только способствовала расширению кругозора, но и оказала эмоциональное воздействие, пробудила живой интерес к познанию мира и осмыслению его устройства. Как писал Сенека, *«кто мудр, тот смотрит на замысел, а не на исход. Досуг без занятий наукой — смерть и погребение заживо»*.

Без знания современной науки, без освоения ее идей, языка и методов невозможно принятие ответственных решений, которые требуются для управляемого развития. Как-то Станислав Лем подчеркнул, что «общая тенденция, заметная буквально повсюду, в том числе и в США, такова, что возрастающей сложности государственных, социальных, технических, наконец, глобальных проблем сопутствует явное снижение уровня компетентности правящих».

Многочисленные кризисы, как и экологический кризис, поставивший нашу планету на грань катастрофы, возникли не из-за развития науки и техники, а из-за недостаточного распространения знания и культуры, в силу безответственности решений некомпетентных руководителей, равнодушия и бесконтрольного развития человеческих потребностей. Поэтому люди, собирающиеся стать управленцами, экономистами или юристами, должны понимать естественно-научную сущность анализируемых объектов, проблем и современных технологий. Сказанные ранее слова А. Эйнштейна дополняют эту мысль: *«Ограничение области знания лишь небольшой группой людей ослабляет философский дух народа и ведет к духовному обнищанию»*.

Общество ответственно за формирование реальных ценностей развития науки и техники, за воспитание нравственных устоев будущего человечества. Сейчас важно, чтобы научные разработки были восприняты обществом и востребованы им. Создание научной общественности должно быть одной из важнейших задач в обучении молодежи, поскольку восприятие достижений науки зависит от сознания общества больше, чем от самих достижений. Это особенно актуально в наше время, когда в условиях свободы слова средства массовой информации обеспечивают нас сенсациями на любой вкус. Только общественность, умеющая правильно

600

оценить достижение и отличить его от ложного успеха, может помочь науке развиваться по правильному пути.

Синергетике уже тридцать лет, это всего на порядок меньше, чем классическому естествознанию, если отсчитывать его рождение с периода Нового Времени, Галилея, Кеплера и Ньютона. Но мы уже мыслим иначе, нас интересует не устоявшееся и застывшее, а становящееся и возникающее. «В любых сложных системах наблюдается периодическое чередование стадий эволюции и инволюции, свертывания и развертывания, схождения к центру и частичного распада. И аналогии с историческими свидетельствами о циклах процветания и гибели цивилизаций, с циклами Кондратьева, колебательными режимами Гэлбрайта, этногенетическими ритмами Л.Н.Гумилева», — отмечают известный математик С. П. Курдюмов и философ Е. Н. Князева. Следуя за современными моделями естествознания, синергетическими моделями, возможно строить прогнозы на будущее. Причем прогнозы грамотные, отличные от пути блуждания через пробы и тупики.

Ф.М.Достоевский писал: «Нравственный и образованный народ составляет великую и справедливую цель, достойную великой нации. Нравственное стремление, просвещение не только высшая, но, может быть, самая выгодная политика для великой нации именно потому, что она великая. Политика текущей практичности и непрерывного бросания себя туда, где повыгоднее, где понасушнее, изобличает мелочь, внутреннее бессилие государства. Ум практической и насущной выгоды всегда оказывается ниже правды и чести, а правда и честь всегда кончали тем, что торжествовали...» В заключение приведу выдержку из книги Д. И. Менделеева «Заветные мысли»: *«Нам особенно нужны образованные люди, близко знающие русскую природу, т. е. всю русскую действительность для того, чтобы мы смогли сделать настоящие, самостоятельные, а не подражательные шаги в деле развития своей страны»*. Эти мысли должны соответствовать реформам системы образования.

