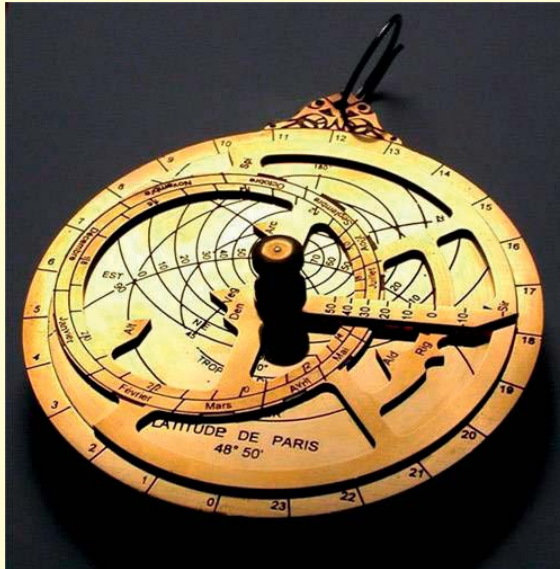


І.А. Климишин

ОСНОВИ КОСМОЛОГІЇ



І.А. Климишин

ОСНОВИ КОСМОЛОГІЇ

Івано-Франківськ
Симфонія форте
2014

ББК 22.6
К 49

Климишин І.А.
К 49 Основи космології / І.А. Климишин. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2014. – 164 с.

ББК 22.6

© Климишин І.А., 2014

Зміст

Передмова.....	4
1. Спостережні аспекти космології	6
2. Визначальні категорії: <i>речовина, простір, час, енергія</i>	15
3. Космологічні парадокси – XIX і XX ст.	30
4. Математичне підґрунтя космології.....	42
5. Загальна теорія відносності (ЗТВ) як основа космології XX ст.. Три ефекти, що впливають із ЗТВ	56
6. Варіанти моделей Всесвіту	65
7. Спостережні дані. Діаграма Габбла	77
8. Гравітаційний радіус. Феномен чорної діри	87
9. Стадії еволюції Всесвіту (інфляція, розширення, роздування).....	101
10. Хімічна еволюція в надрах зір.....	113
11. Реліктове радіовипромінювання (РРВ)	121
12. Проблема структуризації речовини у Всесвіті	128
13. Проблема темної маси і темної енергії.....	134
14. Від Стандартних моделей до плетива струн	140
15. Антропний принцип	152
Література.....	161

Передмова

Сучасно космологія – найважливіший розділ природознавства, вона є головною суттю *космофізики* – фізики процесів, які розігруються далеко за межами «земних фізичних лабораторій». Свідченням цього є таке: з астрономії Нобелівські премії Статутом не передбачені, але близько 10 присуджено саме за дослідження в царині астрономії (космології). І майже удвічі більше – за праці, завдяки яким вдавалося збагнути суть процесів, що відбуваються як у надрах зір, так і на далеких (космологічних) відстанях. Прикладом є питання про джерела енергії зір (Г. Бете і згодом В.Фаулер, окремо – Р. Девіс) чи дослідження реліктового радіовипромінювання (Пензіас і Вілсон, згодом Смут і Мазер).

За відомим і справедливим твердженням, сучасна астрономія взагалі, і передусім космологія, ***тримається на трьох китах***. *Перший* – **потужна спостережувальна техніка**, бо ж діаметри комбінованих телескопічних дзеркал сягають десяти-одинадцяти метрів, радіотелескопів – 100 м. До того ж надзвичайно ефективними є дослідження Всесвіту в «позаоптичному» діапазоні електромагнітних хвиль із борта штучних супутників Землі та автоматичних міжпланетних станцій. *Другий* – **це сукупність усіх законів і висновків теоретичної та експериментальної фізики**. І *третій* – **сучасні надпотужні електронно-обчислювальні машини**.

«З математичної точки зору» сучасна космологія вкрай важка для вивчення. Те, що вона базується на загальній теорії відносності (ЗТВ), використовуючи, як математичний апарат, тензорне числення та «будуючи» космологічні моделі в 4-вимірному просторі-часі, стало наче й звичним. Тепер доводиться вести мову про моделі розвитку Всесвіту із залученням усіх надбань фізики елементарних частинок (ФЕЧ) і то – у просторах 10-11 вимірів. Будівництво цих нових «моделей Світу» (НМС) під силу хіба трьомстам ученим планети... Показовим є, зокрема, кількість можливих варіантів моделей: «В рамках» ЗТВ їх менше 20, число ж НМС за одним із варіантів – це одиниця і

п'ятсот нулів за нею, за іншим – взагалі безконечне. Як тут не згадати слова Нобеліанта В. Паулі: «Межі всіх природничо-наукових методів там, де з'являються питання про походження»...

Орієнтовно цю проблему проаналізував у книжці «Неприємності з фізикою: зліт теорії струн. Занепад науки і що з цього випливає» канадський учений Лі Смолін (її російсько-мовний переклад (2006 р.) є в Інтернеті). З короткої біографічної довідки дізнаємося, що у 2008 р. він зайняв 21-ше місце зі 100 найвидатніших мислителів світу.

При вивченні цього курсу доречно за орієнтир узяти статтю академіка РАН А.М.Черепашука «История истории Вселенной» (УФН, т. 183, № 5, 2013), як також, детальніше, – монографії, зокрема, Г.С. Бисноватого-Когана, Д.С. Горбунова та В.А. Рубакова, А.Д. Лінде, М.Ю. Хлопова (див. дод. «Література»), також матеріали Д. Казакова у «Физ. Энц.» та в Інтернеті, де загалом – злива інформації.

Фактично цей курс є лише вступом до космології. Беремо ж до уваги те, що планом МВО в нас не передбачено окремого курсу вивчення ЗТВ. На всю ж астрономію – лекційних лише 20 год. Тож автор вважав необхідним подати основи ЗТВ та відобразити намагання чи не 70-річних зусиль співставити «велике і мале», на той час – аналізуючи проблему «великих чисел» (це ж були перші кроки до *космомікрофізики!*..).

Окремі заторкнуті тут питання викладені нами раніше у книжках «Релятивістська астрономія», «Фрагменти космології» та «Основи космології» (у співавт.). Посилання на них дано у тексті. Найважливіші джерела вказані у списку літератури.

Автор висловлює щирю подяку Ю.М.Пунжину за всебічну допомогу в процесі опрацювання тексту цієї книжки.

1. Спостережні аспекти космології

Космологія – розділ астрономії, що вивчає найзагальніші властивості навколишнього Всесвіту (мегасвіту) в цілому. Тут передусім мають на увазі тривалість його існування («вічність у часі» або, навпаки, «народження T_e років тому»), його протяжність у просторі («безконечність» чи, навпаки, «обмеженість» у той чи інший спосіб – як ось, за уявленнями давніх греків, – кришталевою сферою), особливості розподілу в ньому речовини – галактик та їх скупчень і зміни з часом відстаней між ними.

Космогонія відповідає на питання, як розвивалися конкретні форми речовини – галактики, зорі та планети.

Для пояснення будови й особливостей розвитку мегасвіту використовують фізичні закони, виведені в земних лабораторіях (у масштабах макросвіту) при деяких «середніх» значеннях фізичних параметрів. Тому завжди є актуальним питання про правомірність екстраполяції цих законів на весь Всесвіт і на всі етапи його розвитку. Адже унаслідок екстраполяції законів класичної фізики на весь Всесвіт і виникли **космологічні парадокси** – фотометричний, гравітаційний, а також термодинамічний – теорія «теплової смерті» Всесвіту. Про них – мова далі.

Астрономія, як наука, існує близько 2500 років. Завдяки зусиллям багатьох поколінь астрономів поступово складалася загальна картина будови Всесвіту. Однак до початку XIX ст. астрономи вивчали лише Сонячну систему, у XIX ст. – уже нашу Галактику. І лише в XX ст. вони досягли світу інших галактик, який, як виявлено, *розширюється*.

Відповідно добирали масштабні одиниці для вимірювання відстаней. Наприклад, відстань до Місяця вимірювали в милях чи кілометрах. У межах Сонячної системи зручною виявилася *астрономічна одиниця* – відстань від Землі до Сонця ($1 \text{ а.о.} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ м}$). При вивченні об'єктів Галактики довелося ввести такі одиниці, як *світловий рік* – відстань, що її світло проходить за один рік ($1 \text{ св. рік} = 63240 \text{ а.о.} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м}$), і *парсек* – відстань, з якої радіус земної орбіти видно під кутом $1''$ ($1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.о.} = 3,26 \text{ св. роки} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$).

Сьогодні астрономи зуміли заглибитися у Всесвіт на відстані, звідки світлові промені йдуть до Землі близько 13 млрд. років. Тут уже використовують таку масштабну одиницю, як *мегапарсек* – мільйон парсеків ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$).

Головним об'єктом вивчення астрономії була і залишається наша *Сонячна система*. Її центральним тілом є *Сонце* – розжарена газова куля, радіус якої у 109 разів більший від радіуса Землі. Навколо Сонця на різних відстанях від нього обертаються вісім *великих планет* – Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун. Разом із планетами рухаються їхні *супутники*. Крім них навколо Сонця обертається багато тисяч *малих планет*, або *астероїдів*, сотні *комет*. Уся ж Сонячна система заповнена *метеорною речовиною* – пиловими частинками, дрібними уламками твердих тіл і нерівномірно розсіяним газом.

Радіус Сонячної системи оцінюють у 60 а. о. Найближча до нас зоря є в сузір'ї Кентавра, відстань до неї – 4,3 св. роки. Якщо змодельювати будову Сонячної системи так, що відстань Земля – Сонце дорівнює 1 см, то ця зоря була б на відстані 2 км.

Зорі, як і Сонце, – це велетенські газові кулі, що випромінюють енергію за рахунок синтезу в їх надрах ядер гелію та інших хімічних елементів. Близько 200 млрд. зір об'єднані в гігантську зоряну систему – *Галактику*. Основну частину її зір неозброєним оком бачимо у вигляді *Молочного Шляху*. Усі зорі в Галактиці, як і Сонце, обертаються навколо ядра Галактики, Галактика ж рухається як єдине ціле у просторі.

Серед мільярдів зір виявлено близько 50 000 *змінних зір*, яскравість яких у той чи інший спосіб змінюється. Серед *спалахуючих* зір особливо цікаві *наднові*, яскравість яких упродовж тижня співмірна з яскравістю галактики, в якій цей спалах відбувся. Зорі бувають різних розмірів і потужностей. Є зорі-гіганти, їх радіуси у тисячі разів більші від сонячного, тоді як радіуси *нейтронних зір* становлять усього 15... 20 км. У Галактиці є також велетенські газово-пилові хмари – *туманності*, крім того вся Галактика заповнена розрідженим *міжзоряним газом* і пронизана магнітними полями.

Значна частина зір об'єднана в системи, що складаються з двох, трьох і більше (навіть із шести) компонентів. Частина зір Галактики об'єднана у *скупчення* – розсіяні і кулясті, в перших налічують 200-500 зір, у других – їх один-декілька мільйонів.

Наша Галактика має лінзоподібну (точніше – спіральну) форму, її діаметр сягає 100 000 св. років, товщина – 10 000 св. років. За її межами виявлено сотні мільйонів таких же зоряних систем. Є галактики-гіганти, є галактики-карлики. Вони об'єднуються у *скупчення галактик*.

В середньому відстані між галактиками принаймні на порядок перевищують їх лінійні розміри (тож вони справжні оази в пустелі), їх кількість швидко зростає при переході до об'єктів слабкіших за блиском. Адже галактик, яскравіших 12-ї зоряної величини, відомо близько 250, 15-ї – вже 50000.. За допомогою ж телескопів із діаметром дзеркала 10 м, як і еквівалентного їм 2,5 м орбітального «Габбла» на площі в 1 кв. градус налічують близько 300 000, а на всій сфері (41 253 кв. градуси) – понад 12 млрд. галактик 29 – 30^m.

За формою галактики різноманітні: є спіральні, еліптичні і неправильні, є взаємодіючі. Виявлено також *квазари* – об'єкти, що мають вигляд звичайних зір, але є потужними джерелами радіовипромінювання. За сучасними уявленнями – це ядра галактик-гігантів.

Упродовж багатьох століть змінювалися уявлення людей і про місце Землі, про її (та й інших світил) розміри та масу, формувалося питання «що таке простір, а що – час?». Щодо першого, то давньогрецький філософ Аристотель (+322 до н.е.) склав таке уявлення: «усі важкі тіла прямують до центра Землі, а оскільки будь-яке тіло прямує до центра Всесвіту, то і Земля повинна перебувати нерухомо у цьому центрі». Радіус Всесвіту (відстань до сфери зір) мав би бути... у дев'ять разів більший, ніж відстань від Землі до Сонця. Але була і думка іншого філософа – **Демокріта** (+ 370 до н. е.): простір («порожнеча») безконечний.

Давні філософи міркували і над питанням, який цей простір – неперервний, тобто подільний до безконечності, чи дискретний, що складається з окремих «атомів». Так, за уявленнями

Левкіппа (+ 440 до н. е.) і **Демокріта**, як матерія, так і простір складаються з атомів скінченних розмірів. Аналогічно послідовники **Піфагора** (+500 до н. е.) твердили, ніби просторові тіла й геометричні фігури складаються з окремих дискретних точок: найкоротша лінія – з двох точок (.), довша – з трьох (...), найменша фігура – з трьох точок (:) і т. ін.

Привернула увагу давньогрецьких філософів і проблема часу – тої форми існування матерії, яка характеризує послідовність і тривалість існування речей та подій. Уже **Геракліт** говорив, що світ є сукупністю подій, а не речей. Учень Платона **Ксенократ** (396 – 314 рр. до н.е.) обстоював ідею про існування неподільних атомів часу («хрононів»).

Давньогрецькі філософи порушили питання і про тривалість існування світу. Так, за Аристотелем, Всесвіт мав би бути обмеженим у просторі, але вічним у часі. Було уявлення про «великий рік» як проміжок часу, після якого нібито всі небесні (і земні!) явища мають повторюватися і тривалість якого оцінювали в 10–36 тис. років. Уявлення про повторення циклів часу відображене і в символі давніх римлян – змії (як «уособлення часу»), яка пожирає свій хвіст.

Майже півтори тисячі років Аристотель залишався найвищим авторитетом. Уявлення ж цього філософа про світ здебільшого були помилковими...

Так **Аристотель** розрізняв рухи «небесних» тіл по колових орбітах («вічні» рухи) і рухи «земних» тіл, які, навпаки, вічними бути не можуть. Останні, мовляв, поділяються на «природні», чи «самовільні», які нібито пов'язані з вільним рухом тіла «на своє місце», і «штучні», або «насильницькі», для створення яких потрібна сила, яка, діючи на тіло, стає причиною такого руху. Середовище, в якому відбувається рух (повітря, вода), має здатність «і рухати і рухатися». Тому кинуте тіло нібито неперервно підштовхується далі середовищем, яке також зазнає руху.

Дивує і таке твердження Аристотеля: «Більша кількість золота чи олова рухається вниз швидше, ніж мала...Коли якась вага проходить якусь відстань за певний час, то більше тіло пройде ту саму відстань за коротший час,... тобто якщо поло-

вина ваги пройде дану відстань за χ , то ціла вага пройде її за $\frac{1}{2}\chi$. Створити наукову картину світу на таких неправильних уявленнях про закони руху тіл було неможливо.

З відкриттям Колумбом Америки (1492 р.) і кругосвітньої подорожі Магеллана (1519–1521 рр.) розпочинається становлення нової науки, формування наукової картини світу. Побудувавши геліоцентричну систему світу, «прирівнявши» Землю до інших планет, **Коперник започаткував зближення астрономії з фізикою**, передусім із механікою. Відкинувши протиставлення «земного» і «небесного», учений поставив перед наукою питання: в чому полягають *причини* руху взагалі і руху планет зокрема? Коперник чітко сформулював *принцип відносності* руху, переконливо доводячи, що видимий рух Сонця, Місяця й зір упродовж доби пов'язаний з обертанням Землі навколо своєї осі.

У 1609 – 1619 рр. **Йоганн Кеплер** сформулював закони руху планет навколо Сонця. Тоді ж він задумався і над питанням про те, що змушує планети рухатися навколо Сонця. Він, однак, все ще перебував у полоні давніх уявлень і вважав, що рух, не підтримуваний безперервно якоюсь силою, має припинитися. Джерело ж рушійної сили, котра нібито подібна до магнітної, він вбачав в обертанні Сонця. Видатним новатором у фізиці та астрономії був **Галілео Галілей**. Помилковість уявлень Аристотеля щодо поділу рухів на «природні» і «насильницькі» Галілей довів на прикладі маятника, бо тут тіло самовільно переходить від «природного» руху (падіння) до «насильницького» (підйом), і навпаки. Стало очевидним, що обидва ці рухи є однаково «природними». Галілей довів абсурдність твердження Аристотеля, нібито швидкість падіння пропорціональна вазі тіла. Він же сформулював і *принцип відносності руху*: у системі, що рухається рівномірно, усі фізичні процеси відбуваються так само, як і в тій, що перебуває у спокої.

У «Посланні» до богослова Інголі (1624 р.) Галілей стверджує: «я думаю, що людська наука ніколи не вирішить, чи Всесвіт скінченний чи безконечний».

Рене Декарт (1596–1650), досліджуючи закони руху тіл, дійшов висновку, що «рух і спокій є лише двома різними ста-

нами рухомого тіла». Він дав одну із перших картин еволюції Всесвіту. На його думку, первісна матерія завдяки своєму рухові поділилася на три елементи, які різнилися один від одного ступенями тонкості. З найгрубших частинок утворилася Земля, планети і комети, з тонших – зорі і Сонце, а найтонших – речовина, що наповнює світовий простір. Та остання нібито перебуває у вихровому русі. Кожна планета і кожен супутник розташовані у центрі свого вихору, наче соломинка у вирі. Вихор Сонця нібито змушує планети обертатися навколо нього, вихор Землі «притискає» усі земні предмети до її поверхні, змушує їх падати на неї. І хоча така теорія була помилковою, вона зіграла важливу роль у розвитку астрономії.

Христіан Гюйгенс (+1695), у 1673 р. сформулював закон коливання маятника і вивів формулу для доцентрової сили, яка діє на тіло з масою m під час його руху зі швидкістю v по коловій орбіті радіуса r :

$$F = \frac{mv^2}{r}. \quad (1.1)$$

Щоправда, він не здогадався, що ця формула дає змогу оцінити величину сили, яка утримує планету на її орбіті.

Так у XVI–XVII ст. шлях до створення класичної космології проходив через планетну систему. Вершиною ж здобутків фізики й астрономії XVII ст. стала праця **Ісаака Ньютона** «Математичні основи натуральної філософії» (1687 р.). У вступі до «Основ» Ньютон підкреслив: «Уся складність природознавства, як буде видно, і полягає в тому, щоб за явищами руху розпізнати сили природи, а потім за цими силами пояснювати останні явища». І Ньютонові довелося дати визначення маси як «кількості матерії», чітко сформулювати поняття сили, розрізняючи при цьому «пасивну», або «вроджену», силу – інерцію і «активну», «прикладену» силу, яка створює рух, а також дати визначення понять простору й часу.

Але в чому полягав природа отої «вродженої» сили, або сили інерції? Як, зокрема, ця сила змінюється з відстанню між двома взаємодіючими тілами? І як вона передається на далекі відстані? На цих питаннях Ньютон і зосередив увагу.

Розпочинати ж доводилося від встановлення «найелементарніших» законів руху.

Ньютон визнав за необхідне розрізнати абсолютний час, який «без усякого стосунку до чогось зовнішнього протікає рівномірно...», і відносний час, що є «мірою тривалості, вживаною у повсякденному житті... як от година, день, місяць, рік». Відповідно розрізняє він абсолютний та відносний простір. Тож за Ньютоном, світ складається з трьох незалежних рівноцінних вартостей: матерії, простору і часу. Вважаючи простір безконачним, Ньютон гадав також, що й речовина розподілена в ньому скрізь, у всіх його закутках.

Другий із трьох **законів Ньютона** ми записуємо звичайно у вигляді

$$F = ma, \quad (1.2)$$

звідки видно, що прискорення a , одержуване тілом під дією сили F , обернено пропорційне масі тіла m . Величину m прийнято називати інертною масою тіла: нею характеризується його здатність чинити опір «активній» силі, намагання утримувати стан спокою.

За допомогою складних геометричних прийомів Ньютон в «Основах» доводить два твердження, що мали вирішальне значення для розвитку небесної механіки: 1) якщо орбітою тіла є еліпс, то величина діючої на нього сили змінюється обернено пропорційно квадрату відстані до «силового центра»; 2) якщо доцентрова сила обернено пропорційна квадратам відстаней місць до центра, то тіло може рухатися по еліпсу, параболі або гіперболі залежно від початкових умов.

На прикладі Місяця Ньютон переконливо довів, що *ця доцентрова сила – це сила тяжіння*. Так геліоцентрична модель світу М.Коперника через 150 років знайшла у праці Ньютона своє динамічне обґрунтування.

Ньютон довів, що вага кожного тіла P завжди *пропорційна* його масі m . І це можна записати у формі

$$P = mg. \quad (1.3)$$

Тут g – коефіцієнт пропорційності – прискорення земного тяжіння.

Що ж до *закону всесвітнього тяжіння*, то його Ньютон формулює у декількох тезах: «тяжіння існує до всіх тіл взагалі і пропорційне масі кожного з них», «тяжіння до всієї планети відбувається і складається з тяжінь до її окремих частин», «тяжіння до окремих рівних частинок тіл обернено пропорційне квадратам відстаней місць до частинок». Звичайно ми запишемо цей закон так:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}, \quad 1.4)$$

де G – гравітаційна стала, m_1 і m_2 – маси двох частинок, r – відстань між ними.

Але як передається взаємодія між масами, що притягаються одна до одної, яка природа тої сили? Відповідей на ці питання Ньютон дати не міг...

Ньютон писав: «Тяжіння повинно спричинятися деяким чинником, що діє за певними законами. Який це чинник – матеріальний чи нематеріальний – я залишив на розміркування читача».

Ньютон закінчив «Основи» словами: «Причину ж цих властивостей сили тяжіння я до цих пір не міг вивести з явищ, а гіпотез я не вигадую».

Привертає увагу критика Ньютона австрійським фізиком і філософом **Ернстом Махом** (+ 1916). За Махом, певна маса має властивість інерції лише тому, що її оточують «нерухомі зорі», точніше, гігантські зоряні системи – галактики, розподілені рівномірно у Всесвіті. Таке твердження згодом було названо *принципом Маха*.

Ідеї Маха мали глибокий вплив на Айнштейна. Згодом, проте, Айнштейн дійшов висновку, що постулат Маха «не пов'язується з духом теорії».