Так что, учитесь, делайте выводы, ставьте в своей единственной жизни достойные цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд В. И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990.
2. Бялко А.В. Наша планета — Земля. — М.: Наука, 1989.
3. Вернадский В. И. Философские мысли натуралиста. — М.: Наука 1968.
4. Войткевич Г. В. Химическая эволюция Солнечной системы. — М.: Наука, 1991.
5. Галимов Э.М. Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. — М.: Едиториал УРСС 2001.
6. Гумилев Л. Н. Этногенез и биосфера Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.
7. Дубнищева Т. Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1997. — М.: Маркетинг, 2000, 2001.
8. Дубнищева Т. Я. Пигарев А. Ю. Современное естествознание. — Новосибирск: ЮКЭА, 1998. - М.: Маркетинг, 2000.
9. Дубнищева Т. Я. Ретрофизика в зеркале философской рефлексии. — М.: ИНФРА-М, 1997.
10. Дэвис П. Случайная Вселенная. — М.: Мир, 1989.
11. Камшилов М.М. Эволюция биосферы. — М.: Наука, 1979.
12. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994.
13. Липкин А. И. Основания современного естествознания. — М.: Вузовская книга, 2001.
14. Моисеев Н.Н. Универсум, информация, общество. — М.: Устойчивый мир, 2001.
15. Найдыш В. М. Концепции современного естествознания. — М.: Гардарики, 1999.
16. Наука и безопасность России: историко-научные, методологические, историко-технические аспекты. — М.: Наука, 2000.
17. Новиков И.Д. Как взорвалась Вселенная. — М.: Наука, 1988.
18. Пехов А.П. Биология с основами экологии. — СПб.: Изд-во «Лань», 2000.
19. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. — М.: Прогресс, 1994.
20. Суханов А.Д., Голубева О.Н. Концепции современного естествознания. — М.: Агар, 2000.
21. Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. — М.: Наука, 1988.
22. Эйген М., Винклер Р. Игра жизни. — М.: Наука, 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....3

Глава 1. Логика познания и методология естественных наук.....7

- 1.1. Наука — часть культуры.....7
- 1.2. Формирование критерия научности.....13
- 1.3. Методы естествознания, всеобщность его законов. Системный подход..18
- 1.4. Понятия «научная программа» и «научная картина мира»26
- 1.5. Математическая научная программа в развитии..31
- 1.6. Понятия «научная парадигма» и «научная революция».....33
- 1.7. Оценки научных успехов и достижений..37
- 1.8. Современная научно-техническая революция: достижения и проблемы..39

Глава 2. Понятия пространства, времени и материи. Фундаментальные взаимодействия.....44

- 2.1. Понятие «пространство».....44
- 2.2. Масштабы расстояний во Вселенной. Методы оценок размеров и расстояний.....48
- 2.3. Понятие «время» в своем развитии.....56
- 2.4. Временные масштабы во Вселенной. Методы измерения времени....60
- 2.5. Структурные уровни организации материи.....68
- 2.6. Понятие «поле». Уравнения Максвелла. Свет — электромагнитная волна.....71
- 2.7. Типы фундаментальных взаимодействий в физике.....76
- 2.8. Попытки построения Теории Всего Сущего.....80

Глава 3. Мироздание в свете классической механистической парадигмы89

- 3.1. Модель материальной точки и законы классической механики.....89
- 3.2. Масса инертная и гравитационная. Принцип эквивалентности.....94
- 3.3. Движения планет и законы Кеплера.....96
- 3.4. Закон всемирного тяготения..98
- 3.5. Связь законов сохранения со свойствами пространства и времени.....104
- 3.6. Колебания и волны в природе и их описание. Гармонический осциллятор..108
- 3.7. Распространение звука в средах и реакция организма на звуковые волны..115
- 3.8. Волновое описание процессов. Типы и свойства волн. Спектр и его анализ118

603

- 3.9. Эффект Доплера, его исследование и значение для науки.... 122
- 3.10. Явление резонанса. Резонансы в движении планет.....126

Глава 4. Концепции классической термодинамики и статистической механики...131

- 4.1. Теплота, температура и механический эквивалент теплоты.131
- 4.2. Понятие «внутренняя энергия». Первое начало термодинамики.....136
- 4.3. Преобразование тепловой энергии в механическую работу.....140
- 4.4. Понятие «энтропия». Суть спора о «тепловой смерти Вселенной».....143
- 4.5. Начала термодинамики. Энтропия и вероятность. Принцип Больцмана.....148
- 4.6. Микро- и макропеременные в описании систем. Основные модели....151
- 4.7. Основные положения молекулярно-кинетической теории и эмпирические газовые законы153
- 4.8. Связь параметров газа с его микроструктурой. Распределение Максвелла....155
- 4.9. Распределение частиц газа во внешнем поле и в атмосферах планет.....159
- 4.10. Понятие «флуктуация» и точность измерений....161
- 4.11. Процессы обратимые и необратимые. Принцип локального равновесия.....163