Зіставляючи теоретичні обрахунки положень небесних тіл – Місяця і планет Сонячної системи – з наслідками їх спостережень, астрономи виявили певні розбіжності. Тому упродовж XVIII і XIX ст. були зроблені спроби «уточнити» закон тяжіння Ньютона (див. РА, с.26).

Найслабкішим місцем механіки Ньютона є принцип гравітаційної далекодії. Адже і тепер, доки ми залишаємося в рамках

класичної фізики, гравітації приписується нескінченно велика швидкість поширення. Тобто небесна механіка вступає тим самим у конфлікт із сучасною фізикою.

Загальна ж теорія відносності (ЗТВ) переводить проблеми небесної механіки у площину геометричних понять. За цією теорією рух планет навколо Сонця зумовлений викривленням простору поблизу гравітуючої маси.

Окремо слід обговорити питання про достовірність розширення Всесвіту.

Сьогодні вже загальноприйняте уявлення, за яким Всесвіт розширюється від стану надвисоких температур – від **Великого Вибуху**, зі стану **гарячого Всесвіту**. Але ця точка зору вимагала підтверджень. І вони є, їх - два *тести* - сформулював у 1948 р. Георгій Гамов (+1968).

Тест перший:

Лише за умови високої температури і водночас її різкого зменшення у первинній протон-нейтронній суміші відбувається синтез спостережуваної кількості ядер гелію.

Тест другий:

Інформацію про стан надвисокої температури зберігає досьогодні космічний мікрохвильовий фон – реліктове радіо-випромінювання.

Як було зазначено, за реєстрацію першого **А. Пензіас** і **Р. Уїлсон** отримали Нобелівську премію. За цикл робіт з проблеми походження хімічних елементів у Всесвіті **У. Фаулер** отримав цю ж премію 1983 р.

Тут слід зупинитися і на *доказах того, що Всесвіт взагалі розширюється!* Бо, як не дивно, хоча співвідношення Габбла відоме з 1929 р., дехто цей факт заперечує, а наявне червоне зміщення ліній у спектрах галактик намагається пояснити іншими ефектами, як ось зміною з часом швидкості світла.

Перший із трьох запропонованих у 1997 р. **А. Сендіджом** (США) тестів полягав у *вимірюванні поверхневих яскравостей далеких об'єктів, конкретно – еліптичних галактик*. Було знайдено, що вона зменшується залежно від червоного зміщення з як $(1 + z)^2$, як це і повинно бути у випадку розширення Всесвіту.

Другий тест – вимірювання *ефекту зповільнення часу в далеких об'єктах*, які рухаються відносно Землі. Придатним для цього виявився аналіз кривих блиску Наднових типу Ia, які вдалося виявити в далеких галактиках. За даними про декілька десятків цих явищ знайдено: тривалість спаду яскравості об'єкта зростає в $(1 + z)$ разів – знову ж таки у цілковитій згоді з теорією.

Нарешті, *третій* тест полягав у вимірюванні *температури реліктового радіовипромінювання в різні епохи розширення Всесвіту*, тобто при різних z . Для стандартної моделі $T_{\text{рв}} \sim (1 + z)$, так що при $z = 2$ ця температура була 8,2 К, і ≈ 11 К при $z = 3$. З цією метою детально досліджують спектри далеких галактик і квазарів, виявляючи в них лінії поглинання, збудження яких можливе якраз завдяки цьому додатковому «космічному» джерелу енергії. Конкретні позитивні результати було отримано у 2002 р. Оскільки різні z відповідають різним моментам еволюції Всесвіту, то значення $z = 2$ стосується віку 1/4 від сучасного, $z = 3$ – близько 1/8.

2. Визначальні категорії: речовина, простір, час, енергія

Осмислення явищ і подій у навколишній природі привело до вироблення найзагальніших понять, якими виражався зміст усього людського досвіду – *категорій* (як ось субстанція, простір, час, властивість і відношення, якість і кількість, рух, стан, реальність, можливість і дійсність, випадковість і необхідність) та певних *принципів* (причинності і розвитку, тотожності і відмінності тощо).

У ХХ ст. процес пізнання, як ніколи раніше, зіткнувся з труднощами. Найвиразніше це проявилось у квантовій механіці, де, зокрема, на противагу поняттям необхідності, дійсності та визначеності введено поняття випадковості, можливості та незначеності. Квантова механіка поставила питання про специфіку простору і часу в мікросвіті. Вона виявила недоліки класичної логіки, зокрема закону виключення третього як засобу відображення реальності (бо ж фотон, електрон та інші частинки є і частинками, і не-частинками – хвилями).

Речовина. Ось деякі приклади уявлень, що зародилися близько 2500 років тому та зберегли свою актуальність і тепер.

Давні греки сформулювали ідею про всезагальну першо-основу речей – єдину матеріальну *субстанцію* (лат. Substantia – сутність, те, що лежить в основі). Її різні поєднання і мали б зумовлювати всю розмаїтість *форм* навколишнього світу (лат. forma – зовнішність). Згадана субстанція є нібито і причиною самої себе, як також основою усіх змін. Закони ж цих змін є первинними принципами буття.

Розвиток уявлень про матерію. Під матерією розуміють сукупність усіх наявних у світі об'єктів і систем, зв'язків, відношень і форм руху.

Довгий час поняття *матерія* ототожнювалося з поняттям *речовина*, з *масою* як мірою її кількості. Розвиток науки поступово привів до визнання того, що природа земної речовини і «речовини небес» є однакова. Чи не перший конкретний здогад щодо цього висловив учений-кардинал Микола Кузанський (+1464) у праці «Про вчене незнання» (1440 р.) словами: відносно речовини, з якої складається Земля і небесні тіла, між ними немає жодної різниці, бо Земля – таке ж небесне тіло, як Сонце, Місяць та інші світила.

З часів Галілея основним методом дослідження природи, зокрема будови матерії (речовини) став *експеримент*. Досліджуючи речовину в різноманітних умовах, природознавці (хіміки) у кожному окремому випадку виділяли субстанцію, яку вже не вдалося розкласти або розщепити ніякими засобами. Її й було названо *елементом*, згодом – *хімічним елементом*. Так усю багатоманітність наявних у природі речовин було зведено до відносно невеликої кількості простіших складових, елементів. Це дало привід, після двадцяти століть забуття, французькому філософу П'єрові Гассенді (+1655 р.) відродити у 1647 р. ідею атомізму (хоча дещо раніше, у 1626 р., в Парижі вчення про атоми було заборонене під страхом смертної кари).

Першу таблицю близько 30 елементів склав француз Антуан Лавуазьє (+1794 р.). У 1808 р. англієць Джон Дальтон (+1844 р.) визначив елемент як речовину, що складається з атомів одного

виду. У 1814 р. Йєнс Берцеліус (+1848 р.) для 49 відомих тоді елементів увів сучасні позначення за першими літерами їх латинських і грецьких назв. А в 1869р. росіянин **Дмитро Менделєєв** (+1907 р), маючи дані про 63 елементи, склав свою знамениту таблицю, при цьому ще й передбачив відкриття 5 тоді не відомих елементів. Атом став «найдрібнішою одиницею матерії, яка входить у склад хімічного елемента».

У XIX ст. завдяки всебічним дослідженням електричних і магнітних явищ та їх взаємозв'язку появилася нова галузь фізики – **електродинаміка**. Світло ж виявилось однією з форм електромагнітних хвиль, що поширюються зі швидкістю 300 000 км/с. Стало очевидним, що в природі крім речовини існує ще одна реальність – **електромагнітне поле**.

На початку XX ст. було з'ясовано, що речовина як така охоплює ту частину матерії (об'єкти і системи), маса спокою якої не рівна нулеві. Електромагнітне ж поле виявилось потоками квантів (від нім. Quant – порція, цей термін належить Айнштайнові), для яких маса спокою рівна нулю.

Отже, найголовнішим висновком XIX ст. напевне є здогад про існування ще одної форми існування матерії – **поля**.

Атоми, ядра, елементарні частинки. Первісне значення слова «атом» було – «неподільний». Однак у 1815 р. англійський лікар і хімік Уільям **Проут** (+1854 р.) висловив думку: всі хімічні елементи утворилися із найлегшого – з водню, завдяки його послідовній конденсації.

Тоді ж, на початку XIX ст., було розпочато вивчення лінійних спектрів різних елементів (слово spectrum означає «дух», «привид»!). Було виявлено, що в кожного з елементів цей спектр дещо інакший, як також зроблено висновок, що лінійний спектр виникає внаслідок процесів, які відбуваються всередині атома. Звідси випливало, що атом має певну структуру. При дослідженні явища електролізу обчислено заряд, що його переносить із собою одновалентний іон. У 1891 р. цю найменшу кількість заряду – «атом електрики» – було названо **електроном**. Через кілька років, у 1897 р., було відкрито і саму цю частинку.

У 1911 р. Ернест **Резерфорд** (+1937 р.) зробив висновок: атом подібний до Сонячної системи – він складається з дуже щільного ядра, навколо якого обертаються електрони. У 1913 р. було сформульовано тезу: порядковий номер елемента у таблиці Менделєєва рівний заряду ядра його атомів.

Важливість ідеї атомів підкреслив згодом лауреат Нобелівської премії 1965 р. Річард **Фейнман** (+1988): «Якби внаслідок якоїсь світової катастрофи усі нагромаджені наукові знання раптово виявилися знищеними і до майбутніх поколінь перейшла б лише одна фраза, то... я вважаю, найбільшу інформацію дала б така: усі тіла складаються з атомів».

На початку ХХ ст. вже було відомо: рухомий електричний заряд, «проскакуючи» поблизу іона (атомного ядра), втрачає (випромінює) свою енергію. А тому в атомі електрон не може утримуватися на своїй орбіті, а за частки секунди мав би впасти на ядро. Ситуацію «врятував» датчанин Нільс **Бор** (+1962 р.), який у 1913 р. сформулював такі два постулати: 1) в атомі існують орбіти, рухаючись по яких електрон не випромінює, і 2) випромінювання окремих порцій – квантів світла відбувається лише при переході електрона з однієї орбіти на іншу.

Ці постулати Бора було сприйнято навіть вороже: «Якщо це правильне, то воно означає кінець фізики як науки» (А. **Айнштайн**, 1913 р.). «Я переконаний, що це вчення є фатальним для здорового розвитку науки» (А. **Шустер**, 1913 р.). «Теорія квантів подібна до інших перемог у науці: місяцями ви усміхаєтеся до них, а тоді роками плачете» (Г. **Краммерс**, 1920 р.). «Теорію квантів можна порівняти з ліками, що виліковують хворобу, але вбивають хворого» (Г. **Краммерс**, Х. **Голст**, 1923 р.). Два фізики (О. **Штерн** і М. **Лауе**) поклялися залишити заняття фізикою, якщо «у цьому борівському безглузді хоч що-небудь є». Х. **Лоренц** жалів, що не помер п'ятьма роками раніше, «коли у фізиці все ще зберігалася відносна ясність».

Запитання скептиків були елементарно простими: звідки електрон «знає», яку саме порцію енергії він повинен випромінювати, щоб потрапити точно на ту чи іншу нижчу орбіту (і навпаки)? Тож один із найбільших фізиків Вольфганг **Паулі**

(+1958) у 1925 р. писав: «Фізика знову зайшла в глухий кут, принаймні для мене вона надто важка, і я краще волів би бути блазнем у кіно... і не чути нічого про фізику!»

У 1896 р. француз Анрі **Беккерель** (1855-1908 р.) відкрив «явище випускання ураном невідомих раніше променів, одним з компонентів яких є електрони». Через три роки Е. **Резерфорд** уточнив: у цьому процесі з ядра атома урану вилітають також « α -промені» – ядра гелію. Стало ясним, що атоми деяких елементів самовільно розвалюються: у природі відбуваються процеси перетворення одних хімічних елементів в інші.

Принаймні з 1920 р. фізики запідозрили: крім протонів «звичайних» в ядрах є такі ж, але «нейтралізовані електронами» частинки – *нейтрони*. Це дозволяло пояснити також велику кількість ізотопів – хімічних елементів, які в таблиці Менделєєва займають те ж місце, але які відрізняються між собою за масою (найбільше їх, десять, має олово). Нейтрон відкрито у 1932 р. англійцем Джеймсом **Чедвіком** (+1974 р.). Зразу ж український фізик Дмитро **Іваненко** (+1990) запропонував модель атомного ядра, за якою ядро складається із Z протонів і $N - Z$ нейтронів (тут Z – заряд ядра, N – його масове число).

З середини ХХ ст. стало очевидним, що «основними цеглинками світобудови» є *кварки* – частинки з дробовим ($+2/3$ або $-1/3$) електричним зарядом. Уже доведено: існує шість різних кварків і стільки ж антикварків. В останні роки зроблено висновок, що придатнішим є уявлення про частинки як протяжні об'єкти – своерідні *струни*, точніше *суперструни*, оскільки їх існування розглядається в багатовимірному просторі.

Невизначеність і доповнювальність. У 1922 р. француз Луї де **Бройль** (+1987) висловив думку, за якою усі елементарні частинки мають як хвильові, так і корпускулярні властивості. І в цьому – прояв *корпускулярно-хвильового дуалізму*. У 1927 р. В. **Гайзенберг** довів, що неможливо одночасно точно визначити положення атомного об'єкта і його імпульс. В цьому суть *співвідношення невизначеності*.

Стало очевидним, що і співвідношення невизначеності, і корпускулярно-хвильовий дуалізм є частковим проявом більш

загального принципу – *принципу доповнювальності*. Його сформулював Н. Бор у тому ж 1927 р.: кожне істинно глибоке явище природи не може бути визначене за допомогою слів нашої мови і потребує для свого визначення принаймні двох додаткових понять, що взаємно виключають одне одного. Інакше: наші визначення явищ природи бувають однозначні, але при цьому не повні. Коли ж вони повні, то неоднозначні, бо включають в себе додаткові поняття, що є несумісними в рамках формальної логіки.

Про форму і якість речовини. Структурна організація матерії, набуття її частинами тих чи інших властивостей – *якості*, певної *форми* зумовлене наявністю у природі чотирьох *взаємодій*: електромагнітної, слабкої, сильної і гравітаційної.

1) Завдяки *електромагнітній* взаємодії (поглинання і перевипромінювання квантів світла), яка проявляється між іонами та електронами, існують атоми, стає можливим їх утримування в молекулах, а саме ними визначаються агрегатні властивості речовини (бути їй у твердому, рідкому чи газоподібному стані), хімічні перетворення, електричні, магнітні та оптичні явища в тілах.

2) Завдяки *слабкій* взаємодії є можливими перетворення протонів у нейтрони і навпаки, а, як їх наслідок, – утворення ядер гелію та всіх інших хімічних елементів з найпростіших складових частин – з протонів та нейтронів.

3) *Сильна* взаємодія «цементує» протони і нейтрони в атомних ядрах, утримуючи ці ядра як окремі структурні одиниці. Без неї саме не було б розмаїття форм неорганічної речовини і життя.

4) *Гравітаційна* взаємодія об'єднує в єдине ціле масу кожного з небесних тіл, зокрема надаючи їй сферичну форму. Це завдяки їй Місяць утримується поблизу Землі, Земля та інші планети – біля Сонця і т.д.

Простір. Він, як «вмістилище предметів», постає перед нами у трьох вимірах. У ньому людина може вільно переміщатися вліво-вправо, вперед-назад, вверх-вниз. Завдяки цьому безпосередньому досвіду сформувалася наука про просторові відношення – *геометрія* (дослівно – землемірство). Спочатку Евкліда (300 р. до н.е.), за допомогою якої встановлювалися

кількісні, *метричні* співвідношення між окремими точками простору. «В її рамках» через довільну точку, яка знаходиться поза прямою, можна провести лише одну пряму, яка не перетинається із заданою, тобто паралельну їй.

Згодом (XIX ст.) **Гаусс** розробив метод, за яким можна встановити наскільки викривлена та чи інша поверхня. Конкретно: якби навіть Земля увесь час була вкрита хмарами, то все ж, вимірюючи лінійні та кутові відстані між окремими точками на її поверхні, можна було б визначити її радіус. У 1854 р. німецький математик **Бернгард Ріман** (+1866 р.) узагальнив метод Гаусса на простір з довільним числом вимірів.

З розвинутої **А. Айнштайном** загальної теорії відносності випливає, що властивості простору пов'язані з наявністю в ньому речовини (загальніше – матерії). Властивості викривленого простору тут якраз і описуються *ріманівською геометрією*.

Питання про концепції простору (і часу) обговорене у кн. «Філософії природи» (див. ФП., с. 122–146). Тут обмежимося зауваженням щодо питання **про подільність і безконечність простору**. З уявленнями про дискретність простору пов'язані *aporії* (гр. – безвихідь) **Зенона** Елейського (V ст. до н.е.). Так, за апорією «Ахілл і черепаха» Ахілл, який наздоганяє черепаха, ніколи не пережене її. Бо доки він добіжить до місця, де черепаха перебуває, вона зміститься вперед, і так до нескінченності. Але Аристотель вказав, як розв'язати цей парадокс (гр.– несподіваний, дивний): Ахілл наздожене черепаха, якщо йому буде дозволено «перейти межу», тобто досягти і переступити через межу подільності шляху (простору).

Аристотель допускав, що простір подільний до безмежності лише в потенції, за можливістю, але не актуально, не насправді. Тому, мовляв, можна говорити про *потенціальну* нескінченність, яка досягається лише у нескінченно віддаленому майбутньому. *Актуальна* (реальна) нескінченність мала би бути даною «вже тепер» і «цілком», це, так би мовити, звершене ціле, що містить незліченне число предметів.

Сьогодні визнається, що існують «нескінченно різні нескінченності». Декілька з них мають безпосереднє відношення до

космології. Логічно найпростішою і часто вживаною є *практична* нескінченність. Фактично тут іде мова про дуже велике (або дуже мале) число. Проте ця оцінка залежить від особливостей тої чи іншої проблеми. Практична нескінченність – це вихід за будь-яку наперед вказану межу, яка довільно може змінюватися від задачі до задачі.

Нескінченність як *безмежність* стала основою математичного аналізу. **Ріман** довів, що нескінченність не зводиться до необмеженої протяжності (безмежності). А отже, слід чітко виділяти поняття *метричної* нескінченності.

Тепер є очевидним: у природі реалізовується не лише евклідова, а й інші геометрії. Ось, пересуваючись уздовж земного екватора, мандрівник повернеться до тої ж точки земної поверхні, пройшовши *скінченну* відстань, але не знайшовши межі. Якщо тривимірний простір також є викривленим, то й тут уявний мандрівник, «обійшовши світ» і не зустрівши межі, повернеться у вихідну точку. Отже, такий викривлений рімановий простір є таким же безмежним, як і евклідовий, але об'єм його є скінченним!

Отже, *метрика* простору визначає його *кількісні* властивості. В евклідовій геометрії визначальною є *теорема Піфагора*: квадрат гіпотенузи прямокутного трикутника дорівнює сумі квадратів катетів.

Однак для повної характеристики простору не досить задати його кількісні взаємовідношення. Так, узявши аркуш паперу, можемо розглядати його як уламок двовимірного простору, на якому виконуються всі аксіоми евклідової геометрії, зокрема, сума кутів трикутника становить 180° . Обравши певний масштаб, можемо виміряти відстані між вершинами трикутника, обчислити його площу.

Зігнувши ж аркуш у трубку та склеївши його протилежні краї, отримуємо циліндр. Унаслідок такого перетворення жодна із характеристик трикутника (загалом – двовимірного простору) не змінилася: сума кутів трикутника і далі рівна 180° , не змінилися відстані між його вершинами, його площа. Однак *якісні* характеристики цього простору вже зовсім інакші. Адже в од-

ному напрямі (перпендикулярно до осі циліндра), описавши коло на поверхні, повертаємося до тої ж точки.

Тож для повної характеристики простору необхідно вказувати ще і його *якісні* риси. Цим якраз і займається *топология* (гр.– місце), або *якісна геометрія*.

Конкретно, топология вивчає ті властивості геометричних фігур, які зберігаються при розтягах і стисках, якщо лише це не супроводжується розривами і склеюванням. З точки зору топології піраміда, куб і сфера (а на площині, у двовимірному світі – трикутник, квадрат і коло) належать до одного і того ж топологічного типу. Надуваючи еластичну гумову модель піраміди (кажуть: застосовуючи топологічне перетворення), можна надати їй форму кулі. І навпаки, деформуючи, перетворюємо її в куб. Проте кулю не можна перетворити на тор – «бублик» (камеру футбольного м'яча неможливо перетворити на камеру велосипедної шини). Аналогічно у двовимірному світі трикутник можна деформувати у коло, еліпс чи квадрат, і топологічні властивості цих фігур будуть однаковими.

Тож правильним є твердження: евклідовий тривимірний простір безмежний, а його протяжність – безконечна. Перша з цих рис відображає топологічні властивості: простір ні в якому напрямі не має межі. Друга риса вказує метричні властивості: в будь-якому напрямі одиницю виміру можна відкласти як завгодно далеко. У наведеному ж вище прикладі замкнутого простору (коло як одновимірний простір, поверхня глобуса як двовимірний простір) простір є безмежним, але скінченим.

Для опису топологічних властивостей простору використовують поняття «замкнутий» (метрична риса – «скінченний») і «відкритий» (метрична риса – безконечний) простір.

Важливою топологічною характеристикою є *зв'язність*. Це здатність простору складатися з одної або декількох частин. Простір зветься однозв'язним, якщо будь-який замкнутий контур у ньому можна «стягнути» в одну точку. Так, площина і сфера є однозв'язними поверхнями. І навіть якщо шляхом неперервної деформації перетворити сферу в піраміду, то і ця фігура матиме ту ж топологічну зв'язність. З іншого боку, шляхом

склеювання (і розривів) можна змінювати топологічні властивості «просторів».

Так, склеюванням листка паперу отримуємо циліндр. І тут замкнутий контур, що утворився після співпадання двох точок, які раніше були на протилежних краях листа, аж ніяк не можна стягнути в точку! Тому кажемо, що циліндр має зв'язність $p = 2$. Якщо замість паперу було взято еластичну гумову плівку, то далі, деформуючи циліндр та «зшиваючи протилежні кінці трубки», отримуємо «бублик» – тор. Тут уже є два типи ліній («меридіани», що охоплюють увесь тор, і «паралелі», які описуємо «навколо циліндра»), які аж ніяк не можна стягнути в точки. Перетворити таку поверхню на однозв'язну (на частину площини) можна лише за допомогою *двох* розрізів, що перетинаються. Кажуть: зв'язність тора $p = 3$. Отже, зв'язність вимірюється кількістю розрізів, що переводять фігуру в однозв'язну, збільшеною на одиницю.

Ще однією із характеристик простору є його *орієнтованість*. Для прикладу візьмемо довгу паперову стрічку (дуже витягнутий прямокутник), зігнемо її, перекрутимо на півоберта і склеїмо протилежні вузькі краї. Очевидно, що в «невеликих масштабах» геометрія на такій поверхні не відрізняється нічим від евклідової. А проте жучок, який повзе на однаковій відстані від країв цього двовимірного простору, повернувшись у вихідну точку, опиниться на протилежному боці аркуша. Не виходячи за край поверхні, можна одним розмахом пензля помалювати її «лице» і «виворіт» в один колір. Якщо ж уявити цю стрічку рікою, то один її берег буде... продовженням іншого. Це – так звана *однобічна поверхня Мебіуса*, що є класичним прикладом «неорієнтованого» двовимірного простору, де після «круго-світньої» мандрівки виявляється, що «праве» стало «лівим», «верх» перетворився на «низ» і навпаки.

Важливим є питання про число вимірів простору. Наш навколишній простір є тривимірним. За допомогою трьох чисел вказуємо положення того або іншого тіла у просторі. Але залишається відкритим питання: чому простір має *саме три* виміри? На доказ тривимірності простору у різний час наводили «математичні», «психологічні» та «фізичні» аргументи.

З аналізу випливають такі особливості світів, число виміру простору яких n відрізняється від 3. Лише у тривимірному світі матеріальна точка В (скажімо, планета) може здійснювати двоякий рух відносно силового центра А (Сонця): вона може рухатися навколо нього по еліптичній орбіті, тобто перебувати у «зв'язаному» стані, але й рухатися по параболічній чи гіперболічній орбіті.

Якщо $n = 1$ або 2, то матеріальна точка (планета), наче маятник, може лише здійснювати коливання «вправо» і «вліво» відносно центрального тіла, «проскакуючи» через нього. Відірвати точку В від силового центра та усунути її на нескінченність жодними зусиллями не вдалося б. При $n > 4$ (світ чотирьох і більше вимірів) існування планетних систем (тобто періодичний рух матеріальної точки відносно силового центра) виявляється взагалі неможливим. Матеріальна точка В або падає на силовий центр А (на Сонце), або ж відлітає від нього на нескінченність.

Це стосується і світу атомів. В одно- і двовимірному світі електрон був би назавжди прикований до ядра. Ніякими зусиллями відірвати електрон, перевести його у вільний стан (іонізувати атом) не вдалося б. У таких випадках було б неможливе об'єднання атомів у молекули. У світі ж з $n > 4$ атоми водню та інших елементів існувати б, як такі, не могли: електрони неминуче падали б на ядра.

Зараз мовиться про те, що в мікросвіті і в мегасвіті простір може мати більше вимірів. Ми спостерігаємо його як тривимірний тому, що при переході до більших відстаней «надлишкові» виміри *компактифікуються*, тобто згортаються. Так, з великої відстані здається, ніби стовп має лише один вимір – висоту, хоча зблизька сприймаємо і його товщину.

Про наше сприйняття часу. Якщо простір можна охопити поглядом, то час лише відчуваємо. І він нам дається не цілком: з усього ланцюга миттєвостей ми в кожен момент переживаємо лише одну – *тепер*.

У просторі можемо вільно пересуватися у трьох вимірах. Але ми не можемо робити це в часі. Не можемо за своїм

бажанням повернутися в минуле, залишитися назавжди в теперішньому чи здійснити мандрівку в майбутнє і повернутися назад. Однак на підставі щоденного досвіду можемо стверджувати, що всі процеси навколишнього світу *відбуваються в часі*, що є чітке поняття «вчора», «сьогодні» і «завтра».

Уявлення про простір і час є необхідною складовою частиною картини світу в цілому. Вони поглиблюються і розвиваються разом із розвитком науки.

Серед глобальних явищ, з якими можна було б пов'язати течію часу, привертає до себе увагу розширення Всесвіту. Саме таку гіпотезу висловив англійський вчений Артур Еддінгтон (+1944 р.). Він уперше вжив поняття *стріла часу*.

Теорія відносності внесла істотні корективи в уявлення про час. Проміжок часу між двома певними подіями є найменшим у тій системі координат, відносно якої ці події відбувалися в одній точці. Виявилось необхідним ввести два різні поняття часу – *власного часу*, виміряного у системі координат, в якій відбувається подія, і *координатного часу*, що його вимірює спостерігач, приймаючи сигнали від об'єкта, який рухається відносно спостерігача зі швидкістю, близькою до швидкості світла *c*.

Ще складнішою є ситуація в загальній теорії відносності. Як виявилось, на темп перебігу часу істотно впливає неоднорідність розподілу мас у Всесвіті. Інакше – різні фізичні умови у різних точках простору створюють неоднорідність часу, нерівноправність його окремих інтервалів.

З XVII ст. у фізику поступово входить поняття *енергії* (гр. – діяльність) як міри руху. В середині XIX ст. було сформульовано закон збереження енергії, який у термодинаміці отримав назву – *перше начало*. У 1918 р. німецький математик Еммі Нетер (1882–1935) довела теорему: закон збереження енергії виконується тому, що *час має властивості симетрії* (однорідності відносно зсуву).

Але, як виявилось, у загальній теорії відносності, що об'єднала класичну механіку з законом тяжіння, не вдалося сформулювати закон збереження енергії, в який було би включено й енергію самого поля тяжіння. Причиною тут, очевидно, є те, що

в загальній теорії відносності час уже не є абсолютним, як у класичній механіці. Йому тут вже не притаманна однорідність.

Важливими є і проблеми термодинаміки. Знаємо: нагріті тіла охолоджуються, передаючи частину своєї теплової енергії холоднішим тілам. Узагальнено: в ізольованих від зовнішніх дій фізичних тілах усі теплові явища розвиваються у напрямі вирівнювання температури.

У цьому суть *другого начала* термодинаміки, яке виражає найзагальнішу властивість природи поруч із законом збереження енергії – першим началом термодинаміки: ізольована фізична система завжди переходить до стану, в якому досягається найвищий рівень однорідності – вирівнювання температури, хімічного складу, концентрації частинок тощо. Це – стан *термодинамічної рівноваги*. Інше його формулювання: природа прямує від станів менш імовірних до більш імовірних.

Приклад необоротного фізичного процесу: роздрібнювання краплі сиропу (або чорнила) у посудині з водою. У початковий момент часу середовище було у стані високої організації, високої упорядкованості. В краплині води – була певна кількість барвника, навколо неї ж – розчинник. З часом відбувається руйнування цього стану високої впорядкованості, а отже, зростання хаосу. Тому другий закон термодинаміки має ще й таке формулювання:

Будь-яка замкнена система, залишена на саму себе, змагає до саморуйнування. Або інакше: процеси, які відбуваються у такій системі, з часом стають неупорядкованими.

В середині XIX століття введено поняття *ентронії* (гр. – перетворення), фізичної величини S , яка при всіх змінах, що відбуваються у системі, залишається сталою (при оборотних процесах) або зростає.

Обидва закони термодинаміки у своїй сукупності ведуть до висновку: енергія у системі може зберігатися, однак унаслідок вирівнювання температури вона втрачає свою активність. І тоді вже будь-які зміни стають неможливими. Це – стан *теплової смерті*.

Основи термодинаміки «діють» у випадку *замкнутих систем*. Здебільшого, однак, маємо справу із системами *від-*

критими, які отримують енергію ззовні, або, навпаки, втрачають її. При цьому можуть відбуватися складні та непередбачувані процеси «самовільного виникнення» (самопородження) нових якостей. Основи цієї «*науки про самоорганізацію*» – *синергетики* (гр. – спільна дія) закладені в 60 роках ХХ ст.

У закритій (замкненій) системі фізичні процеси відбуваються в «адіабатному режимі» – за відсутності знаходження чи відпливу енергії із зовнішнього середовища. Навпаки – відкрита система «вводить», як речовину так і енергію зі свого оточення у свою структуру і тим підвищує рівень свого внутрішнього порядку. А тоді раптово можуть породжуватися нові структури і то за умови, що система далека від рівноваги! Таку *самоорганізацію* математично можна описати нелінійним рівнянням. В цілому це складає *теорію дисипативних структур*. Її розробив Ілля **Пригожин**, лауреат Нобелівської премії, на початку 60-х років.

Ось його головні думки. Сьогодні можна вважати встановленим, що збільшення ентропії аж ніяк не зводиться до збільшення безпорядку, бо порядок і безпорядок виникають та існують одночасно: їх творять дисипативні процеси за наявності потоків тепла. Таким чином, порядок і безпорядок тісно пов'язані – один включає в себе інший. Наше сприйняття природи стає дуалістичним (лат. *двоїтим*). Стрижневий момент тут – уявлення про *нерівноважність*, яка веде не лише до порядку і безпорядку, а й до виникнення унікальних подій. Визнання нестабільності світу – це не капітуляція, це визнання потреби врахування його специфіки, визнання того, що цей світ нестабільних феноменів неможливо повністю контролювати.

Отже, оскільки світ нестабільний, то маємо відмовитися навіть від мрії про вичерпне знання. Навіть якщо ми можемо знати початкові умови, то майбутнє залишається принципово непередбачуваним. Тут також кінець претензіям на абсолютний контроль над якою-небудь сферою реальності. Кінець мріям про абсолютно контрольоване суспільство. Реальність взагалі неконтрольована в смислі, який був проголошений попередньою наукою.

Сказане тут підсумовують так: у 60-ті роки І. Пригожин розробив нову **нелінійну термодинаміку** для опису **феномена самоорганізації в далеких від рівноваги відкритих системах**.

З середини ХХ ст. «повноправним» стало поняття **біфуркації** (від лат. bifurcus – *роздвоєний*, як поділ течії ріки на два відгалуження, що впадають у різні басейни). Це – своєрідна потреба вибору, її необхідність, після якої стан системи необоротно змінюється. Можна й говорити про **точку біфуркації**, як у випадку з буридановим ослом – «дійшов до певного пункту шляху, справа і зліва – по в'язці сіна і ... треба робити вибір, в який бік звернути».

Ситуація біфуркації математично виникає як результат аналізу розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь, це – факт розгалуження цих розв'язків. У фізичному розумінні – це точка розгалуження шляхів еволюції системи. Це – поява, при деякому критичному значенні певного параметра, нового розв'язку рівнянь, нове розуміння складності навколишнього світу. Як висловився англійський математик Ян **Стюарт**, «природа безжально нелінійна».

Сам термін *хаос* набув уже нового, технічного значення.. Ще одна важлива властивість нелінійних рівнянь – **точне передбачення часто буває нездійсненне**.

Як з'ясовано, для хаотичних систем є типовою надзвичайна чутливість до початкових умов. Найменші їх зміни з часом призводять до великомасштабних наслідків. В теорії хаосу це зветься **ефектом метелика**: «метелик, сколихнувши своїми крильцями повітря в Пекіні сьогодні, може через місяць виявитися причиною бурі в Нью-Йорку». Його відкрив на початку 60-х років ХХ ст. метеоролог Едвард **Лоренц**, розробляючи модель зміни погоди, що складалася з трьох взаємозв'язаних нелінійних рівнянь. Він виявив, що розв'язки цих рівнянь надзвичайно чутливі до початкових умов. Виходячи практично з одної точки, дві траєкторії будуть розвиватися цілком по-різному, виключаючи можливість яких би не було завчасних передбачень.

Захопившись ідеями синергетики, деякі вчені за їхньою допомогою – пояснюють навіть «монтування рецептів самовід-

творення у світі живих форм». Але ж від *упорядкування речовини до її самоорганізації* (а якраз лише це перше у змозі пояснити синергетика) – як від землі до неба..

3. Космологічні парадокси – XIX і XX ст.

Парадокс – явище або погляд, думка, що різко розходяться з усталеними й загальноновизнаними уявленнями. *Космологічні парадокси* виникли внаслідок екстраполяції (поширення) законів класичної фізики на увесь Всесвіт.

На початку XVIII ст. безконечність Всесвіту не викликала сумнівів. Але при цьому зір у ньому мало б бути незліченно багато. Їх було б видно в усіх напрямках, вони б заповнювали небосхил, який мав би сліпуче сяяти. Насправді ж нічне небо – темне.. Таку суперечність і було названо *фотометричним парадоксом*.

Спробу пояснити його здійснив швейцарський астроном **Жан Шезо** (1774 р.): «Напевне, це пилові хмари затуляють від нас світло далеких зір. Земним спостерігачам доступні лише промені найближчих світил...» У 1823 р. цим питанням зацікавився німецький лікар (він, зокрема, відкрив малі планети Палладу і Весту) **Генріх Ольберс**, дійшовши до висновку: такі хмари поступово нагрілися б далекими зорями й почали б випромінювати стільки світла, скільки поглинають.

Тож фотометричний парадокс неминуче приводив до одного з двох висновків: або Всесвіт не є безконечним, або число зір у ньому обмежене.

У 1895 р. німецький астроном **Хуго Зелігер** проаналізував *гравітаційний парадокс*. Він виявив, що уявлення про безконечний простір, заповнений речовиною при скінченній її густині, несумісний із законом тяжіння Ньютона. Бо якщо в безконечному просторі густина речовини не нескінченно мала, а кожні дві частинки притягуються взаємно за законом Ньютона, то сила тяжіння, яка діє на будь-яке тіло, була б нескінченно велика, під її дією тіла набували б нескінченно великих прискорень.

Для усунення парадокса висловлювали різні гіпотези, зокрема: 1) що загальна маса усіх тіл у Всесвіті скінченна, 2) що середня густина речовини в світовому просторі навіть при нескінченній масі близька до нуля і 3) що закон тяжіння Ньютона неточний.

Першу гіпотезу відкинув ще Ньютон: у цьому випадку під дією сили тяжіння усі маси утворили б єдину зоряну систему. Точніший аналіз згодом привів до висновку, що тут відбувалося б «випаровування» зір: зближуючись, при своєму русі навколо центра системи, зорі одна за одною отримували б швидкості, достатні для того, щоб, залишити систему. Це врешті-решт і призвело б до її розпаду, тобто до рівномірного розсіяння зір у просторі. І... при спостережуваній їх кількості згаданий парадокс усунути не вдавалося.

Друга гіпотеза відповідала моделі так званого острівного Всесвіту, що її запропонував німецький учений **Йоганн Ламберт** у своїх «Космологічних листах про будову Всесвіту» (1761 р.). За Ламбертом, розподіл речовини у Всесвіті має «ієрархічну» структуру. Сонце з його планетами й кометами мали б утворювати систему першого порядку. Разом з певною кількістю зір Сонце входить у систему другого порядку, яка нібито обертається навколо велетенського центрального світила. Молочний Шлях мав би бути системою третього порядку. Слабкі туманності, що є такими самими молочними шляхами, як і наш, об'єднуються, за Ламбертом, у систему четвертого порядку тощо.

Гіпотезу детально проаналізував 1921 р. шведський астроном **Карл Шарльє**. Нехай, міркував Шарльє, $R_1, R_2, R_3, \dots, R_i$ – відповідно радіус 1, 2, 3-ї, ..., i -ї системи, $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ – кількість членів, що утворюють цю систему (зокрема, N_1 – число зір у 1-й системі, N_2 – число членів 1-ї системи, які утворюють систему 2-го порядку тощо). У цьому випадку як гравітаційного, так і фотометричного парадоксів не буде, якщо розподіл речовини у Всесвіті такий, що задовольняється нерівність

$$\frac{R_i}{R_{i-1}} > \sqrt{N_i}.$$

У цьому випадку світ утворює ієрархічну послідовність матеріальних систем, розміри яких зростають швидше, ніж їхні маси. Тому середня густина речовини в Галактиці менша від середньої густини у Сонячній системі, і т. ін. Насправді ж, як про те йтиметься далі, Всесвіт у великих масштабах виявився дуже однорідним.

За третьою гіпотезою, сила тяжіння мала б зменшуватися з відстанню швидше, ніж у законі Ньютона. Однак це припущення не вдалося погодити зі спостереженнями тіл Сонячної системи.

У сучасній же теорії будови Всесвіту, яка, ґрунтуючись на ЗТВ, враховує його розширення, немає місця ні для гравітаційного, ні для фотометричного парадоксів. Бо рівняння тяжіння Ейнштейна зразу визначають відносні прискорення й відносні швидкості галактик і геометрію простору, тобто величини, які в принципі можна вимірювати й спостерігати.

І ще одна проблема знаходить логічне пояснення у сучасній релятивістській теорії Всесвіту – проблема «теплової смерті». Вона постала 1850 р., коли німецький фізик **Рудольф Клаузіус** у праці «Про рушійну силу теплоти» виснував, що в природі відбувається перехід теплоти від теплішого до холоднішого тіла та що ця фундаментальна закономірність не виводиться із закону збереження енергії, а є цілком незалежним положенням – *другим законом* («началом») *термодинаміки*. Таким чином, «стан Всесвіту повинен дедалі більше й більше змінюватися у певному напрямку», причому ентропія зростає. Ті уявлення розвинув далі англійський фізик **Уільям Томсон** (1824 – 1907), за яким усі фізичні процеси у Всесвіті супроводжуються перетворенням світлової енергії на теплоту, через що відбувається вирівнювання температури Всесвіту. Урешті-решт це й призводить до його «теплової смерті» – рівномірного розподілу тепла між тілами Всесвіту.

Перші два парадокси вступали у суперечність із концепцією безконечності простору. Теорія ж «теплової смерті» заперечу-

вала ідею вічності Всесвіту. Бо якщо світ існує вічно, то вирівнювання температури в ньому, а отже, і «теплова смерть» мали б настати вже давно...

У 1886 р. австрійський фізик **Людвіг Больцман** (1844–1906) сказав так: «Усі спроби врятувати Всесвіт від теплової смерті виявилися невдалими...» Проте саме йому належить спроба дати наукове розв'язання цієї проблеми. Він висловив флуктуаційну гіпотезу, за якою Галактика – наслідок статистичної флуктуації (самовільного зменшення ентропії) і що тепер вона нібито поступово повертається до порушеної рівноваги. Всесвіт, за Больцманом, – безкрає мертве море, де лише зрідка виникають острівці життя. Відстань і до іншої такої самої флуктуації – іншої галактики – мала б становити 10^{10} відстаней до зорі Сіріус...

Із аналізу теми «теплова смерть Всесвіту» випливає незаперечний висновок: Всесвіт (принаймні у «наявній формі») таки мав початок у часі. Сьогодні ж фізики обговорюють «не то його смерть, не то примітивне перетворення в лептонну пустелю», з огляду на можливий розпад протонів – «через одиницю із 32-ма нулями років»... Річ ясна, «і тут, і там» є правильною пересторога: не слід узагальнювати «навіть встановлений у лабораторії закон» на ті відстані, куди людський розум навіть думкою не в змозі сягнути.

По-своєму цікаві парадокси «подарувало нам» і 20-те століття.

Спеціальна теорія відносності (СТВ) вже увійшла до програми середньої школи як важливий розділ сучасної фізики. Там знайомлять із класичним експериментом **Альберта Майкельсона** (+1931) – спробу виявити рух Землі відносно ефіру (тобто виявити «ефірний вітер»), негативний результат якої підтверджував СТВ і сприяв її визнанню. Проте, як згодом пригадував А.Айнштейн, Майкельсон «не раз говорив мені, що йому не подобаються теорії, які впливають з його роботи». Бо – був щиро засмучений тим, що його робота породила таке «страховисько»...

Найліпшим доказом певної розгубленості й нерозуміння, з якими учені зустріли СТВ, є те, що в документах з приводу

присудження Нобелівських премій як А.Майкельсону (1907 р.), так і А.Айнштайну (1921 р.) зовсім не згадується ні теорія відносності, ні сам експеримент Майкельсона...

Певний час вважали, що як оптичні, так і електричні явища мали б бути пов'язані з пружними деформаціями ефіру. Фізики ХІХ ст. настільки були переконані в існуванні ефіру, що **Д.І.Менделєєв** у своїй таблиці хімічних елементів виділив для елемента «ньютонія» – ефіру – «нульове місце»...

Та вже й тоді у деяких учених формувалися цілком нові уявлення... Так, запровадивши поняття магнітного поля, **Фарадей** висунув ідею *силових ліній*, в яких і відбуваються поперечні коливання. За висловом Айнштайна, *ідея поля було найважливішим відкриттям від часу Ньютона*. Шотландський фізик **Джеймс Максвелл**, запроваджуючи поняття електромагнітного поля, висловив думку, що в просторі, який оточує електричні й магнітні поля, «є матерія, що перебуває в русі і за допомогою якої й здійснюються спостережувані електромагнітні явища». Генріх **Герц** виявив ідентичність «світла, теплових променів та електродинамічного хвильового руху». При цьому він довів, що електромагнітна сила, яка за давніми уявленнями мала діяти миттєво, насправді передається зі скінченною швидкістю $c = 300\,000$ км/с. **Учений** встановив, що «електричні сили можуть відділятися від вагомих тіл та існувати далі самостійно як стан або зміна простору». Так на зміну уявленням про ефір у фізику входило поняття *поля* як однієї з форм існування матерії.

Водночас явище аберації стало начебто доказом і того, що ефір нерухомий (принаймні відносно Сонця) і що на Землю при її русі «дме» своєрідний «ефірний вітер». Виявити його якраз і взявся 1881 р. **А. Майкельсон**. Експеримент повторювано неодноразово (у 1881, 1886–1887, 1929 рр.) за допомогою приладу, який набув згодом назву «інтерферометра Майкельсона». Його результат був негативний. Майкельсон сподівався виявити рух Землі відносно ефіру, створювалося ж враження, нібито цей ефір цілковито «захоплюється» Землею під час її руху, що ... суперечило явищу аберації. Вихід був один – відмовитися від самого уявлення про ефір!

У намаганні «врятувати» ефір та якось витлумачити результат експерименту Майкельсона ірландський фізик **Джордж Фітцджеральд** і незалежно від нього нідерландський учений **Хендрік Лоренц** висловили припущення, що всі тіла під час їх руху зі швидкістю v (відносно нерухомого ефіру) скорочуються

в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ разів, де c – швидкість світла. Звідси випливало, зо-

крема, що з обертанням Землі навколо Сонця ($v = 30$ км/с) наша планета «сплющується» у напрямі руху: її діаметр зменшується на 6,5 см. Такий ефект Лоренц пояснював «електромагнітною дією тих електричних зарядів, які ... містяться у кожному атомі».