Глава 5. Концепции строения и корпускулярно-волнового дуализм материи..169

- 5.1. Ограниченность законов классической оптики. Измерение скорости света....169
- 5.2. Волновые свойства света. Спектр электромагнитного излучения.....176
- 5.3. Явление дисперсии сред и доказательство материального единства мира.....181
- 5.4. Законы теплового излучения, кризис классической теории и появление квантовой гипотезы.....185
- 5.5. Открытие электрона и радиоактивности. Рождение представлений о сложном строении атома.....189
- 5.6. Планетарная модель строения атома. Современная наука и постулаты Бора.....193
- 5.7. Корпускулярные свойства света. Фотоны Эйнштейна и доказательство их реальности.....199
- 5.8. Поглощение и испускание квантов света. Спонтанное и вынужденное излучения....202

| | |
|--|------------|
| 5.9. Корпускулярно-волновые свойства вещества и значение их открытия..... | 204 |
| Глава 6. Концепции взаимодействий и структур в микромире..... | 208 |
| 6.1. Описание движения микрочастиц. Принципы дополнительности и причинности | 208 |
| 6.2. Принципы соответствия и неопределенности. Роль прибора и процесса измерения в квантовой механике..... | 213 |
| 6.3. Строение химических элементов и понимание Периодической таблицы Менделеева..... | 218 |
| 6.4. Радиоактивные элементы и возможности превращения элементов..... | 224 |
| 6.5. Представления о строении атомного ядра..... | 234 |
| 6.6. Элементарные частицы и проблема поиска «первичных объектов»..... | 239 |
| Глава 7. Концепции строения вещества (от микромира к макромиру)..... | 245 |
| 7.1. Представление о строении молекул..... | 245 |
| 7.2. Развитие представлений о составе веществ. Законы стехиометрии..... | 251 |
| 7.3. Развитие структурной химии..... | 256 |
| 7.4. Строение веществ в разных агрегатных состояниях..... | 261 |
| 7.5. Строение и свойства металлов..... | 268 |
| 7.6. Структура и уникальные свойства воды..... | 275 |
| 7.7. Строение и свойства атома углерода, определившие его роль в природе..... | 278 |
| Глава 8. Концепции процессов и возможности управления ими..... | 283 |
| 8.1. Химический катализ и методы управления химическими процессами..... | 283 |
| 8.2. Цепные реакции и свободные радикалы..... | 289 |
| 8.3. Особенности растворения в воде различных веществ..... | 291 |
| 8.4. Процессы диффузии и осмоса, их роль в клеточных мембранах..... | 299 |
| 8.5. Понятия фазы и фазового перехода. Фазовые переходы первого и второго рода..... | 303 |
| 8.6. Сверхтекучесть и сверхпроводимость..... | 308 |
| 8.7. Возникновение самоорганизации в неравновесных системах. Понятие обратных связей..... | 314 |
| Глава 9. Концепции строения, эволюционных процессов и зарождения структур в мире звезд..... | 319 |
| 9.1. Строение типичной звезды. Источники энергии Солнца и звезд..... | 319 |
| 9.2. Звезды, их характеристики и эволюция..... | 325 |
| 9.3. Переменные звезды и их эволюция. Конечные стадии эволюции звезд и Солнца..... | 333 |
| 9.4. Галактика, ее форма и строение. Солнечная система в Галактике..... | 338 |
| 9.5. Многообразие мира галактик. Содержание и значение закона Хаббла..... | 344 |
| 9.6. Сценарий стационарной Вселенной и «Космология Большого Взрыва»..... | 351 |
| 9.7. Рождение частиц по современной модели развития Вселенной..... | 357 |
| 9.8. Модель инфляционной Вселенной. Возникновение во Вселенной крупномасштабных неоднородностей..... | 360 |
| Глава 10. Концепции строения, эволюционных процессов и зарождения структур в мире планет..... | 368 |
| 10.1. Элементы планетной космогонии..... | 368 |
| 10.2. Формирование малых тел Солнечной системы, Луны и Земли. Движения Земли, строение геосфер и изучение процессов..... | 376 |
| 10.3. Распространенность и круговороты химических элементов на Земле..... | 385 |
| 10.4. Модели появления геологических структур на поверхности Земли..... | 391 |
| 10.5. Геохронологическая шкала эволюции Земли..... | 402 |
| 10.6. Самоорганизация при образовании планет и взаимодействии геосфер..... | 407 |
| Глава 11. Основные формы, свойства и уровни организации живой материи. Молекулярный уровень..... | 415 |
| 11.1. Общая характеристика науки о живом и развитие традиционной биологии..... | 415 |
| 11.2. Основные свойства живой материи..... | 421 |
| 11.3. Уровни организации живой природы на Земле..... | 426 |
| 11.4. Молекулярно-генетический уровень организации живой материи. Строение и структура макромолекул белков..... | 429 |
| 11.5. Установление строения и структуры молекул ДНК и РНК..... | 435 |
| 11.6. Молекулярные механизмы генетической репродукции, синтеза белка и изменчивости..... | 439 |
| 11.7. Молекулярный механизм процессов обмена веществ и энергии..... | 452 |
| 11.8. Молекулярные основы воспроизведения генетической информации и осуществления связи между клетками..... | 458 |
| Глава 12. Онтогенетический уровень организации жизни. Концепции эволюционной биологии..... | 465 |
| 12.1. Основные положения клеточной теории, методы изучения состава клетки..... | 465 |
| 12.2. Строение и функции основных оргanelл клетки..... | 472 |
| 12.3. Функции клеточных мембран. Работа «ионного насоса»..... | 477 |