За тих років «загальної смуги» фізики дістали ще декілька висновків, які згодом логічно впливали саме з теорії відносності. Так, наприклад, англійський фізик **Джозеф Лармор**, розглядаючи поширення хвиль у середовищі, котре рухається зі швидкістю v , у своїй книжці «Ефір і матерія» за сім років до праці Ейнштейна подав формулу для «абсолютної швидкості хвилі в ефірі», яка тотожна з формулою Ейнштейна для складання швидкостей. Інший англійський фізик **Джозеф Томсон** ще 1881 р. дійшов думки, що маса частинки, яка має заряд і рухається зі швидкістю v , буде більша, ніж маса m_0 частинки незарядженої й нерухомої, причому величина першої становитиме

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.1)$$

Тоді саме Томсон знайшов формулу зв'язку між масою m та енергією випромінювання E у вигляді $E = \frac{3}{4} mc^2$.

У 1901 р. німецький фізик **Вальтер Кауфман** (+1947) довів, що якраз формулою (3.1) і описується залежність від швидкості маси щойно відкритої частинки – *електрона*. Так захиталася одна з опор класичної фізики – уявлення про сталість маси, незалежність її величини від системи відліку, в якій провадиться її визначення...

У 1904 р. **Анрі Пуанкаре** ствердив, що швидкостей, більших від швидкості світла, у природі бути не може. Тоді ж він сформулював і принцип відносності як загальний закон природи: ніякими експериментами, здійсненими у лабораторії, дослідник не виявить, рухається його лабораторія рівномірно й прямолінійно чи перебуває у спокої. Він писав (1905 р.): «Неможливість довести шляхом дослідів абсолютний рух Землі становить, очевидно, загальний закон природи...» У праці вченого є і перетворення Лоренца, і формула для складання швидкостей, і навіть загальний зв'язок просторових і часової координат.

Про результати Пуанкаре Айнштайн, створюючи спеціальну теорію відносності, ще не знав нічого. Щоправда, згодом він скаже: «Я зовсім не розумію, чому мене звеличують як творця теорії відносності. Не будь мене, через рік це зробив би Пуанкаре, через два роки зробив би Мінковський, врешті-решт більша частка у цій справі належить Лоренцу. Мої заслуги тут перебільшені...». Зі свого боку Лоренц у примітці до власної статті від 1904 р. писав (1912 р.): «Заслуга Айнштайна полягає у тому, що він першим висловив принцип відносності у вигляді всезагального, строго і точно діючого закону».

Кажучи про «теорію відносності», мають на увазі не відносність людських знань, а відносну рівноцінність систем відліку, які рухаються зі сталою швидкістю одна стосовно одної.

У свій час для опису фізичних явищ Галілей увів поняття *інерціальної* системи. У такій системі будь-яке тіло, на котре не діє ніяка сила, перебуває в спокої або рухається зі сталою за величиною і напрямом швидкістю. Усяка інша система відліку, що рухається зі сталою швидкістю відносно першої, також буде інерціальною. Як довів Галілей, механічні явища за тих самих початкових умов в усіх інерціальних системах відбуваються однаково. Це означає також, що закони, якими описується механічний рух, в усіх інерціальних системах відліку мають однакову форму, або, як кажуть, вони *інваріантні* (від латинського *invariantis* – незмінний) при переході від однієї системи координат до іншої. Зокрема, простою є і арифметика складання швидкостей (які є векторами):

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_0 + \vec{v}_1. \quad (3.2)$$

Зовсім інакше у «світі великих швидкостей». Тут ця формула непридатна.

У 1905 р. була опублікована стаття **Айнштайна** «Про електродинаміку рухомих тіл». Сформульовані в ній два постулати змінили класичні уявлення про простір і час та привели до відкриття глибокого внутрішнього зв'язку маси й енергії. Основи: **1) закони природи однакові у всіх інерціальних системах координат**, що, як відомо, рухаються рівномірно й прямолінійно одна відносно одної; **2) швидкість світла у вакуумі у всіх інерціальних системах однакова.**

Як згадано, перший постулат був сформульований ще Галілеєм. З нього випливали й так звані *перетворення Галілея*. Так, якщо система K' рухається відносно системи K уздовж осі x зі сталою швидкістю v , то координати точки A в обох системах будуть зв'язані співвідношеннями

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (3.3)$$

Це і є формули перетворення Галілея. До того ж цілком відповідно до уявлень Ньютона про абсолютний час тут приймається як само собою очевидне, що

$$t' = t. \quad (3.4)$$

Таке означає, що проміжки часу між одними й тими самими двома подіями однакові для всіх спостерігачів і що дві події, одночасні для одного спостерігача (у системі K), будуть одночасними і для всіх інших в системах K' , K'' і т. д. Закони класичної механіки інваріантні відносно перетворень Галілея.

Зовсім інакша ситуація в теорії відносності. Для ілюстрації візьмемо приклад із кімнатою, здатною рухатися. Один зі спостерігачів перебуває всередині кімнати, другий – поза нею. У момент часу $t' = t = 0$ посередині кімнати спалахує світловий сигнал. Внутрішній спостерігач міркує так: «Світловий сигнал, який поширюється від центра кімнати, досягне стін одночасно,

оскільки всі стіни містяться на однаковій відстані від джерела світла, а швидкість світла однакова в усіх напрямках».

А ось що говорить зовнішній спостерігач, відносно якого кімната рухається: «У моїй системі координат швидкість світла така сама, як і в системі спостерігача, котрий рухається разом із кімнатою. Мені немає діла до того, чи рухається джерело світла у моїй системі чи ні, оскільки його рух не впливає на швидкість світла. Те, що я бачу,— це світловий сигнал, що поширюється зі сталою швидкістю, однаковою в усіх напрямках. Одна зі стін намагається утекти від світлового сигналу, а друга наблизитися до нього. Тому ту стіну, яка віддаляється, сигнал досягне дещо пізніше, ніж ту, яка до нього наближається».

У зв'язку з цим **Айнштайн** писав: «Ми бачимо, що не слід надавати абсолютного значення поняттю одночасності. Дві події, одночасні при спостереженні з одної координатної системи, уже не сприймаються як одночасні при розгляді їх з іншої системи, котра рухається відносно першої».

З постулатів Айнштайна і випливають *перетворення Лоренца*, що пов'язують координати й час у двох системах, які рухаються рівномірно й прямолінійно одна відносно одної. Зокрема, коли система K' рухається відносно системи K зі швидкістю v уздовж осі x , то формули перетворення координат і часу при переході від системи K' до системи K мають вигляд

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad (3.5)$$

За теорією відносності кожен фізичний закон повинен бути інваріантним, стосовно цих перетворень.

Неважко перекоонатися, що за малих швидкостей v ($v \ll c$) ці співвідношення зводяться до рівнянь (3.3). Крім того, як це видно і з рівності (3.1), при $v > c$ вираз $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ стає уявною величиною. Це означає, що ніяке тіло (маса якого дійсна!) не може рухатися зі швидкістю, більшою від швидкості світла. Маємо співвідношення і для складання швидкостей

$$V = \frac{x}{t} = \frac{u+v}{1 + \frac{uv}{c^2}}. \quad (3.6)$$

Звідси бачимо, що навіть коли $u = v = c$, то й тоді $V = c$! І навпаки, при $v \ll c$ і $u \ll c$ із співвідношення (3.6) випливає закон складання швидкостей (3.2).

З постулатів спеціальної теорії відносності випливає формула так званого *релятивістського ефекту Доплера*

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} + 1 - \frac{v}{c}}}. \quad (3.7)$$

При інтерпретації червоного зміщення у спектрах галактик йдеться не про їхній рух у просторі, а про розширення самого простору. Проте з низки міркувань буває зручним говорити і про «рух галактики» відносно спостерігача зі швидкістю v , яка й визначається формулою (3.6). Тут, як бачимо, при $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \rightarrow \infty$

маємо $v \rightarrow c$.

І ще таке «парадоксальне». Як висловився Айнштайн, «здоровий глузд – це забобони, які складаються у віці до вісімнадцяти років». Справді, теорія відносності показує нам явища навколишнього світу під таким кутом зору, який, здавалося б, суперечить отому «здоровому глуздові»... А проте все це – відображення об'єктивних закономірностей природи.

Зокрема, з перетворень Лоренца випливають два важливі, але зовсім незвичні для нас висновки: **1) довжина l якогось тіла, наприклад стрижня, найбільша у тій системі координат, відносно якої це тіло перебуває у спокої; 2) проміжок часу між двома певними подіями (наприклад, двома послідовними спалахами світла) буде найменшим у тій системі координат, відносно якої ці події перебували у стані спокою:**

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad \tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta}}. \quad (3.8)$$

Додамо, що час t , виміряний у системі відліку, де й відбувається подія, прийнято називати *власним* часом. Таким, наприклад, буде час, виміряний космонавтами в ракеті, що рухається до інших зоряних світів. На відміну від того оператори-земляни, приймаючи сигнали космонавтів, реєструють *координатний* час.

Останніми роками активно обговорюється питання про можливість існування *тахіонів* (від гр. «тахіс» – швидкий) – частинок з уявною масою, які рухаються зі швидкостями, більшими від швидкості світла.

Важливим висновком теорії відносності є зв'язок між масою тіла m та його енергією E , що його Ейнштейн отримав у вигляді

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.9)$$

Звідси випливає, що при $v \rightarrow c$ енергія частинки $E \rightarrow \infty$, а випадок $v > c$ був би взагалі неможливий.

І все-таки фізики роблять висновок, що в принципі теорія відносності не заперечує надсвітлових рухів. У «щоденній» практиці, по суті, маємо справу з двома типами частинок. Перший – «нормальні» частинки, швидкості яких менші від швидкості світла c (для них пропонується назва «тардіони»). Другий, і особливо цікавий тип, – це фотони і нейтрино («люксони»), котрі, «народившись», рухаються зі швидкістю світла, їх не можна загальмувати, а лише змусити зникнути. Формула (3.9) непридатна для опису фотонів, для яких $v = c$. Однак такі частинки існують!

Тахіони й мали б утворювати групу третього типу частинок, у яких $v > c$, а маса спокою m_0 уявна, її можна записати $m_0 = im^*$, де m^* – деяке дійсне число.

Такі частинки мали б дуже цікаві властивості. Щоб загальмувати, скажімо, тахіон до швидкості $v = c$, треба було б надати йому величезну енергію. І навпаки, прискорюючись у своєму русі,

тахіон віддавав би енергію. Узагалі, рухаючись, тахіон увесь час мав би випромінювати електромагнітні хвилі, причому швидкість його зростала б до нескінченності. Тахіон, який рухається зі швидкістю $v = \infty$, енергії *не має*. Для таких нескінченно швидких тахіонів запропоновано назву «трансцендентний тахіон». За-реєструвати такі частинки практично було б неможливо, бо в них немає ні енергії, ні імпульсу, які вони могли б віддати.

Здійснюються спроби (поки що невдалі) виявити тахіони, зокрема під час деяких реакцій радіоактивного розпаду.

Величезним досягненням спеціальної теорії відносності, як і фізики взагалі, було встановлення зв'язку між енергією і масою, що його вже записано раніше як формулу (3.9). За малих швидкостей з неї отримуємо

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2,$$

причому другий доданок – добре відомий вираз для кінетичної енергії тіла, яке має масу m_0 і рухається зі швидкістю v . А при $v = 0$ отримуємо співвідношення

$$E_0 = m_0 c^2, \quad (3.10)$$

так звану *енергію спокою* маси m_0 .

Формула (3.10) лежить в основі усіх обрахунків, пов'язаних з будівництвом атомних електростанцій (тут йдеться про розпад ядер урану) і моделюванням процесів виділення енергії у надрах зір (синтез важчих хімічних елементів, починаючи від ядер гелію).

Після встановлення взаємозв'язку (3.10) прийнято говорити про еквівалентність маси й енергії. Але – йдеться не про «перетворення» маси в енергію і навпаки, а про те, що будь-яке перетворення енергії з одного виду на інший супроводжується відповідним переходом маси з одної форми в іншу. Енергію не можна ототожнювати з масою, бо перша характеризує здатність тіла виконувати роботу, тоді як друга – міру його інерції.

І останній парадокс. У вільному просторі (вакуумі) швидкість світла є граничною швидкістю поширення будь-яких фізичних впливів. Однак у «звичайному», зокрема у міжзоряно-му і міжгалактичному середовищі виникає дисперсія світла.

Через це розрізняють: 1) *групову* швидкість руху пакета хвиль, який переносить енергію, і 2) *фазову* швидкість – швидкість переміщення фази хвилі. Ця остання, на противагу груповій швидкості, може істотно перевищувати c . Прикладом є виявлене ще в 1934 р. *випромінювання Черенкова-Вавилова* – випромінювання світла зарядженою частинкою, яка рухається в середовищі зі швидкістю, що перевищує фазову швидкість світла в ньому.

Ілюзію надсвітлового руху можна створити на хмарі, що знаходиться від спостерігача на відстані близько 5 км, якщо обертати прожектор з кутовою швидкістю 10^4 об/с. В астрономії ілюзія надсвітлової швидкості виникає при розширенні викиду в далекій галактиці, якщо тільки його швидкість близька до швидкості світла. Це і обумовлене ефектами спеціальної теорії відносності.

4. Математичне підґрунтя космології

Працю Галілея «Пробірних справ майстер» вважають маніфестом нового природознавства, який ставить докази, засновані на спостереженні, експерименті і точному математичному розрахунку. Обговорюючи проблему вибору системи світу, природу комет і особливості їх руху, він висловився так: «Філософія написана у величній книзі (я маю на увазі Всесвіт), яка постійно відкрита нашому погляду, але зрозуміти її може лише той, хто спочатку навчиться осягати її мову і тлумачити знаки, якими вона написана. Написана ж вона мовою математики, і знаки її – трикутники, кола та інші геометричні фігури, без яких людина не змогла б зрозуміти в ній жодного слова; без них вона була б приречена блукати напотемки лабіринтом».

В подальшому мова фізики як засіб опису законів природи безперервно удосконалюється й ускладнюється. А ще – на початку ХХ в. змінився підхід до опису фізичних явищ: простір і час, які «раніше існували окремо і незалежно один від одного», були з'єднані в єдиний чотиривимірний простір–час.

Чотиривимірний світ Мінковського. Передовсім зробімо невеличку екскурсію в царину елементарної геометрії. Накрес-

лимо прямокутну систему координат xOy і в першому її квадранті зобразимо довільний відрізок AB . Координати кінців цього відрізка позначимо через x_1, y_1 та x_2, y_2 . Відповідно до теореми Піфагора знаходимо, що $AB^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$ (рис. 4.1).

Повернемо систему координат на довільний кут φ , тобто побудуємо ще одну прямокутну систему координат $x'Oy'$ з тим же початком у точці O . Очевидно, що тепер проекції відрізка AB на вісь Ox' (тобто величина $x_2' - x_1'$) і на вісь Oy' (відрізок $y_2' - y_1'$) матимуть інші значення. Проте й тут $AB^2 = (x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2$. Інакше кажучи, довжина відрізка не залежить від орієнтації координатних осей: вона є *інваріантом*.

Площина – простір двох вимірів. Аналогічний вираз можна записати і для тривимірного простору.

Повернемося до перетворень Лоренца (§3) та складемо співвідношення $S_{21}^2 = (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$ і знаходимо після нескладних перетворень, що

$$S_{21}^2 = (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = (\mathbf{x}_2' - \mathbf{x}_1')^2 - c^2(t_2' - t_1')^2. \quad (4.1)$$

Але $x_2 - x_1 = l$ – відстань між двома подіями у системі K (тоді як $x_2' - x_1' = l'$ – у системі K'), а $t_2 - t_1 = \tau$ (і відповідно $t_2' - t_1' = \tau'$) – проміжок часу між тими подіями. Ми бачили вже, що кожна з цих величин *зокрема* набуває *різних* значень у різних системах координат. А от певна *комбінація* цих величин $S_{21}^2 = l^2 - c^2\tau^2$ (чи $S_{21}^2 = c^2\tau^2 - l^2$) залишається *незмінною* при переході від одної системи координат до іншої. Інакше кажучи, величина S_{21} є *інваріантом*.

У загальному вираз для величини S_{21} , яку прийнято називати *інтервалом* між двома подіями, записують так:

$$S_{21}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 \quad (4.2).$$

У 1908 р. німецький фізик і математик Герман **Мінковський** (1864 – 1909) увів поняття *чотиривимірного світу*, в якому три виміри – просторові, а четвертий – час.

Тут кожен моментальну подію описують чотирма числами.

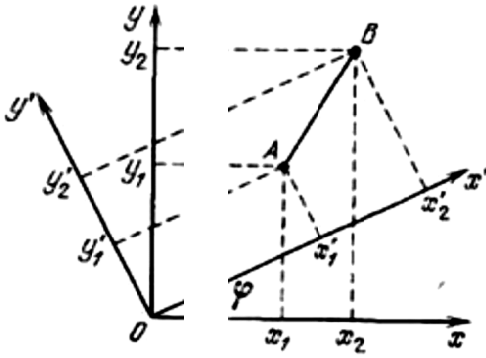


Рис 4.1. При повертанні проєкції відрізка АВ на координатні осі змінюються, проте сама величина системи координат на довільний кут φ відрізка залишається однаковою.

Для цілковитої симетрії запису інтервалу Мінковський запропонував такі позначення: $x_1=x$, $x_2=y$, $x_3=z$, та $x_4=ict$, де $i = \sqrt{-1}$. Крім того, при розгляді двох близьких подій доцільно різниці координат позначати знаком диференціала, наприклад $x_2-x_1=dx$, $ic(t_2-t_1)=icdt$, а інтервал між подіями позначати через ds . Тоді

замість співвідношення (4.2) матимемо

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = \sum_{i=1}^4 dx_i^2 \quad (4.3)$$

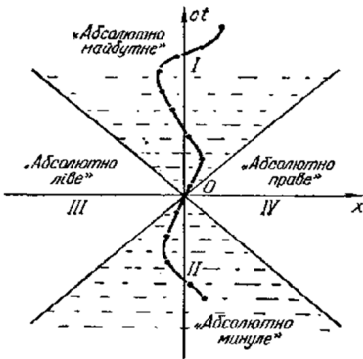


Рис 4.2. Зображення світової лінії на площині Мінковського. Точка рухається уздовж осі x зі швидкістю, змінною як за величиною, так і за напрямом.

Величину ds (чи S_{12}) можна розглядати як «відстань» у чотиривимірному світі Мінковського, а перехід від однієї системи координат до іншої – як «поворот» координатних осей у чотиривимірному світі.

Сукупність чотирьох координат x_1 , x_2 , x_3 , та x_4 Мінковський назвав *світовою точкою*. Безперервний ряд значень таких координат, що описують положення певного тіла у заданій системі відліку (скажемо й інакше – послідовність подій,

пов'язана з якимсь тілом), зветься *світовою лінією* цього тіла.

Неважко, зокрема, зобразити світову лінію нашої планети. Оскільки орбіта Землі лежить у площині, то, спрямувавши вісь часу перпендикулярно до тієї площини, знаходимо, що світовою лінією Землі буде гвинтова лінія, котра в проекції на згадану площину і дає еліпс.

Як видно з виразу для інтервалу (4.2), тут може бути три випадки (рис 4.2): 1) $l < ct$, 2) $l > ct$ і 3) $l = ct$. Перший з них відповідає *часоподібному* інтервалові: відстань між двома подіями, які відбулися у точках x_1 та x_2 відповідно в моменти часу t_1 і t_2 , менша відстані, що її проходить світловий сигнал за час $\tau = t_2 - t_1$. Тому подія 1 може бути причиною події 2, і цей порядок двох подій у часі в усіх інерціальних системах буде однаковий.

Якщо $l > ct$, то відстань між двома подіями перевищує відстань, яку може пройти промінь світла за час τ . Тут подія 1 не може бути причиною події 2. Такий інтервал прийнято називати *просторовоподібним*. У цьому випадку можна підібрати систему відліку, в якій обидві події будуть одночасними. Проте аж ніяк не можна ввести систему, де події відбулися б в одному і тому самому місці. Тут неможлива й зміна положень подій: те, що «ліворуч» в одній системі, буде «ліворуч» і в усіх інших. Отож можна розрізняти «абсолютно ліве» та «абсолютно праве» положення подій.

При $l = ct$ відстань між двома подіями абсолютно рівна шляхові, що його проходить світло за час τ . Це – *світлоподібний* інтервал.

На рис 4.2 зображено світову лінію якогось тіла у випадку, коли його рух відбувається зі змінною швидкістю лише уздовж осі x . Прямі $x = \pm ct$, що над віссю x , відповідають світлоподібним інтервалам – поширенню світлових сигналів уздовж осі x , сигнали випущені з точки $x=0$ в момент $t=0$ у двох можливих напрямках.

Будь-яка точка, що міститься в ділянці III або IV, віддалена від події O просторовоподібним інтервалом, тобто вони абсолютно віддалені від події O . Як кажуть, тут розміщені події, про які ще рано знати, але на які вже пізно впливати. Вони не можуть бути ні причинами, ні наслідками події O .

Неевклідові геометрії. Геометрія Евкліда не викликала сумнівів протягом двох тисячоліть. І лише в XIX ст. **Лобачевський, Гаусс і Янош Боляй** опублікували результати досліджень, з яких випливала можливість існування *неевклідової геометрії* – геометрії, де наведені вище положення (постулати) і наслідки, що з них випливають, не виконуються.

Гаусс розробив метод, що дозволяє безпосередньо досліджувати викривлення тієї або іншої поверхні. Він знайшов, що всі кількісні геометричні властивості поверхні («двовимірного простору») приховані в елементі відстані між двома його довільними точками.

Перетнемо викривлену поверхню площиною, що проходить через нормаль, проведену до цієї поверхні в довільній точці P . Так одержуємо криву лінію, яку в околі точки P можна розглядати як дугу кола з деяким радіусом a . Як виявилось, для кожної точки на викривленій поверхні завжди можна знайти два взаємно перпендикулярних напрями перетину так, що один із радіусів (a_1) буде найменшим, інший (a_2) – найбільшим. Вели-

чину $k = \frac{1}{a_1 a_2}$ прийнято називати *гауссовою*, або *повною кривиною*.

Гаусс увів у науковий побут узагальнену систему координат u, v , в якій, по-перше, кут між «віссю абсцис» і «віссю ординат» не обов'язково прямий і, по-друге, координатні лінії можуть бути кривими. У такій системі координат відстань між двома нескінченно близькими точками запишеться у вигляді

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (4.4)$$

Відмітивши на поверхні три пари точок і визначивши відстані між ними (ds) і проєкції цих відстаней на координатні лінії, можна знайти коефіцієнти E , F і G . Ці три величини і визначають кількісну або внутрішню геометрію поверхні, зокрема, її кривину k . Виявилось також, що на заданій поверхні одна з ліній, що з'єднують дві задані точки, має якнайменшу довжину. Цю лінію прийнято називати *геодезичною*.

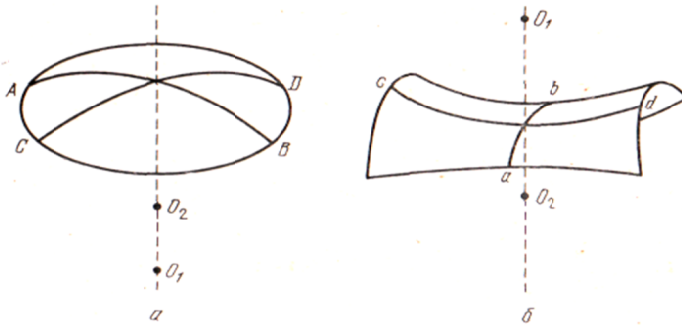


Рис. 4.3. Положення центрів кіл, радіуси яких визначають кривину і тим самим тип геометрії – Рімана (а) або Лобачевського – Больяя (б)

У 1854 р. **Ріман** узагальнив метод Гаусса на довільне число вимірів. Він встановив, що і в цьому випадку можна побудувати внутрішню геометрію n -вимірного світу, ґрунтуючись лише на елементі довжини. Як і в двовимірному випадку, головною характеристикою внутрішньої геометрії світу є гауссова кривина k . Але розрахувати її тут набагато важче.

Отже, плоска геометрія Евкліда виявилася всього лише окремим випадком геометрії поверхні, коли гауссова кривина $k = 0$; адже можливі також випадки $k > 0$ і $k < 0$. Перший з них відповідає геометрії на сфері (якщо при цьому $a_1 = a_2$, оскільки в загальному випадку може бути, що $a_1 \neq a_2$ і що $a_1 \neq a_2$ змінюються від точки до точки). Тут «прямі», тобто геодезичні лінії мають обмежену довжину, так що, пересуваючись по них, ми повернемося до початкової точки. Це тип *геометрії Рімана*. При $k < 0$ центри кругів, радіуси яких відповідно рівні a_1 і a_2 , лежать по різні боки поверхні, що має форму сідла. Це *геометрія Лобачевського–Больяя*. У цьому випадку геодезичні лінії мають нескінченну протяжність (рис 4.3б).

Щоб зрозуміти суть загального методу Рімана, введемо для координат u і v позначення x^1 і x^2 , а замість E , F і G відповідно g_{11} , g_{12} , g_{22} . Тоді отримаємо, що

$$ds^2 = g_{11}(dx_1)^2 + g_{12}dx^1dx^2 + g_{21}dx^2dx^1 + g_{22}(dx^2)^2.$$

Тут $g_{12} = g_{21}$, але такий запис дає можливість зрозуміти, як скласти вираз для величини елемента довжини в світі з довільним числом N вимірів. У скороченому вигляді, зокрема, при $N=4$ і координатній сітці x^1, x^2, x^3, x^4 , квадрат довжини ds – відстані між двома близькими точками – записується у вигляді суми

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^4 g_{ik} dx^i dx^k. \quad (4.5)$$

Тут також маємо $g_{ik} = g_{ki}$. Сукупність 16 величин, з яких незалежні лише 10, прийнято називати *фундаментальним метричним тензором* другого рангу. Його компоненти g_{ik} одержали назви *метричних коефіцієнтів*.

Елементи тензорного аналізу. Ймовірно, маючи на увазі всю складність цієї нової «мови природи», Айнштайн одного разу пожартував: «Математика – це єдиний досконалий метод водити самого себе за ніс...»

Загальна теорія відносності описує властивості чотири-вимірного простору-часу з урахуванням конкретного розподілу матерії. Тут уже неможливо ввести декартову координатну систему, а роль прямих у ній, як згадувалося, відіграють геодезичні лінії. Співвідношення і закони формуються мовою тензорного числення, завдяки чому їх форма залишається незмінною при переході від однієї довільної системи координат до іншої. Деякі елементи цього математичного апарату наводимо тут.

Передусім, вибравши в N -вимірному просторі довільну систему координат, можемо характеризувати положення кожної його точки N координатами (x^1, x^2, \dots, x^N) . Очевидно, що при переході від системи координат X до системи Y кожна координата y^i буде функцією всіх координат x^i : $y^i = f^i(x^1, x^2, \dots, x^N)$. Формула, якою визначається перетворення диференціалів (малих приростів) при переході до системи координат Y , має вигляд

$$dy^i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial f^i}{\partial x^k} dx^k = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^i}{\partial x^k} dx^k. \quad (4.6)$$

Розглянемо набір із N функцій (V^1, V^2, \dots, V^N) , кожна з яких у системі координат X є відомою функцією координат (x^1, x^2, \dots, x^N) . Коли такі функції при переході від системи X до системи Y перетворюються за наведеним тут законом (як диференціали координат), то ці функції називаються компонентами *контраваріантного тензора* 1-го рангу. Тут маємо

$$V^i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^i}{\partial x^k} V^k, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4.7)$$

І навпаки, якщо при переході від системи X до системи Y деякі функції (W_1, W_2, \dots, W_N) перетворюються за законом

$$W_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial x^k}{\partial y^i} W_k, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (4.8)$$

то їх сукупність називається *коваріантним* тензором 1-го рангу. Для скорочення запису знак суми прийнято не ставити, але слід пам'ятати: якщо якийсь індекс в тому або іншому доданку формули повторюється двічі, то такі члени підсумовуються по всіх значеннях цього індексу від 1 до N . Тому, зокрема, останнє співвідношення звичайно записують так:

$$W_i = \frac{\partial x^k}{\partial y^i} W_k.$$

Аналогічно вводяться поняття тензорів 2-, 3-, 4-го і т.д. рангів. Зокрема, контраваріантний і коваріантний тензори 2-рангу перетворюються за законами

$$T^{ik} = \frac{\partial y^i}{\partial x^m} \frac{\partial y^k}{\partial x^n} T^{mn}; \quad (4.9)$$

$$K'_{ik} = \frac{\partial x^m}{\partial y^i} \frac{\partial x^n}{\partial y^k} K_{mn},$$

причому кожний з індексів i, k, m, n приймає значення від 1 до N . Усіх же компонент тензора T^{mn} чи K_{mn} налічується N^2 (взагалі N^n , де n – ранг тензора).

Використовується також поняття *змішаного* тензора. У цьому випадку закон перетворення тензора 2-го рангу має вигляд

$$P_i^k = \frac{\partial y^k}{\partial x^m} \frac{\partial x^n}{\partial y^i} P_n^m. \quad (4.10)$$

Сукупність N^4 функцій координат R_{ikm}^n утворює тензор 4-го рангу з трьома коваріантними індексами і одним контраваріантним. Цей тензор перетворюється за законом

$$R'_{\beta\gamma\delta}{}^\alpha = \frac{\partial y^\alpha}{\partial x^i} \frac{\partial x^k}{\partial y^\beta} \frac{\partial x^m}{\partial y^\gamma} \frac{\partial x^n}{\partial y^\delta} R_{kmn}^i \quad (4.11)$$

У тензорному аналізі можливий ряд операцій з тензорами. Передусім тензори однакового порядку і будови можна складати ($C_n^{ik} = A_n^{ik} + B_n^{ik}$); тензори можна також перемножувати ($C_{jmn}^{ik} = A_j^i B_{mn}^k$). Важливу роль у тензорній алгебрі відіграє *операція згортки*, суть якої можна пояснити на такому прикладі. Візьмемо змішаний тензор 4-го рангу R_{mn}^{ik} , виділимо компоненти, в яких один з індексів коваріантності співпадає із одним з індексів контраваріантності, і складемо їх:

$$R_{ma}^{ia} = R_{m1}^{i1} + R_{m2}^{i2} + \dots + R_{mN}^{iN} = R_m^i \quad (4.12)$$

Унаслідок такої операції з тензора 4-го рангу одержимо тензор 2-го рангу. Аналогічно $R_{kmi}^i = R_{km}$. З тензором R_m^i можна провести наступну операцію згортки: $R_i^i = R_1^1 + R_2^2 + \dots + R_N^N = R$, внаслідок якої одержимо скалярну величину R – *інваріант* цього тензора.

Тензори, якими визначаються основні риси геометрії чотиривимірного світу ($N=4$) у загальній теорії відносності, складаються на основі компонентів фундаментального метричного тензора g_{ik} . Ці компоненти, входячи у

у близьку до неї точку M_2 (з координатами $x^i + dx^i$) напрямки координатних ліній змінюються. Якщо, наприклад, dV^i – повний приріст величини i -ї компоненти контраваріантного тензора V^i при переході від точки M_1 до точки M_2 , то в ньому «прихована» частина приросту δV^i , обумовлена тільки зміною напрямків координатних ліній. Про реальну ж зміну величини складових тензора на проміжках dx^k свідчить різниця $DV^i = dV^i - \delta V^i$. Поділивши її на величину dx^k , знаходять *коваріантну похідну* тензора

$$V_{|k}^i = \frac{\partial V^i}{\partial x^k} + \Gamma_{km}^i V^m, \quad (4.15)$$

де

$$\Gamma_{mk}^i = \Gamma_{km}^i = \frac{1}{2} g^{in} \left[\frac{\partial g_{mn}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{kn}}{\partial x^m} - \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^n} \right] \quad (4.16)$$

– символ Крістофеля другого роду. У випадку змішаного тензора другого рангу T_i^j маємо відповідно

$$T_{j|k}^i = \frac{\partial T_i^j}{\partial x^k} - \Gamma_{ik}^m T_m^j + \Gamma_{mk}^j T_i^m, \quad (4.17)$$

і т.д. Коваріантна похідна метричного тензора g_{ik} рівна нулю.

Складемо коваріантну похідну деякого тензора $T_{i/k}^j$ і, прийнявши $j=k$, знайдемо суму його відповідних компонент. Одержимо N величин, які в сукупності становлять *коваріантну* (або векторну) *дивергенцію* даного тензора. Якщо ж коваріантна дивергенція якогось тензора рівна нулю, то це означає, що фізична величина, описувана цим тензором, зберігає своє значення, і цей закон збереження виконується при переході від одної системи координат до іншої.

І, нарешті, запишемо рівняння *геодезичної лінії*:

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma_{km}^i \frac{dx^k}{ds} \frac{dx^m}{ds} = 0, \quad (4.18)$$

які в сукупності становлять складну систему диференціальних рівнянь другого порядку. Їх інтегрування проводиться з урахуванням певних початкових умов. До речі, геодезичну лінію отримуємо наглядно із рівняння руху вільної частинки в криволінійній системі координат. Справді, повний приріст чотиривимірної швидкості частинки $DU^i = D \frac{dx^i}{ds}$, виражений через коваріантні похідні, поділений на величину ds і прирівняний до нуля, співпадає з вказаним вище рівнянням геодезичної лінії. Тому *геодезична лінія* – це лінія із такою особливістю: якщо уздовж неї паралельно переносити довільний вектор, то кут між цим вектором і геодезичною лінією залишається незмінним. Зокрема, вектор, дотичний до геодезичної в якійсь точці M , залишається дотичним до неї і при паралельному перенесенні його уздовж цієї лінії.

Після цього стислого викладу елементів тензорного аналізу повернемося до питання про кривину чотиривимірного простору – часу. Саме при її визначенні використовується уявлення про паралельне перенесення вектора. Ця операція якраз і полягає у визначенні приросту δV^i , який виражено вище через символи Крістофеля. У плоскому просторі унаслідок паралельного переносу вектора уздовж замкнутого контура одержуємо той же вектор. У викривленому ж просторі результат паралельного переносу залежить не тільки від початкового вектора, але і від шляху, яким було здійснено перенесення, тобто від орієнтації контура в просторі.

Візьмемо для прикладу трикутник, утворений на поверхні сфери двома меридіанами і сегментом екватора, дуга якого охоплює кут 90° (геодезичні лінії!).

Розглянемо вектор V_1 , який у точці A дотичний до екватора і спрямований до сходу (рис. 4.4).

При паралельному (щодо викривленої поверхні, а не щодо спостерігача, який перебуває поза нею!) перенесенні цього вектора уздовж екватора від точки A до точки B величина

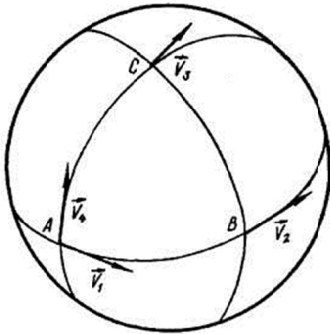


Рис. 4.4. При паралельному переносі вектора V_1 уздовж контура ABCA одержуємо вектор V_4 , напрям якого на 90° відрізняється від початкового; такий паралельний перенос вектора уздовж малого замкнутого контура дає можливість визначити міру викривлення поверхні.

проекції вектора на екватор і кут між вектором і перпендикуляром до згаданої поверхні в кожній точці екватора не змінюються. У точці B одержуємо вектор V_2 , який також спрямований на схід. Здійснюючи далі паралельне перенесення цього вектора уздовж дуги BC меридіана, знайдемо, що на полюсі, в точці C , вектор V_3 буде спря-

мований по дотичній до дуги AC . При дальшому перенесенні його до точки A одержуємо вектор V_4 , напрям якого складає з початковим вектором кут 90° . Ця різниця є мірою викривлення поверхні. Очевидно, що якби ми проводили паралельне перенесення вектора

уздовж сторін трикутника, намальованого на плоскій поверхні, то напрями початкового і кінцевого векторів співпадали б.

Міру викривлення N – вимірного простору у довільній його точці M знаходять, задаючи в ньому певні напрями. Інакше кажучи за допомогою двох геодезичних ліній, що виходять із точки M , і двох відповідно паралельних їм ліній, що перетинаються з першими, утворюють замкнутий контур, розміщений на деякій поверхні. Якщо тепер $\Delta\sigma$ – площа, обмежена цим контуром, уздовж якого здійснюється паралельне перенесення вектора, а кут $\Delta\varphi$ – кут між початковим і кінцевим напрямими

вектора, то відношення $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\sigma}$ при $\Delta\sigma \rightarrow 0$ і визначає кривину простору в точці M відповідно заданої орієнтації поверхні:

$$\lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta\sigma} \sim R_{ikmn} \quad (4.19)$$

Тензор R_{ikmn} 4-го рангу називається *тензором кривини* або *тензором Рімана – Крістофеля*. Він визначається за допомогою символів Крістофеля (тобто кінцевому підсумку – через компоненти фундаментального метричного тензора g_{ik} так:

$$R_{ikmn} = g_{ij} R^i_{kmn} = g_{ij} \left[\frac{\partial \Gamma^j_{kn}}{\partial x^m} - \frac{\partial \Gamma^j_{mn}}{\partial x^k} + \Gamma^s_{kn} \Gamma^j_{ms} - \Gamma^s_{mn} \Gamma^j_{ks} \right]. \quad (4.20)$$

Загальне число компонент цього тензора $4^4 = 256$, але незалежними з них є лише 20, оскільки виконуються умови його симетрії, асиметрії і циклічності, зокрема, $R_{ikmn} = -R_{kimn}$, $R_{ikmn} = R_{kimn}$. Необхідною і достатньою умовою переходу від ріманової геометрії до плоскої евклідової є рівність тензора кривизни нулю: $R^i_{kmn} = 0$. У загальній теорії відносності дуже важливу роль грає симетричний тензор другого рангу $R_{mn} = R^k_{kmn}$ – *тензор Річчі*, який одержують внаслідок операції згортання тензора Рімана – Крістофеля. Тензор має такий вигляд:

$$R_{mn} = \frac{\partial^2 \ln \sqrt{g}}{\partial x^m \partial x^n} - \Gamma^i_{mn} \frac{\partial \ln \sqrt{g}}{\partial x^i} + \Gamma^s_{mi} \Gamma^i_{ns} - \frac{\partial \Gamma^s_{mn}}{\partial x^s}$$

Помноживши компоненти тензора R_{mn} на g^{mk} , знаходимо змішану форму тензора Річчі: $R^k_n = g^{mk} R_{mn}$. Далі за допомогою операції згортки знаходимо інваріант кривини $R = R^n_n$.

Проілюструємо все сказане тут на прикладі сфери радіуса a . Якщо φ і θ – полярні координати, то метрика поверхні (квадрат відстані між двома точками) має вигляд $ds^2 = a^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$. Введемо позначення $\theta = x^1, \varphi = x^2$. Тут, як бачимо, компоненти фундаментального метричного тензора мають значення $g_{11} = a^2, g_{21} = g_{12} = 0, g_{22} = a^2 \sin^2 \theta$, детермінант $g = a^4 \sin^2 \theta$. Неважко знайти і компоненти

контраваріантного тензора: $g_{11} = \frac{1}{a^2}, g^{12} = g^{21} = 0, g^{22} = \frac{1}{a^2 \sin^2 \theta}$.

З усіх символів Крістоффеля не рівні нулю лише такі:

$\Gamma_{22}^1 = -\frac{1}{2} \sin 2\theta, \Gamma_{21}^2 = \Gamma_{12}^2 = \text{ctg } \theta$. Із 16 компонентів тензора Рімана

– Крістоффеля незалежна тільки одна: $R_{1221} = -a^2 \sin^2 \theta$. Своєю чергою тензор Річчі має дві ненульові компоненти: $R_{11} = -1$ і

$R_{22} = -\sin^2 \theta$. Інваріант кривини $R = g^{11} R_{11} + g^{22} R_{22} = -\frac{2}{a^2}$.

Таким чином, у двовимірному світі знайдений інваріант кривини з точністю до множника – 2 співпадає з кривиною

Гаусса $\frac{1}{a^2}$.

5. Загальна теорія відносності (ЗТВ) як основа космології ХХ ст.. Три ефекти, що впливають із ЗТВ

Рівняння Айнштайна. У ЗТВ, розроблений у 1905 – 1915 рр., «вся механіка тяжіння зведена до розв'язку одної системи коваріантних рівнянь у частинних похідних. Ця теорія уникає всіх внутрішніх суперечностей, якими докоряли класичній механіці. Вона достатня, наскільки ми знаємо, для опису спостережуваних фактів небесної механіки. Але вона подібна до будівлі, одне крило якої зроблене з добірного мармуру (ліва частина рівняння), а друге – з кепського дерева (права частина рівняння)».

При формулюванні системи рівнянь ЗТВ Айнштайн врахував, що принцип пропорціональності інертної та важкої маси логічно приводить до твердження: падіння тіл у гравітаційному полі можна розглядати як їхній вільний рух. Але ж кожен рух відбувається по певній траєкторії! Саме цей факт і стає своєрідним містком, що з'єднує фізику з геометрією. Свого часу Ньютон твердив, що вільний рух відбувається по прямій лінії. В теорії відносності її місце зайняла геодезична лінія у чотиридимірному просторі-часі.

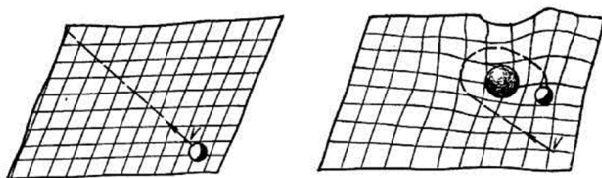


Рис. 5.1. Завдяки викривленню двовимірного простору – гумової мембрани – кулька, що рухається зі швидкістю v , «притягається» до важкої маси, яка спричинила цей прогин

Розглянемо такий приклад. Уявімо собі горизонтально натягнену гумову плівку (мембрану), на якій нанесено декартову сітку координат (рис 5.1). Легка кулька, маючи початкову горизонтальну швидкість v , рухатиметься тут рівномірно й прямолінійно (якщо знехтувати тертям). Коли ж на плівку покласти важке тіло, то під дією його ваги мембрана прогнеться. У цьому викривленому двовимірному світі геометрія вже не буде евклідовою. Кулька ж, рухаючись з початковою швидкістю v по мембрані, буде скочуватися («притягатися») до важкого тіла. Викривлення ж тривимірного, а тим більше чотири-вимірного світу наглядно зобразити неможливо. Тут доводиться констатувати лише, що поблизу гравітуючих мас закони геометрії змінюються.

У класичній фізиці тяжіння у будь-якій точці простору визначається розподілом у ньому речовини, інакше кажучи – масою тіл. Але, як довела спеціальна теорія відносності, величина маси тіла залежить від того, в якій системі відліку її визначати. Тим часом фізичні явища (як і рівняння, якими вони описуються) не повинні залежати від вибору системи координат... Тому в теорії відносності розподіл маси характеризується за допомогою *тензора імпульсу – енергії*, до якого густина і тиск речовини входять як взаємозв'язані характеристики. У випадку ідеального середовища компоненти коваріантного тензора імпульсу – енергії T_{ik} записуються у вигляді

$$T_{ik} = (E + p) \frac{dx^m}{ds} \frac{dx^n}{ds} g_{mi} g_{nk} - p g_{ik} . \quad (5.1)$$

Тут $E = \rho c^2$ – густина енергії речовини, включаючи масу спокою частинок, p – тиск, $\frac{dx^m}{ds} = U^m$ – так звана чотиривимірна швидкість, що нею визначається, зокрема, перенесення кількості руху у відповідних координатних напрямках. Тензор T_{ik} має 10 незалежних компонентів, а його коваріантна дивергенція дорівнює нулеві. У цьому останньому саме й проявляється релятивістське узагальнення законів збереження механіки Ньютона.

Далі, відповідно до основної гіпотези Айнштайна, тяжіння є наслідком викривлення простору – часу, причому міра останнього визначається речовиною, розподіл якої описується симетричним тензором імпульсу – енергії 2-го рангу. Звідси випливає, що й кривина простору – часу має характеризуватися симетричним тензором 2-го рангу.

Як було сказано, міра викривлення простору з довільним числом вимірів можна охарактеризувати тензором Рімана – Крістофеля R_{mm} . Проте детальніший аналіз привів Айнштайна до висновку, що сам тензор R_{iklm} в основне рівняння теорії входить не може, оскільки він має 20 незалежних компонентів, тоді як незалежних компонентів фундаментального метричного тензора g_{ik} є всього 10. Виявилось, що властивості чотиривимірного простору – часу можна описати тензором 2-го рангу G_{ik} , який є комбінацією тензора Річчі R_{ik} з інваріантом кривини R :

$$G_{ik} = R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik}. \quad (5.2)$$

Тензор G_{ik} прийнято називати *тензором Айнштайна*, записаним у коваріантній формі. Як і у випадку тензора T_{ik} , коваріантна дивергенція тензора G_{ik} також дорівнює нулю. Тому Айнштайн і поклав, що між обома згаданими тензорами існує лінійний зв'язок та записав рівняння своєї теорії у вигляді

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} = \chi T_{ik} \quad (5.3)$$

де $\chi = \frac{8\pi G}{c^4}$ – стала Айнштайна. Її зв'язок зі сталою тяжіння було знайдено з умови, щоб у випадку слабких гравітаційних полів загальна теорія відносності переходила в теорію Ньютона.