| | |
|--|-----|
| 12.4. Процессы фотосинтеза и клеточного дыхания..... | 480 |
| 12.5. Формирование идей эволюции в биологии..... | 488 |
| 12.6. Понятие о неodarвинизме и синтетической теории эволюции..... | 493 |
| 12.7. Понятия микро- и макроэволюции. Естественный отбор — направляющий фактор эволюции..... | 498 |
| 12.8. Основные гипотезы происхождения живого..... | 502 |
| 12.9. Концепция происхождения живого по гипотезе Опарина — Холдейна..... | 508 |

606

| | |
|--|-----|
| 12.10. Современная оценка концепции биохимической эволюции в биологии..... | 512 |
|--|-----|

Глава 13. Концепции самоорганизации и моделирования процессов в сложных системах.....519

| | |
|--|-----|
| 13.1. Возникновение упорядоченности в гидродинамике. Понятие хаоса..... | 519 |
| 13.2. Порядок и хаос в больших системах. Понятие фрактала..... | 524 |
| 13.3. Пороговый характер самоорганизации и представление о теории катастроф..... | 528 |
| 13.4. Математические закономерности эволюции. Понятие бифуркации..... | 531 |
| 13.5. Синергетика — новый научный метод..... | 535 |
| 13.6. Эволюционная химия. Возникновение упорядоченности в химических реакциях..... | 539 |
| 13.7. Возникновение самоорганизации в морфогенезе..... | 543 |
| 13.8. Моделирование отношений между трофическими уровнями в биоценозах..... | 546 |
| 13.9. Элементы теории самоорганизованной критичности..... | 551 |

Глава 14. Концепции строения и функционирования на биосферном уровне организации живой материи.....557

| | |
|---|-----|
| 14.1. Биосферный уровень организации жизни. Основы учения В.И.Вернадского о биосфере..... | 557 |
| 14.2. Распределение на Земле солнечной энергии. Биотический круговорот..... | 562 |
| 14.3. Связи между организмами в экосистеме..... | 568 |
| 14.4. Самоорганизация в формировании климата..... | 572 |
| 14.5. Концепции эволюции растительного и животного мира | 579 |
| 14.6. Человек — качественно новая ступень развития биосферы..... | 584 |
| 14.7. Концепции коэволюции и ноосферы..... | 588 |
| 14.8. Естественно-научная картина мира и общественная мысль..... | 593 |

Заключение.....600

Список литературы.....602

Учебное издание

Дубнищева Татьяна Яковлевна

Концепции современного естествознания

Учебное пособие

Редактор Е. И. Борисова

Технический редактор О. С.Александрова

Компьютерная верстка: С. В. Шеришорин

Корректоры В.В.Кожуткина, Л.А.Богомоллова

Изд. № А-738-V/1. Подписано в печать 3.07.2003. Формат 60х90/16. Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 38,0. Тираж 20000 экз. (1-й завод 1-5100 экз.). Заказ № 3085

Лицензия ИД № 02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия». Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.003903.06.03 от 05.06.2003. 117342, Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 223.

Тел./факс: (095)330-1092, 334-8337.

Отпечатано в АПП "Джангар"

358000, г. Элиста, ул. Ленина, 245

Сканирование и форматирование: Янко Слава (Библиотека Fort/Da) || slavaaa@yandex.ru ||yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Icq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу

update 19.11.06