Тензор G_{ik} , який становить ліву частину рівняння Айнштайна, і є отим «крилом будинку», зробленого з «добірного мармуру». Своєю чергою, тензор T_{ik} , стоїть у правій частині рівнянь як крило «з кепського дерева».

Запис тензора R_{ik} у явному вигляді зводить рівняння до 6 незалежних диференціальних рівнянь другого порядку. Їх розв'язування для кожного конкретного випадку провадиться таким шляхом: передовсім задають певну функціональну форму для тензора T_{ik} , наприклад у формі (5.3), а потім підбирають функції g_{ik} так, щоб задовольнити рівняння (5.3). Найчастіше таку задачу розв'язують, або дуже спрощуючи форму T_{ik} , та g_{ik} , або методом послідовних наближень.

Зразу ж, 1916 р., німецький астроном і фізик **Карл Шварцшільд** (+1916) використав рівняння (5.3) для дослідження властивостей простору – часу поблизу маси m . Задача зводилася до інтегрування рівнянь (5.3) за умови, що їхня права частина дорівнює нулеві, оскільки в порожнечі (у просторі навколо маси m) усі компоненти тензора імпульсу – енергії $T_{ik} = 0$.

На основі цього *зовнішнього розв'язку Шварцшільда* здійснено аналіз «задачі Кеплера», тобто досліджено рух матеріальної точки m поблизу центральної маси M (планети навколо Сонця) та закономірностей поширення світлових променів поблизу маси M .

Експериментальна перевірка теорії. ЗТВ – одна з найскладніших галузей сучасної фізики. Правильність її ідей підтверджена трьома ефектами, на які вказав сам Айнштайн. Це 1) рух перигеліїв планет, передусім Меркурія, 2) відхилення променів світла при їх проходженні поблизу гравітуючих мас і 3) зміщення ліній у червоний бік у спектрах небесних тіл.

Проте ці ефекти дуже мізерні. Скільки зусиль докладають учені, щоб підвищити точність для їх вимірювання! Бо ця теорія проявляє свою велич і міць лише у великих масштабах...

Кут, описаний радіусом, який з'єднує планету з Сонцем, від одного перигелію до другого, перевищує кут, що відповідав би повному обертові, на величину, яка визначається виразом

$$\varphi = \frac{6\pi GM_o}{a(1-e^2)c^2} \text{ рад.} \quad (5.4)$$

- обертання великої осі орбіти планети відбувається у напрямі її руху навколо Сонця (рис 5.2).

Для встановлення цього ефекту з усіх планет Сонячної системи найкраще надається найближчий до Сонця Меркурій. Велика піввісь його орбіти $a = 57,9$ млн. км, ексцентриситет її $e = 0,2066$, період обертання навколо Сонця $T = 0,241$ року ≈ 88 діб. За сто років планета здійснює навколо Сонця 415 обертів, а напрям її великої осі, відповідно до теорії Айнштейна, повертається відносно зір на кут $\varphi \approx 43,03''$ (за один оберт – усього на $0'',108$). І тут доречно пригадати, що за рахунок

притягання Меркурія іншими планетами Сонячної системи згадана вісь орбіти Меркурія повертається за сто років на $532''$ (а це у 12 разів перевищує релятивістський ефект!). Не дивно, що знайдена зі спостережень величина кута φ відома з певною похибкою. І все ж цей додатковий ефект було виявлено ще в середині позаминулого століття, хоча тоді його намагалися пояснити наявністю поблизу Сонця ще одної планети.

До речі, кут в $1''$ – кут, під яким можна бачити монету вартістю в одну копійку з відстані близько трьох кілометрів.

Величина релятивістського зміщення перигелію Землі за сто років становить усього $3'',83$. Динамічна ж поправка, пов'язана головним чином з притяганням Місяця, сягає $1153'',45$. Проте вдалося встановити, що крім суто динамічної поправки у зміщенні перигелію Землі є зміщення близько $4'',6$ за сто років, яке й пояснюється у рамках ЗТВ. Тут, однак, точність невисока.

Ще 1801 р. було зроблено висновок, що поблизу Сонця промінь далекої зорі відхиляється на кут близько $0,85''$. Цей висновок впливає з механіки Ньютона, коли розглядати поширення світла як рух у напрямі до Сонця пробної частинки, що на нескінченності має швидкість c . Орбітою такої частинки є гіпербола, а вказана величина відхилення – кут між двома асимптотами тої гіперболи. Такий же результат впливає і зі спеціальної теорії відносності.

Проте насправді йдеться про вільний рух фотонів у викривленому просторі – часі. Тож насправді світловий промінь, проходячи поблизу кулястого тіла з масою M , відхиляється від прямолінійного шляху на величину

$$\beta = \frac{4GM}{c^2 r}, \quad (5.5)$$

де r – найменша відстань променя світла від центра тіла. Конкретно для Сонця маємо $\beta = 1,75'' \frac{R_{\odot}}{r}$. Як бачимо, при $r = R_{\odot}$ величина кута β удвічі перевищує ту, що впливає з теорії Ньютона.

Щоб виявити згаданий ефект, порівнюють фотографічні зображення певної ділянки неба, отримані під час сонячних затемнень і через декілька місяців. Зміщення зображень зір на фотоплатівках непомітні для неозброєного ока: це – соті частки міліметра.

Уперше цей ефект виявили під час спостережень повного сонячного затемнення 29 травня 1919 р. І це був триумф ідей ЗТВ. В подальших близько 60 їх вдавалося здійснити такі ж вимірювання. Висновок: цим ефектом ЗТВ підтверджується з точністю до 15-20% (точність першого була 30%).

Уже знайдено відхилення радіопроменів, що, йдучи від квазарів (зокрема, 3C 273 і 3C 279), проходять поблизу Сонця. Результати в цілому збігаються з оптичними спостереженнями. Ще одним методом перевірки цього ефекту є вимірювання запізнення сигналу – радіоімпульса, спрямованого на Меркурій або Венеру в моменти, коли для земного спостерігача та або та планета перебуває «майже за Сонцем», як також радіолокація

КА при їх рухах до близьких планет.. Наслідки експериментів підтверджують ЗТВ з точністю 0,1%.

Третій ефект ЗТВ полягає в тому, що спектральні лінії світла, випромінюваного з поверхні тіла масою M і радіусом R , зміщуються у червоний бік на величину

$$\Delta\lambda = \frac{GM}{c^2 R} \lambda. \quad (5.6)$$

Для Сонця при довжині хвилі $\lambda=4000$ А це дає усього $\Delta\lambda=0,008\text{А}$ – величину, яку практично неможливо виділити на тлі інших ефектів. У спектрах зір білих карликів ефект відчутніший. І все ж точність оптичних спостережень тут не перевищує 10 %, бо як радіус зорі, так і її маса в кожному конкретному випадку встановлюються з чималою похибкою.

У 1965 р. для визначення величини червоного зміщення в гравітаційному полі Землі використано метод ядерної спектроскопії (ефект Мьоссбауера).

Пошук гравітаційних хвиль. Правильність ЗТВ підтвердилася б також, якби вдалося зареєструвати гравітаційні хвилі. Бо ж висновок про те, що в природі можуть існувати слабкі збурення метричних властивостей простору – часу (кажучи мовою класичної фізики – слабкі збурення поля тяжіння) – *гравітаційні хвилі* – Айнштейн зробив ще 1916 р. Та проблема виявилася дуже складною як у теоретичному, так і в експериментальному плані.

Передусім збурення поля тяжіння описуються рівнянням, яке за своїм зовнішнім виглядом цілком збігається з хвильовим рівнянням для електромагнітного поля. Так було виснувано, що гравітаційні хвилі повинні поширюватися в порожнечі з тою самою швидкістю, що й електромагнітні, тобто зі швидкістю світла.

Як і електромагнітні, гравітаційні хвилі є поперечними: потрапляючи на «пробний заряд» (його роль тут грає маса), гравітаційна хвиля зміщує його в напрямі, перпендикулярному до напрямку свого поширення. Проте між цими хвилями є й істотна відмінність. У плоско поляризованій електромагнітній хвилі протягом періоду T пробні заряди, розташовані по колу, зміщуються відносно нейтральних частинок, причому відстані між самими зарядами увесь час залишаються незмінними (коло

не деформується). Для гравітаційних хвиль немає «нейтральних» частинок, відносно яких можна було б виміряти зміщення «зарядів». Тут доводиться говорити лише про вимірювання зміщень одного заряду (маси) відносно іншого.

За аналогією до квантів електромагнітного випромінювання – фотонів тут прийнято говорити про *гравітони*.

Взаємне несиметричне переміщення мас призводить до випромінювання гравітаційних хвиль низьких частот. Зокрема, джерелами гравітаційного випромінювання того діапазону є подвійні зорі. У цьому випадку як частота, так і потужність випромінювання істотно залежать від ексцентриситету орбіти системи. При $e = 0$ (колова орбіта) гравітаційні хвилі випромінюються на частоті ν , удвічі більшій від частоти обертання системи ν_0 . При $e = 0,5$ максимум випромінювання припадає на частоту $\nu = 4 \nu_0$ і т.д. Випромінювання гравітаційних хвиль настає в основному під час найбільшого зближення зір (у периастрі) протягом «невеликого (порівняно з повним періодом обертання) проміжка часу. При цьому більша частина потоку випромінювання спрямована уздовж осі обертання зір.

Величезна кількість високочастотного (1–10 кГц) гравітаційного випромінювання звільнюється в моменти космічних катастроф, що відбуваються в нашій та інших галактиках: внаслідок несиметричного гравітаційного колапсу (раптовий стиск зорі під дією власного гравітаційного поля, який закінчується утворенням *чорної діри*), під час зіткнення чорних дір, нейтронних зір і спалахів Наднових. Саме тоді можна очікувати короткі сплески гравітаційного випромінювання тривалістю 0,001–0,0001 с і повною енергією $10^{45} - 10^{48}$ Дж.

З 1969 р. у пресі час від часу з'являлися повідомлення, нібито їх уже вдалося зареєструвати **Джозефу Веберу** (США) за допомогою двох антен, розташованих на відстані 1000 км одна від одної. Кожен із детекторів Вебера – алюмінієвий циліндр завдовжки 1,5 м, діаметром 0,6 м і масою 1,5 т, підвішений горизонтально на тонкій нитці в рамі зі сталевих блоків, розміщеній у вакуумній камері та оточеній акустичними фільтрами. Посередині циліндра є пояс п'єзоелектричних датчиків – кристалів

кварцу, які під'єднуються до електровимірювальних приладів. Основна частота коливань антени 1661 Гц. Розтяг і стиск циліндра під дією гравітаційної хвилі фіксуються кристалами кварцу, чутливість яких дає можливість реєструвати деформації циліндра з точністю до 10^{-14} см, що в 10 разів менше діаметра атома водню (!). Реєстраційна система, спільна для обох антен, фіксувала лише ті сигнали, початок яких збігався з точністю до 0,2 с. Тим самим виключалася можливість реєстрації сейсмічних хвиль. Чутливість детектора відповідала потоковій енергії 10^{-1} Вт/см².

Протягом багатьох місяців детектори Вебера фіксували в середньому один імпульс за кожні п'ять діб, причому енергія імпульсу оцінювалася величиною 1Вт/см², а напрям на джерело імпульсів збігався з напрямом на центр Галактики. Звідси випливало, що центр Галактики випромінює у вигляді гравітаційних хвиль близько 10^{43} Вт – у мільйон разів більше, ніж у вигляді електромагнітного випромінювання.

Проте упродовж 20 років жодна з дев'яти таких же антен, виготовлених і введених у дію в інших країнах, не підтвердила результатів Вебера. Питання про природу зареєстрованих ним імпульсів так і залишається відкритим.

Почавши з 1991 р. розроблено ряд детекторів-інтерферометрів, здатних реєструвати амплітуди коливань порядку 10^{-16} см – проекти LIGO і VIRGO.

Після 15-річних спостережень пульсара PSR 1913-16 можна було впевнено сказати: непряме підтвердження існування гравітаційних хвиль вже є. Цей об'єкт – подвійна система, що в сузір'ї Орла. Очевидно, вона складається з двох нейтронних зір, одна з яких і є пульсаром. Як виявилось, період обертання пульсара навколо центра мас системи зменшується, а це значить, що пульсар PSR 1913-16 втрачає свою орбітальну енергію, тобто що обидві зорі поступово зближаються, рухаючись по спіралях. Інакше кажучи, пульсар проходить через периастр із випередженням (рис 5.3). Теорія передбачила тут зменшення орбітального періоду на 75,8 мкс/рік, а спостереження дали значення 76,3 мкс /рік. За відкриття і дослідження цього об'єкта **Р. Халс і Дж. Тейлор** у 1993 р. отримали Нобелівську премію з фізики.

Аналогічно досліджують ще близько десяти таких же систем. В усіх випадках зменшення періоду практично збігається з передбаченнями ЗТВ.

6. Варіанти моделей Всесвіту

Моделі статичного світу. Упродовж століть після Ньютона ніхто не сумнівався, що весь навколишній Всесвіт перебуває у статичному стані (тобто його розміри з часом не змінюються). У полоні таких уявлень перебував і А.Айнштайн. Його праця «Космологічні міркування до загальної теорії відносності» (1917 р.) була першою із зусиль створити картину світу, виходячи з нових уявлень про зв'язок речовини з геометрією.

Щоправда, **К. Шварцшільд** ще 1900 р. на конгресі Німецького астрономічного товариства виголосив спеціальну доповідь про міру кривини простору, заявивши (!) таке: «...можна, не вступаючи у суперечність з очевидними фактами, уявити Всесвіт замкненим у гіперболічному (псевдосферичному) просторі з радіусом кривини понад 4 000 000 радіусів земної орбіти або в межах скінченного еліптичного простору з радіусом кривини понад 100 000 000 радіусів земної орбіти».

Щодо величини можливих радіусів кривини Всесвіту Шварцшільд помилявся, але його спробам заглянути у завтрашній день науки слід віддати належне.

На основі ЗТВ астрономи розпочали конструювання *космологічних моделей*. Вихідним тут стало уявлення, за яким властивості Всесвіту для кожного заданого моменту часу однакові у всіх точках і в усіх напрямках. Перше говорить про відсутність «центра світу» (всі точки тут рівноправні), друге – про неможливість існування в ньому привілейованих напрямів. У цьому – суть *космологічного принципу*. Він дає змогу розглядати такі характеристики моделі Всесвіту, як тиск p та густина ρ , лише як функції *космічного (космологічного) часу*: скрізь $p = p(t)$ і $\rho = \rho(t)$.

Найосновніші етапи шляху тут такі. Спочатку приймається певна найзагальніша форма інтервалу ds^2 , зокрема типу (5.2), якщо йдеться про статичну модель. Далі за прийнятими компонентами фундаментального метричного тензора g_{ik} знаходять компоненти тензора Річчі R_{ik} та інваріант кривини R . Певні припущення щодо стану речовини дають змогу розписати у явному вигляді і тензор імпульсу – енергії. Тим самим тензорні рівняння (5.5) зводяться до системи декількох звичайних диференціальних рівнянь. Розв'язавши їх, отримують вирази для компонентів тензора g_{ik} і, як наслідок, – конкретну форму для інтервалу ds^2 , що відповідає заданим умовам розподілу речовини. Компонентами тензора g_{ik} і визначається геометрія простору – часу.

Задавши інтервал ds^2 у формі (5.2), Айнштайн зробив спробу побудувати модель статичного однорідного Всесвіту, для якого тиск і густина – сталі величини, що скрізь мають одне й те саме значення p_0 та ρ_0 . Виявилось, однак, що при будь-яких $p_0 > 0$ і $\rho_0 > 0$ рівняння (5.5) несумісні з уявленням про статичний Всесвіт. І лише у випадку $p_0 = 0$, $\rho_0 = 0$ розв'язки зводилися до порожнього простору – часу Мінковського.

Так виникло питання: чи не допускають ці рівняння якогось узагальнення? З'ясувалося, що й справді так, бо ж ліву частину можна доповнити додатком Λg_{ik} (коваріантна похідна такого доданку також дорівнює нулю!). Так у загальну теорію відносності

увійшов параметр Λ – космологічна стала (її розмірність $см^{-2}$). Рівняння ж Айнштайна набули вигляду

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} (R - 2\Lambda) = \kappa T_{ik}, \quad (6.1)$$

Неважко було знайти і їх розв'язки за тих же умов однорідності й статичності Всесвіту. Він виявився замкненою тривимірною сферою з радіусом

$$R = \frac{1}{\sqrt{\Lambda - \frac{8\pi G}{c^4} p_0}} \quad (6.2)$$

і об'ємом $V=2\pi^2 R^3$. Мандрівник, рухаючись «прямолінійно» (скажімо, услід за світловим променем і з такою ж швидкістю c), повернеться у вихідну точку за час $\tau = \frac{2\pi R}{c}$, не зустрівши ніякої межі!

Далі, можна прийняти, що речовина, яка заповнює Всесвіт, складається з вільних частинок (зір), які мають незначні відносні рухи, а отже, їхнім тиском можна знехтувати. Поклавши $p_0=0$, Айнштайн отримав такі вирази для оцінки найголовніших параметрів своєї моделі – радіуса кривини R , космологічної сталої Λ та повної маси речовини у Всесвіті M як функції середньої густини речовини ρ :

$$R = \frac{c}{\sqrt{4\pi G \rho}}, \quad \Lambda = \frac{4\pi G \rho}{c^2}, \quad M = \frac{\sqrt{\pi} c^3}{4\sqrt{G^3 \rho}}. \quad (6.3)$$

У той час з астрономічних спостережень впливало, що середня густина речовини у Всесвіті $\rho = 10^{-29}$ г/см³. Це приводило до таких значень інших параметрів моделі: $R \approx 10^{28}$ см, $\Lambda \approx 10^{-56}$ см⁻², $M \approx 2 \cdot 10^{56}$, $g \approx 10^{23} M_{\odot}$. Отже, «у сферичному світі Айнштайна» налічувалось би близько 1000 млрд. галактик. «Кругосвітню мандрівку» у такій моделі світловий промінь здійснив би за час близько 70 млрд. років. Така модель мала би узгоджуватися із *принципом Маха*, за яким інерція тіла нібито зумовлюється дією усієї речовини Всесвіту.

Буквально через два місяці після публікації статті Айнштайна з'явилася праця нідерландського астронома **Віллема де**

Сіттера (+1934), в якій було показано, що рівняння (6.1) із Λ -членом і тою самою формою для інтервалу ds^2 допускає ще один розв'язок, а саме $p = 0$ і $\rho = 0$. Йдеться про порожній статичний замкнений (як і в попередньому випадку) Всесвіт. У тій моделі привернули увагу учених три цікаві моменти. Передовсім, «реальна» швидкість світлового сигналу v_c залежить від відстані r фотона до початку координат, де перебуває Спостерігач:

$$v_c = c \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (6.4)$$

Тут, як і раніше, R – радіус кривини світу, що визначається формулою (6.2). Неважко зорієнтуватися, що, з погляду цього Спостерігача, світловий промінь з відстані $r = R$ до $r = 0$ буде рухатися нескінченно тривалий час. Звідси випливає: Спостерігач ніколи не зможе отримати інформацію про те, що робиться за відстанню $r \geq R$. Для нього сфера радіусом R буде *горизонтом*.

Виявилось також, що довжина хвилі λ , яку реєструє Спостерігач у точці $r = 0$, відрізняється від довжини хвилі λ_0 , яку випромінює джерело світла на відстані r , причому

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}} \quad (6.5)$$

Інакше кажучи, у моделі де Сіттера існує ефект червоного зміщення: тут при $r \rightarrow R, \lambda \rightarrow \infty$.

І нарешті, якщо в таку модель помістити декілька пробних матеріальних частинок, то вони будуть «розбігатися» одна від одної, причому відстань між ними буде зростати за експоненціальним законом

$$r = r_0 e^{At}, \quad (6.6)$$

де A – стала величина.

Беручи до уваги усі згадані тут ефекти, німецький математик **Герман Вейль** виявив (1923 р.), що з погляду Спостерігача довжина хвилі, випроміненої згаданою пробною частинкою, зміщується у червоний бік спектра на величину $\Delta\lambda$, так що

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = kr. \quad (6.7)$$

Тут r – відстань від спостерігача до джерела світла, k – деяка стала величина. Це була одна з багатьох спроб зіставити виявлене саме тоді червоне зміщення у спектрах декількох «туманностей» з теоретичними космологічними моделями. Адже дослідження спектрів інших галактик (тривалий час їх звали «позагалактичними туманностями») розпочав ще 1912 р. американський астроном **Вестон Слайфер** (+1969). До 1923 р. вже було відомо, що у 36-ти із 41-го об'єкта лінії у спектрах зміщені у червоний бік ($\Delta\lambda > 0$), а це мало б свідчити про рух цих об'єктів від нашої Галактики. Відповідно до ефекту Доплера

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

де v – радіальна складова швидкості ($v > 0$, коли об'єкт рухається від спостерігача). У космології прийнято позначення

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z,$$

так що $v = cz$.

Тоді ж **Едвін Габбл**, провадячи спостереження на 250-см рефлекторі обсерваторії Маунт Вілсон (США), переконливо довів, що згадані туманності є насправді велетенськими зоряними системами – іншими *галактиками*. Габбл розробив методи визначення відстаней до цих галактик, якщо в них можна було виділити окремі змінні або найяскравіші (інший метод) зорі. У 1929 р. він уже сформулював залежність між швидкістю руху галактики v (в км/с) та її відстанню r (в парсеках) від спостерігача у вигляді

$$v = Hr, \quad (6.8)$$

Тобто: швидкість галактики зростає прямо пропорційно відстані до неї. Коефіцієнт пропорційності H згодом було названо *сталюю Габбла*. Сам Габбл 1929 р. оцінив її числове значення в 500 км/с/Мпк.

За сучасними даними (про це мова далі), $H \cong 70$ км/с/Мпк. Варте уваги й те, що Габбл спостерігав галактики, для яких

червоне зміщення $z \leq 0,003$. У наш же час одна із найдальших відомих галактик (видима величина якої 30) має червоне зміщення $z = 10$.

Згадані статичні моделі зіграли позитивну роль у розвитку науки. Проте обидві вони були непридатними для зіставлення теорії зі спостереженнями. Перша з них не «забезпечувала» червоного зміщення у спектрах галактик, друга «неприродна» своєю порожнечою. Потрібна була *динамічна модель Всесвіту*. Саме вона пояснила б «розбігання» галактик, щодо якого після досліджень Габбла не могло бути жодних сумнівів.

Рівняння Фрідмана. Двома статтями – «Про кривину простору» (1922 р.) і «Про можливість світу зі сталою від'ємною кривиною» (1924 р.) **О.О. Фрідман** започаткував дослідження *нестатичних моделей* Всесвіту. Вони стали важливим етапом у розвитку релятивістської космології.

Після певних сумнівів Айнштайн визнав: «Я вважаю результати пана Фрідмана правильними й вичерпними. У 1931 р., коли теорія динамічного Всесвіту набувала дедалі більшого визнання, Айнштайн сказав і так: «Першим... на цей шлях ступив Фрідман».

Другим був бельгійський астроном **Жорж Леметр**, який упродовж декількох років займався аналізом моделі де Сіттера, зокрема проблемою червоного зміщення. Його стаття (1927 р.) мала назву: «Однорідний Всесвіт зі сталою масою і зростаючим радіусом, що пояснює радіальні швидкості позагалактичних туманностей».

Але якщо радіус світу зростає, то його розширення почалося з моменту, коли речовина була стиснена до величезних густин! Леметр сміливо таке припускає, надаючи станові високої концентрації речовини назву «первісного атома». Він писав: «Слово «атом» належить тут розуміти в його первісному, грецькому значенні. Атом є чимось таким простим, що нічого про нього не можна розповісти, ні поставити щодо нього жодного питання. Маємо тут цілком недосяжний початок. Лише коли атом розпався на велику кількість фрагментів, заповнюючи простір малого, але не рівного точно нулеві, радіуса, фізичні поняття по-

чали набувати значення». Йдеться, отже, про вихід Всесвіту із *сингулярного* стану (стану надвисоких густин речовини).

Розглянемо рівняння, якими описуються нестатичні космологічні моделі. Важливим моментом тут є запровадження *супутніх координат*: просторові координати представляються у вигляді сітки, вузли якої пов'язані з частинками речовини (наприклад з галактиками), і *рухаються разом із ними*. Завдяки цьому істотно спрощується вираз для тензора імпульсу – енергії, бо тут компоненти швидкості – $U_4 = 1$, $U_1=U_2=U_3=0$. Інтервал ds тут звичайно приймається у вигляді

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{\left[1 + \frac{k(x^2 + y^2 + z^2)}{4}\right]^2}, \quad (6.9)$$

де x , y і z – звичайні декартові координати. Відповідно у сферичних координатах ξ , Θ і ϕ інтервал записують так

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \frac{d\xi^2 + \xi^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)}{\left[1 + \frac{k\xi^2}{4}\right]^2}, \quad (6.10)$$

В обох випадках другий доданок визначає квадрат елемента довжини тривимірного простору. Величину $R(t)$ називають *радіусом кривини простору*. Тут приймається, що її числове значення з часом змінюється: $R=R(t)!$ Однак у кожен момент часу t , в усіх точках простору воно є однаковим. Якщо, далі, $k=0$, то простір буде *евклідовим*, випадок $k = +1$ відповідає просторові додатньої кривини (*замкнений Всесвіт*), при $k = -1$ реалізується простір *від'ємної кривини*.

Тепер пригадаємо дві обставини. Перша – це те, що відповідно до космологічного принципу Всесвіт однорідний, а отже, початок координат у ньому можна обрати у будь-якій точці. Друге – що координати ξ є супутніми, отже, їх раз обрані (у даній системі координат) значення не змінюються з часом. Коли ж різниця супутніх координат між двома близькими точками становить $d\xi$, то це значення зберігатиметься і за довільних значень t . Увівши систему координат з центром в одній з цих

точок (тоді $\xi = 0!$), знаходимо з (6.10), що відстань між двома близькими точками змінюється з часом за законом

$$dr = R(t)d\xi. \quad (6.11)$$

Тому величину R прийнято називати також *масштабним фактором*. У кривому просторі ($k = \pm 1$) він рівний радіусові кривини простору, який є «природним масштабом для виміру усіх довжин». У плоскому просторі ($k = 0$) його значення відоме з точністю до довільного числового множника.

Побудова космологічної моделі чималою мірою і зводиться до з'ясування того, як за конкретних умов – тиску p , густині ρ і значенні параметра Λ – масштабний фактор (кривина простору) R змінюється з часом, тобто як залежить від часу відстань між двома близькими точками.

Покладемо, що в заданий момент космологічного часу t_0 (момент спостережень) відстань між двома близькими точками (галактиками) становила r_0 . В інший момент вона, очевидно, буде рівною

$$r = R(t)r_0. \quad (6.12)$$

За проміжок часу dt відстань зросла на $dr = r_0 dR$. Поділивши приріст відстані dr на dt , знаходимо швидкість взаємного віддалення точок

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{dR}{dt} r_0 = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} r. \quad (6.13)$$

Отже, з точністю до позначень цей вираз збігається зі співвідношенням Габбла (6.9), причому стала Габбла

$$H = \frac{1}{R(t)} \frac{dR}{dt} = \frac{\dot{R}}{R}, \quad (6.14)$$

де введено позначення $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$.

Звідси випливає, що стала Габбла у заданий момент космологічного часу однакова в усіх точках спостережуваного Всесвіту, проте її числове значення може змінюватися з часом.

Взаємне віддалення (або зближення) точок може бути пришвидшеним або сповільненим. Тому крім швидкості зміни параметра R запроваджують ще й прискорення

$$a = \frac{dv}{dr} = \frac{d^2r}{dt^2} = \ddot{R}r_0$$

У теорії зручніше користуватися безрозмірним параметром прискорення q , який є простою комбінацією величин R , \dot{R} та \ddot{R} :

$$q = -\frac{R\ddot{R}}{\dot{R}^2}, \quad (6.15)$$

причому значення параметра q на сучасний момент позначається індексом 0 (q_0). На підставі заданої форми для інтервалу (6.10) та обчислених компонент тензора Річчі рівняння (6.1) зводяться до системи двох диференціальних рівнянь, які пов'язують між собою швидкість і прискорення зміни радіуса кривини R залежно від інших параметрів моделі:

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{2\ddot{R}}{R} + \frac{8\pi G\rho}{c^2} = -\frac{kc^2}{R^2} + \Lambda c^2, \quad (6.16)$$

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{R^2} + \frac{1}{3}\Lambda c^2.$$

Це й є *рівняння Фрідмана*. Як і раніше, можна покласти, що, починаючи з певного етапу в розширенні Всесвіту, тиск $p = 0$. Тоді з системи (6.16) випливають такі співвідношення:

$$\rho = \frac{B}{R^3}, \quad (B = \text{const}), \quad (6.17a)$$

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi GB}{3R} - kc^2 + \frac{1}{3}c^2\Lambda R^2. \quad (6.17b)$$

Останнє рівняння й дає змогу дослідити зміну радіуса кривини тої або тої моделі з часом. Щоправда, в рівняння входять параметри Λ і k , значення яких наперед невідомі. Тому доцільно піти таким шляхом. Підставимо співвідношення (6.14) і (6.15) в систему (6.16) і знайдемо взаємозв'язок параметрів ρ , Λ і k з параметрами H і q_0 , які (принаймні теоретично) впливають зі спостережень. Виключаючи послідовно q_0 , потім ρ , знаходимо у випадку $p = 0$ такі співвідношення:

$$\frac{kc^2}{R^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho - H^2 + \frac{1}{3}\Lambda c^2, \quad (6.18a)$$

$$\frac{kc^2}{R^2} = (2q_0 - 1)H^2 + \Lambda c^2 \quad (6.18б)$$

Розглянемо детальніше випадок $\Lambda = 0$. З рівняння (6.18а) випливає, що $k > 0$ (закритий, тобто замкнений Всесвіт) «реалізується», якщо $\frac{8\pi G}{3}\rho > H^2$, тобто якщо густина речовини у Всесвіті більша від деякого «критичного» значення:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (6.19)$$

При $\rho = \rho_{кр}$ маємо $k = 0$ – евклідовий простір, якщо ж $\rho < \rho_{кр}$, то $k < 0$ – відкритий простір Лобачевського. За наявними сьогодні даними (див. далі), очевидно, «реалізується» саме випадок $\rho = \rho_{кр}$ і в цьому проявляється певна закономірність розвитку Всесвіту.

У рамках класичної теорії. Як виявилось, рівняння типу (6.17) можна отримати й шляхом елементарних міркувань у рамках класичної теорії (Е.Мілн, 1935 р)..

Розглянемо велетенську однорідну хмару, що має густину ρ . На відстані R від центра хмари, скажімо на поверхні сфери радіуса R , виділимо «пробну частинку» масою m . Як довів **Ньютон**, сила притягання, що діє на цю частинку, визначається масою, що міститься всередині сфери радіуса R :

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho. \quad (6.20)$$

Сила тяжіння діє так, ніби вся ця маса сконцентрована у центрі хмари. Притягання ж пробної маси з боку окремих елементів зовнішнього шару (коли поза пробною масою ще є речовина) взаємно зрівноважується і ніякої ролі не грає. Таке позначення відстані частинки до центра хмари робить рівняння, яким описується рух частинки, зовні цілком подібним до (6.17).

Уявімо тепер, що частинка m рухається від хмари зі швидкістю v , причому на заданій відстані R_0 від центра сфери та швидкість була рівна v_0 . У процесі руху повна енергія частинки W , що дорівнює сумі енергії кінетичної $W_k = \frac{Mv^2}{2}$ та потен-

ціальної $w_p = \frac{Mm}{R}$, зберігається. Позначимо далі через ε повну енергію в розрахунку на одиницю маси частинки. Тоді закон збереження енергії частинки набуде вигляду

$$\varepsilon = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{R} = \frac{v_0^2}{2} - \frac{GM}{R_0} = \text{const},$$

або

$$v^2 = \frac{2Gm}{R} + 2\varepsilon = \frac{2Gm}{R} + v_0^2 - \frac{2Gm}{R_0}$$

Узявши до уваги, що $v = \frac{dR}{dt}$ і що маса M пов'язана з густиною ρ співвідношенням (6.20), знаходимо таке рівняння:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} R^2 \rho + 2\varepsilon, \quad (6.21)$$

або в дещо іншій формі

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2GM}{R} + v_0^2 - \frac{2GM}{R_0} \quad (6.21a)$$

З цього рівняння випливають такі висновки. Якщо кінетична енергія більша від потенціальної (повна енергія $\varepsilon > 0$), то пробна частинка рухатиметься від центра до нескінченності. У протилежному випадку (при $\varepsilon < 0$) на деякій відстані

$$R_m = \frac{GM}{|\varepsilon|}$$

швидкість частинки стає рівна нулеві. Незавжно зорієнтуватися, що рівняння (6.21) практично збігається з уже записаним раніше співвідношенням (6.17). Так висновуємо, що те останнє й виражає собою закон збереження енергії.

Поки що тут нічого не говорилося про природу згаданої хмари. Нею може бути й частина світу галактик, доступного для спостережень. Звичайно, у Всесвіті будь-яка точка рівноправна і якогось виділеного «центра» немає. Проте всі спостереження ми провадимо з Землі, з нашої Галактики, відносно якої й визначаємо швидкості інших галактик. Тому опишемо уявно навколо

нашої Галактики сферу радіусом R і розглянемо, як буде рухатися «пробна частинка» – галактика, що міститься на відстані R від Землі. За законом Габбла, вона віддаляється від нас зі швидкістю $v = HR$. Підставляючи це значення швидкості в (6.21), знаходимо

$$\frac{8\pi G}{3} \left(\frac{3H^2}{8\pi G} - \rho \right) R^2 = 2\varepsilon. \quad (6.22)$$

Тут ρ – середня густина речовини у сфері радіуса R . Вона дорівнює масі усіх галактик, які перебувають усередині сфери, поділеній на її об'єм $V = \frac{4}{3}\pi R^3$.

Напрошується висновок про те, що можна ввести деяке «критичне» значення густини. Це й було зроблено раніше за допомогою формули (6.19), що дає змогу переписати останнє співвідношення в такому вигляді:

$$\frac{8\pi G}{3} (\rho_{кр} - \rho) R^2 = 2\varepsilon. \quad (6.23)$$

Тепер стає очевидним, що як тільки середня густина речовини у сфері радіуса R менша від критичної ($\rho < \rho_{кр}$), то повна енергія ε додатня ($\varepsilon > 0$) і рух частинки (розширення системи галактик) продовжуватиметься необмежено. Якщо ж $\rho > \rho_{кр}$, то $\varepsilon < 0$. У такому випадку, досягнувши найбільшого віддалення, галактики почнуть зближуватися.

Тепер звернімо увагу на рівняння (6.21а). Конкретне значення швидкості v_0 відповідає певній відстані R : $v_0 = HR_0$. Тому це співвідношення переписуємо ще й так:

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{GR_0^3 \rho_0}{R} - \frac{8\pi}{3} GR^2 \left(\rho - \frac{3H^2}{8\pi G} \right). \quad (6.24)$$

Це рівняння, залежно від величини ρ , і визначає тип космологічної моделі, якщо тільки $\Lambda = 0$. Цікаво, що певні характеристики таких моделей можна отримати, й не вдаючись до його розв'язування (яке досягається шляхом інтегрування). Міркуємо так. Спостереження вказують на те, що галактики рухаються «від нас». Отже, відстані до них з часом зростають:

$$\frac{dR}{dt} > 0.$$

У минулому ж відстань до певної галактики була набагато менша. Але чим менше R , тим більшою буде у формулі (6.24) роль першого доданка. Це означає також, що в минулому (при $R \approx 0$) величина $\frac{dR}{dt}$ була дуже великою. Формально знаходимо, що в певний момент часу (цей момент зручно прийняти за початок відліку часу $t = 0$, а отже, скажемо, « t_0 секунд тому») при $t = 0$ було таке:

$$R=0, \quad \left. \frac{dR}{dt} \right|_{t=0} = +\infty!$$

Інакше кажучи, розширення почалося раптово, а «моментальні» швидкості руху в той «початковий» момент часу мали б бути нескінченно великими. Через те, річ ясна, виникає безліч запитань.

Таким чином, уже з основних співвідношень класичної фізики впливають певні розв'язки, якими можна описати деякі динамічні моделі Всесвіту. Щоправда, такі розв'язки було отримано, сказати б, «заднім числом», через десять років після публікації праць **О.О.Фрідмана**. Проте вони мають неабияке пізнавальне значення.

У 30-х роках ХХ ст. формально – інтегруванням системи рівнянь (6.16) – було збудовано близько 20 космологічних моделей. Вони описані, зокрема у нашій «Релятивістській астрономії». «Багата на видумки» Природа, як уявляємо сьогодні, послідовно скомбінувала принаймні три, якими й описуємо розвиток нашого Всесвіту. Про це – у §9.

7. Спостережні дані. Діаграма Габбла

Сталою Габбла визначаються масштаби навколишнього Всесвіту, середня густина речовини в ньому. Однак, назвавши величину H «сталою», астрономи упродовж 40 років то зменшували її числове значення в десять разів, то збільшували в півтора раза. Відповідно стверджували, що «вік Всесвіту» рівний то 2 млрд. років, то 20, тепер – 14 млрд. років.

У своїй праці Габбл допустив декілька помилок. Передовсім відстані до галактик Місцевої системи (сюди входить наша Галактика, туманність Андромеди і ще близько 28 інших галактик), де йому вдалося виявити пульсуючі зорі – цефеїди, Габбл визначав на основі залежності період – світність. Згодом було доведено, що цефеїди насправді яскравіші, ніж приймалося раніше. По-друге, у всіх дальших галактиках Габбл вишукував найяскравіші зорі і порівнював їхній блиск із такими ж об'єктами галактик Місцевої системи. Але, як виявилось, в далеких галактиках Габбл ототожнював не зорі, а зони іонізованого водню, які утворюються навколо зір ранніх спектральних класів і які насправді набагато яскравіші.

Тепер відстані до ближчих галактик визначають ще й шляхом виділення в них кулястих зоряних скупчень. Приймається, що найяскравіші з них цілком подібні до таких же об'єктів з нашої Галактики. Далекі галактики об'єднуються у *скупчення галактик*. То ж приймається, що найяскравіша еліптична галактика в кожному такому скупченні має однакову світність і є «стандартною свічкою», або «світловим еталоном».

Але: наскільки світло від цих об'єктів послаблюється у міжгалактичному середовищі та в нашій Галактиці? Поправку *A* визначили складними міркуваннями й спостереженнями. Далі: фотографічним або фотоелектричним методом спостерігач реєструє не повний потік енергії від тої чи іншої галактики, а лише його частину – потік у певній ділянці спектра. Але зі зростанням червоного зміщення z усі довжини хвиль (а отже, і ті, в яких цей об'єкт висвічує найбільше енергії) зсуваються у червоний бік спектра, де чутливість приймача істотно зменшується, і тому далека галактика буде здаватися слабкіша, ніж насправді. Цей ефект і враховують за допомогою *K-поправки*, яка «зводить» усі спостереження до одної ділянки спектра.

І ще один ефект. Кожну галактику ми бачимо не такою, якою вона є сьогодні, а якою була мільйони (для найближчих об'єктів), десятки і сотні мільйонів років тому. Тобто – порівнюють об'єкти різного віку! Тож, виходячи з уявлень про еволюцію зір, необхідно розрахувати, наскільки світність галак-

тики із заданим значенням z відрізняється від світності «стандартної свічки» з найближчих до нас околиць.

Як знаємо, абсолютна величина зорі (чи галактики) M та її видима величина m пов'язані співвідношенням:

$$m = M + 5lgr - 5, \quad (7.1)$$

тут r вимірюється у парсеках.

При визначенні відстаней до галактик приймають, що в кожному їх скупченні «стандартна свічка» має однакову світність L , тобто однакову абсолютну величину M . Тим самим, як видно з формули (7.1), відстань до того чи іншого об'єкта пропорційна його видимій величині m (з урахуванням поправок A і K), яку знаходять безпосередньо зі спостережень. З другого ж боку, відстань r до галактики пов'язана з її червоним зміщенням z співвідношенням Габбла (6.8), так що $r = \frac{v}{H} = \frac{cz}{H}$. Так отримують взаємозв'язок між двома характеристиками «стандартної свічки» m і z , що їх безпосередньо можна знайти зі спостережень

$$m = 5lgc z - 5l g H + M - 5, \quad (7.2)$$

де M – абсолютна величина кулястого скупчення або найяскравішої еліптичної галактики (в останньому випадку на момент випромінювання світла).

Річ ясна, якби видима та абсолютна величини якоїсь галактики були встановлені з достатньою точністю, то для визначення сталої Габбла досить було б виміряти червоне зміщення лише одної цієї галактики. Насправді ж визначення видимої величини m галактики пов'язане з чималими труднощами. Немає також упевненості в тому, що всі найяскравіші галактики в галактичних скупченнях мають однакову абсолютну величину M . Тому сталу Габбла знаходять як деяке середнє значення на підставі даних про десятки й сотні галактик.

Стає наглядним і джерело помилок Габбла: він підставляв у формулу (7.2) применшені значення абсолютних величин M цефеїд (у випадку найближчих галактик) і «найяскравіших зір» – зон іонізації водню.

Намагаючись бути якомога точнішим на кожній «сходинці» таких досліджень, **Елан Сендідж** (США) 1968 р. дійшов висновку, що стала Габбла $H = 75,3 \pm 17$ км/с/Мпк. У 1970 р. **Дж. де Вокульор** (Франція) на підставі не менш обґрунтованих міркувань (беручи, щоправда, до уваги групи інших об'єктів) отримав $H \approx 50$ км/с/Мпк. На той час можна було вважати, що значення сталої Габбла встановлено з точністю $\pm 50\%$.

Однак формулу (7.2) можна застосовувати лише при малих z . При її виведенні використовується закон, за яким освітленість одиниці поверхні E змінюється обернено пропорціонально квадрату відстані до джерела світла:

$$E = \frac{L}{4\pi D^2}, \quad (7.3)$$

причому D прийнято називати *фотометричною відстанню*. При невеликих відстанях величина D рівна геометричній відстані r . У розширеному ж Всесвіті все набагато складніше. Тут освітленість E змінюється не лише з геометричних причин. Освітленість одиниці поверхні зменшується також за рахунок зменшення числа квантів, які досягають спостерігача за одиницю часу (так званий *ефект числа*), і за рахунок зменшення енергії кожного кванта (*ефект енергії*).

Справді, нехай від якоїсь галактики в момент часу t_1 відходять два світлові імпульси, розділені інтервалом часу Δt_1 . Спостерігач зафіксує їх у момент часу t_0 розділеними в часі на величину Δt_0 , причому з теорії випливає, що

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = \frac{R(t_1)}{R(t_0)}. \quad (7.4)$$

Якщо Всесвіт розширюється, то $R(t_0) > R(t_1)$, а тому $\Delta t_0 > \Delta t_1$. *Ефект числа* можна пояснити й так. Хай упродовж часу $\Delta t_1 = 1$ с галактика випромінює певне число квантів. У процесі їх проходження через простір, який розширюється, цей «пакет» наче розтягується в часі. Тому спостерігач за одну секунду зареєструє в $(1 + z)$ менше число квантів. Коли ж під часом Δt_1 і Δt_0 розуміти період електромагнітної хвилі $T = \lambda/c$, то довжина хвилі λ_1 , яку випромінює джерело в

момент t_1 , пов'язана з довжиною хвилі λ_0 , зареєстрованою спостерігачем у момент часу t_0 :

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = 1 + z = \frac{R(t_0)}{R(t_1)}, \quad (7.5)$$

де $\lambda_0 = \lambda_1 + \Delta \lambda$. Із співвідношення (7.5) і випливає висновок, що внаслідок червоного зміщення енергія кожного кванта, який випромінюється далекою галактикою, також зменшується в $(1+z)$ разів.

Тому з урахуванням обох ефектів замість (7.3) маємо зв'язок освітленості E з відстанню r у вигляді

$$E_0 = \frac{L_1}{4\pi r^2 (t_0)(1+z)^2}, \quad (7.6)$$

тут L_1 – світність об'єкта в момент випромінювання енергії. Звідси знаходимо зв'язок між фотометричною відстанню об'єкта D та його метричною відстанню r : $D = r(1+z)$.

Обидва згадані ефекти й необхідно враховувати, виводячи співвідношення між видимою величиною галактики m та її абсолютною величиною M . Це дає змогу отримати залежність типу (7.2), до якої входить і така важлива характеристика космологічної моделі, як параметр прискорення:

$$m = 5 \lg \frac{1}{q_0} \left[q_0 z + (q_0 - 1) \sqrt{1 + 2q_0 z} - 1 \right] + C, \quad (7.7)$$

де $C = M_1 - 5 \lg H - 45$.

Залежність $m - z$ (діаграма Габбла) для найяскравіших еліптичних галактик у скупченнях показана на рис 7.1, де позначено також криві, що відповідають різним значенням параметра прискорення q_0 . Як бачимо, визначити зі спостережень величину q_0 дуже важко: помилки у встановленні блиску найдальших з досліджених тоді галактик (для яких $z \approx 0.5$) усього на $0^m,3$ відповідають зміні q_0 приблизно на одиницю! За Сендіджем, найімовірніше значення параметра прискорення становить $q_0 = 0,96 \pm 0,4$. На той час, 30 років тому, зроблено висновок, що Природа «реалізувала» замкнену пульсуючу модель.

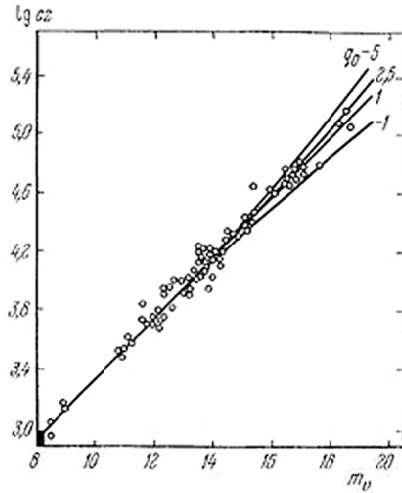


Рис 7.1. Залежність видимої величини m – червоне зміщення z (діаграма Габбла) для найбільш яскравих, еліптичних галактик і теоретичні залежності $m - z$ для декількох значень параметра прискорення q_0 .

Проте неясною була роль еволюційного фактора, щодо якого серед астрономів не було єдності. За одними обрахунками, світність галактики зростає приблизно на 5% за кожен мільярд років, за іншими ж, вона за той самий час зменшується на 10%. І це останнє приводило б до зменшення параметра q_0 майже на одиницю порівняно з оцінками, отриманими без поправки на еволюцію!

До початку 90-х років ХХ ст. було визначено червоне зміщення у спектрах близько 2 000 галактик, для яких $z \leq 0,94$. Певний час здавалося, що надійніші дані щодо параметра q_0 (а через те – і про модель Всесвіту) можна буде отримати за допомогою квазарів, червоні зміщення яких сягають $z \approx 3,0$. Але це не так. Якщо в найяскравіших галактиках «різнобій» світностей становить $0^m,3$, то в квазарів він сягає $3^m,0$, тобто ці об'єкти різняться між собою потужностями у 10–20 разів. На діаграмі Габбла вони утворюють «рій», що міститься над залежністю $m - z$ для галактик.

Однак безпосереднє визначення середньої густини речовини у Всесвіті на той час не дало чіткої відповіді на питання, якою саме моделлю описується розширення Всесвіту... Бо, зо-

крема, значна частина цієї речовини перебуває у «прихованому» стані. А ще – бо динаміка Всесвіту є істотно складнішою!

Фотометричні ефекти. Обрати космологічну модель, як гадали, мало б допомогти зіставлення червоних зміщень z з кутовим діаметром галактик θ . З теорії випливає, що кутові розміри галактик пов'язані з їхніми відстанями залежністю

$$\theta = a \frac{1+z}{r} = a \frac{(1+z)^2}{D} \quad (7.8)$$

Тут a – діаметр галактики, а кут θ вимірюється у радіанах. Спочатку, при малих z , кутовий діаметр об'єкта з відстанню зменшується, досягає мінімального значення, після чого починає зростати необмежено.

Але, як встановив **Я.Б.Зельдович**, співвідношення (7.8) виконується лише тоді, коли речовина у Всесвіті розподілена рівномірно. Якщо ж більша її частина сконцентрована в галактиках, то зв'язок кутових діаметрів з червоним зміщенням дещо інакший. Зокрема, зі зростанням z величина θ взагалі може не досягати мінімальних значень.

Кутові діаметри, про які йшлося, прийнято називати *метричними*. Під час фотографічних спостережень визначають *ізофотні діаметри*: вимірюють відстані між діаметрально протилежними точками зображення галактики, в яких її яскравість зменшується в задане число разів (наприклад, у 4 рази) порівняно з яскравістю центра галактики. Як випливає з теорії, ізофотні діаметри з ростом z неперервно зменшуються, наближаючись до нуля при $z \rightarrow \infty$. Проте характер такої зміни певним чином залежить від типу космологічної моделі. Так, на відстані $z \approx 0,6$ ізофотний діаметр галактики при $q_0 = +1$ приблизно в 1,2 раза більший, ніж при $q_0 = 0$, і в 1,6 раза більший, ніж при $q_0 = -1$. За подальшого збільшення z різниця у величині ізофотних діаметрів істотно зростає. Такі виміри перебувають практично на грані можливостей сучасних найпотужніших телескопів.

Вище було згадано фотометричний парадокс, який неминуче виникає за екстраполяції законів класичної фізики на весь нескінченний Всесвіт. У релятивістській астрономії завдяки ефекту червоного зміщення той парадокс усувається.

Справді, як видно з формули (7.6), величина потоку енергії від далеких галактик зменшується не лише внаслідок зростання відстані, а й за рахунок червоного зміщення z . Тому врешті-решт від усіх світил і галактик на одиничну площадку на Землі за одиницю часу приходить цілком скінченна кількість енергії

$$F = \frac{2\pi}{3} \frac{c}{H} NL, \quad (7.9)$$

де c – швидкість світла, H – стала Габбла, N – середнє число зір в одиниці об'єму, L – середня світність одної зорі. Усе відбувається так, ніби ми приймаємо світлову енергію не з нескінченного Всесвіту, а зі світу галактик, радіус якого $r \approx 6$ млрд. світлових років. При цьому половину усієї енергії привносять галактики, видима величина яких яскравіша 21^m , другу половину дають усі інші слабші об'єкти.

Без урахування червоного зміщення у спектрах галактик замість формули (6.50) матимемо такий вираз для величини потоку енергії:

$$F = 2\pi N L r, \quad (7.10)$$

де r – радіус сфери, з якої до Землі приходить випромінювання. При $r \rightarrow \infty$ маємо також $F \rightarrow \infty$.

Першим і найважливішим в астрономії завжди було і є *питання про відстані* до тих чи інших об'єктів. В космології воно – подвійне: 1) Якою, є ця відстань? 2) Як вона змінюється з часом? Бо ж це друге визначає **тип космологічної моделі** (підтверджує або заперечує певну теорію).

На близьких відстанях у нашій Галактиці цілком надійним (і «наглядним») є метод вимірювання *річних паралаксів* об'єктів з використанням простого тригонометричного співвідношення. Тут йдеться про зміщення близької зорі, обумовлене рухом Землі навколо Сонця. Отож до 90-х років ХХ ст. цим методом вдалося визначити відстані до близько 10 000 зір в околі менше 500 св. років – для одної із кожних 15 млн. зір Галактики. Істотно підвищено результат після запуску в 1989 р. *космічної обсерваторії Гіннаркос*: за її допомогою встановлено відстані до 120 000 зір в околі 3000 св. років.

Маючи цю надійну основу, астрономи розробили близько десяти різних методів встановлення відстаней до все дальших об'єктів Всесвіту, серед яких – із використанням *залежності період-світність* для пульсуючих *зір-цефеїд*. А це, у свою чергу, дало змогу обґрунтувати **метод «типового представника»** – об'єкта з певним набором характеристик, зокрема потужності, тобто – світності L , і таким чином вважати його стандартом чи **стандартною свічкою**.

В якості таких свічок виступили найяскравіші, у кожному скупченні галактик, об'єкти – еліптичні галактики, тут беруть до уваги їх «вигляд» і кутові розміри. Але головними орієнтирами тут стали **Наднові як «стандартні свічки»**. *Питання про відстані* до тих чи інших об'єктів в космології – подвійне: 1) Якою, є ця відстань? 2) Як вона змінюється з часом? Бо ж це друге визначає **тип космологічної моделі** (підтверджує або заперечує певну теорію).

Найпотужнішими стандартними «свічками», які можна спостерігати на відстанях у мільярди світлових років, є **Наднові типу Ia (SNIa)**.

Із двох типів спалахуючих «наднових» зір перший виділяється тим, що в спектрах цих зір немає ліній водню; у підгрупі Ia головними лініями у спектрі є лінії заліза, тоді як в Ib – лінії кисню. Усі SNI мають однакові криві блиску (рис. 7.2.), тоді як у наднових типу SNIІ вони «розмаїті». Вважають, що спалах зорі SNI – це термоядерний вибух білого карлика, маса якого сягає 1,5 маси Сонця і який є компонентом подвійної системи, (але можливо – це поодинокa зоря і тоді її маса становить 3 – 8 M_{\odot}). Енергія, що виділяється при такому вибуху, сягає $2 \cdot 10^{47}$ Дж. І цей об'єкт *упродовж тижня* є майже таким яскравим, як уся галактика, де він перебуває.

Якраз важливим є те, що всі наднові типу Ia мають однакові криві блиску і однакові за потужністю. Завдяки цьому їх і використовують в якості «стандартних свічок» при з'ясуванні особливостей розширення Всесвіту, інакше кажучи – для вибору тої чи іншої космологічної моделі, про які мова нижче.

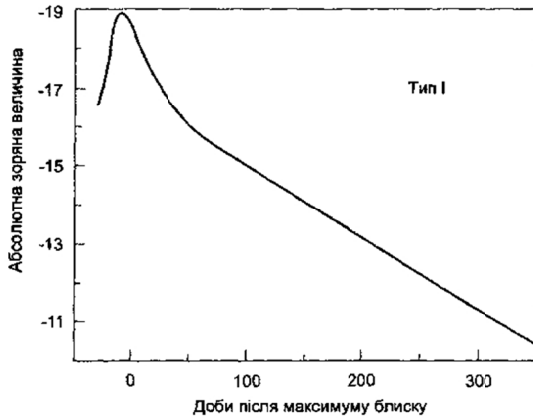


Рис. 7.2. Крива блиску наднової Ia. Абсолютна зоряна величина M (відкладена по вертикалі) пов'язана із потужністю (світністю) зорі L співвідношенням $\lg L = 0,4 (4,72 - M)$ і, отже при $M = -19$ маємо: $L \approx 3,1 \cdot 10^9 L_{\odot}$, де L_{\odot} – світність Сонця.

У випадку ж, коли ця наднова рухається від нас і її $z \approx 0,5$, тривалість максимуму блиску вже становитиме три тижні, при $z \approx 1$ – чотири тижні. **В цілому всебічне дослідження і дає змогу побудувати залежність «відносна яскравість SN – її червоне зміщення»** (рис.7.3).

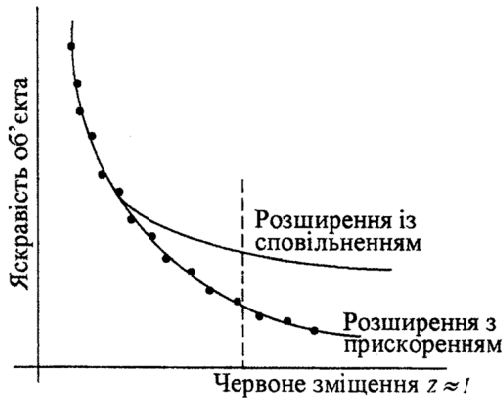


Рис. 7.3. Залежність яскравості об'єкта (галактики) від червоного зміщення: лінії – теорія, точки – спостереження

З 2002 р. на орбітальному телескопі «Габбл» працює камера для дослідження далеких наднових – Advanced Camera for Surveys. З цією ж метою буде здійснено запуск у США 2-метрового орбітального телескопа для реалізації програми IDEM (Joint Dark Energy Mission): за допомогою ширококутних камер стане можливим виявляти уже не десятки (як дотепер), а тисячі SNIa!

8. Гравітаційний радіус. Феномен чорної діри

Гравітаційний радіус тіла. «З усіх вимислів людського розуму, від однорогів і химер до водневої бомби, мабуть, найфантастичніший – це образ *чорної діри*, відділеної від решти простору певною межею, яку ніщо не може перетяти; діри, яка має настільки сильне гравітаційне поле, що навіть світло затримується його мертвою хваткою; діри, яка викривлює простір і гальмує час. Як однороги та химери, чорна діра здається більш придатною для фантастичних романів або навіть легенд давнини, ніж для реального Всесвіту. А проте закони сучасної фізики фактично вимагають, щоб чорні діри існували. Можливо, тільки наша Галактика містить мільйони їх...»

Так висловився про чорні діри фізик **К. Торн** (США). Можливість існування цих екзотичних об'єктів впливає із загальної теорії відносності. Зі іншого боку, чорні діри мали б бути логічним завершенням розвитку зір, маси яких у декілька разів перевищують масу Сонця.

Розповідь про чорні діри почнемо від обговорення зовнішнього розв'язку Шварцшільда. Інакше кажучи, розглянемо властивості простору-часу поблизу маси M . Сумістимо початок сферичної системи координат r, θ, ϕ з її центром. Очевидно, що в околі маси M , яку розглядаємо як матеріальну точку, «реалізується» *статичний* центральносиметричний простір – час. Це означає, що компоненти g_{ik} можуть бути функціями лише відстані від центра маси і не залежать від часу t . Далі, на чималій відстані від маси M отриманий розв'язок повинен давати той же результат, що й теорія тяжіння Ньютона. На нескінченності (при $r \rightarrow \infty$) шуканий

вираз для інтервалу ds^2 мав би описувати простір – час Мінковського, для якого форма інтервалу ds^2 у сферичних координатах має вигляд

$$ds^2 = -[dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi)] + c^2 dt \quad (8.1)$$

Тут у квадратних дужках – квадрат відстані між двома близькими точками тривимірного простору.

При розв’язанні поставленої задачі Шварцшільд прийняв таку загальну форму інтервалу:

$$ds^2 = -[e^\alpha dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi)] + e^\beta c^2 dt \quad (8.2)$$

де α і β – певні функції r . Тим самим компонентам фундаментального метричного тензора було надано значень $g_{11} = -e^\alpha$, $g_{22} = -r^2$, $g_{33} = -r^2 \sin^2\theta$, $g_{44} = e^\beta$ та $g_{ik} = 0$, якщо $i \neq k$. Обрахувавши компоненти тензора Річчі, Шварцшільд звів рівняння (4.4) до трьох диференціальних рівнянь, з яких і випливають розв’язки для функцій α і β , так що

$$-g_{11} = e^\alpha = \left(1 - \frac{R_g}{r}\right)^{-1}; \quad g_{44} = e^\beta = 1 - \frac{R_g}{r},$$

а вираз для інтервалу ds^2 в околі гравітуючої маси M набирає вигляду

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1 - \frac{R_g}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta + \left(1 - \frac{R_g}{r}\right) dt^2 \quad (8.2')$$

Величину

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (8.3)$$

прийнято називати *гравітаційним радіусом тіла*, а сферу радіуса R_g , описану навколо центра точкової маси M , – *сферою Шварцшільда*.

Як бачимо, у просторі поза ($r > R_g$) і всередині ($r < R_g$) сфери Шварцшільда знаки компонентів фундаментального метричного тензора – g_{11} та g_{44} відповідно змінюються. З наближенням до поверхні сфери «ззовні» (при $r \rightarrow R_g$), зокрема, $g_{44} \rightarrow 0$. Все це й зумовлює існування чорних дір як справді екзотичних об’єктів.

Нехай із двох спостерігачів один перебуває недалеко від сфери Шварцшільда ($r_1 \geq R_g$), другий – на чималій відстані від неї ($r_2 \gg R_g$). Перший з них описуватиме події, користуючись метрикою у формі (8.2), другий – метрикою (8.1). Позначимо через $d\tau$ інтервал часу між двома подіями, що трапилися на відстані r_1 від центра сфери Шварцшільда. Нехай, для конкретності, це буде проміжок часу між двома сигналами, які спостерігач 1 передає спостерігачеві 2. Останній встановить, що сигнали розділені інтервалом часу dt . Як і за випадку із двома спостерігачами при обговоренні ефектів спеціальної теорії відносності, час τ звать *власним* часом, час t – *координатним*.

Оскільки геометричні координати обох спостерігачів (за припущенням) залишаються незмінними ($dr, d\varphi, d\theta = 0$), то з (8.1) та (8.2) випливає співвідношення: $dt = \sqrt{g_{44}} d\tau$, або ж

$$d\tau = \frac{dt}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}} \quad (8.4)$$

Отже, якщо відстань r до центра маси M істотно перевищує її гравітаційний радіус R_g , то $dt = d\tau$ – власний час збігається з координатним. Якщо ж $r \rightarrow R_g$, то при будь-якому конкретному інтервалі власного часу $d\tau$ маємо $dt \rightarrow \infty$. Так, наприклад, коли уявний спостерігач подає світлові імпульси з інтервалом $1c$, то для спостерігача 2, що перебуває далеко від маси M , ці імпульси розділені вічністю...

Під інтервалом часу $d\tau$ можна розуміти і період електромагнітної хвилі $T = \frac{1}{\nu}$. У цьому випадку з (8.4) випливає, що довжина хвилі λ , реєстрована спостерігачем «на нескінченності», буде більша за довжину хвилі λ_0 , яку випромінює атом на відстані r від центра маси M , так що

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}} \quad (8.5)$$

і при $r \rightarrow R_g$ маємо $\lambda \rightarrow \infty$. Якщо ж $R_g \ll r$, то, розкладаючи вираз у знаменнику в ряд $\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{GM}{c^2 r}$, зводимо співвідношення (8.5) до вигляду (4.8).

Це той самий ефект червоного зміщення довжин хвиль поблизу гравітуючої маси, про який йшлося раніше.

З усього сказаного ясно, чому з назвою об'єкта, радіус якого дорівнює гравітаційному, поєднують слово «чорний». Цим хочуть підкреслити, що з поверхні такого об'єкта до далекого спостерігача не може доходити жодне випромінювання. З другого ж боку, якщо частинка речовини або кванти світла, рухаючись до цього об'єкта, перетинають його сферу Шварцшільда, то наче провалюються у безодню, звідки вже немає вороття...

Якщо маса M «втиснена» у свою сферу Шварцшільда, то її середня густина

$$\bar{\rho} = 2 \cdot 10^{16} \left(\frac{M_0}{M} \right) \text{г/см}^3.$$

Для маси, рівної масі Сонця, гравітаційний радіус $R_g \approx 3$ км і середня густина $\rho \approx 2 \cdot 10^{16}$ г/см³, що істотно перевищує густину атомного ядра (10^{14} г/см³). Про властивості речовини при таких густинах (а тому й про існування чорних дір з такими масами) поки що говорити важко. Проте коли в сферу Шварцшільда стискується маса, що в десятки, сотні, а тим більше в тисячі або мільйони разів перевищує масу Сонця, то густини тут будуть цілком «звичними». То ж немає жодних підстав думати, що в природі такі об'єкти утворюватися не можуть.

Цікаво, що існування чорних дір можна було завбачувати, виходячи з уявлень класичної фізики. Справді, відповідно до закону всесвітнього тяжіння (1.4) сила гравітаційної взаємодії $F \sim 1/r^2$. Поле тяжіння, що його створює навколо себе маса

кулястої форми M на відстані r від її центра, описується потенціалом $\varphi = \frac{GM}{r}$. Величиною ж

$$W_p = \varphi m = \frac{GMm}{r}$$

визначається робота, яку необхідно затратити, щоб перенести частинку маси m з відстані r на нескінченність. Величина W_p – потенціальна енергія «пробної» частинки з масою m .

Отож ще 1795 р. **П.Лаплас** висловив таке міркування. Будь-яка пробна маса m залишить поверхню тіла масою M та радіусом R , якщо її кинути радіально вгору зі швидкістю v , при якій її

кінетична енергія $W_k = \frac{mv^2}{2}$ стане рівною потенціальній W_p або

перевищить її, тобто при $\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{R}$. Видно, що чим менше R ,

тим більшою мала б бути швидкість пробної маси. При $R = R_e$ швидкість v сягає швидкості світла. З цього Лаплас і виснував, що коли в природі і є тіла, радіуси яких $R \leq R_g$, то світло не може залишити їхніх поверхонь. Лаплас писав: «зоря з густиною, рівною густині Землі, і з діаметром у 250 разів більшим від діаметра Сонця не дає жодному світловому променеві досягнути нас завдяки своєму тяжінню, а тому не виключено, що найяскравіші небесні тіла у Всесвіті з тої причини» невидимі».

У загальній теорії відносності поняття сили взаємодії між тілами не існує, натомість використовується уявлення про викривлення простору – часу поблизу мас. Проте окремі висновки теорії вдається «перекласти» мовою звичніших для нас понять класичної фізики. То ж з усього сказаного впливає, що насправді величину сили взаємодії між центральним тілом M та пробною частинкою m треба визначати не за формулою (1.4), а зі співвідношення

$$F = \frac{GMm}{r^2 \sqrt{1 - R_g/r}}. \quad (8.6)$$

Отже, коли маса M перебуває всередині «своїї» сфери Шварцшільда, а пробна частинка наближається до неї, то сила їхньої гравітаційної взаємодії зростає до нескінченності вже при $r \rightarrow R_g$.

Чорні діри. Зі сказаного вище випливає: йдеться про об'єкти, маси яких «втиснуті» у «свою» сферу Шварцшільда. Вони можуть формуватися на заключному етапі «життя» окремих типів зір (про це – у §10), але також внаслідок стискування як *цілого* фрагмента газопилової хмари, маса якого співмірна з масою кулястого скупчення зір чи навіть галактики.

Цікаво, що 1939 р. А. Айнштайн опублікував статтю, в якій доводив, нібито речовина не може сконденсуватися, втиснутися всередину сфери Шварцшільда. Проте у тому ж році **Р. Оппенгеймер** (+1967) дійшов протилежного висновку, встановивши, що йдеться про *колапс* – катастрофічне й необмежене спадання речовини до центра зорі.

Тут йшлося про утворення чорних дір на завершальних стадіях розвитку «звичайних зір». Але ж, як показують обрахунки, існує верхня межа маси зорі як стійкої газової конфігурації, і та межа оцінюється величиною $100M_{\odot}$. Коли ж маса газопилової хмари більша і якщо ця хмара почала стискуватися як єдине ціле, то замість стійкої зорі тут зразу мала б утворитися чорна діра. Час стиску хмари за сферу Шварцшільда оцінюється формулою

$$t_{sp} = \frac{1}{\sqrt{6\pi G\rho}},$$

де ρ – початкова густина хмари. Зокрема, при $\rho \approx 10^{-18}$ г/см³ (що типове для газопилових хмар у Галактиці) $t_{sp} \approx 10^{12}$ с ≈ 30 тис. років. Після відкриття квазарів багато уваги надано колапсові мас порядку $10^9 M_{\odot}$.

Як свідчить формула (5.4), час поблизу чорної діри і на великій відстані від неї протікає у різному темпі. Тому з чорними дірами пов'язується низка ефектів, які виходять за межі звичних для нас уявлень. Подив, зокрема, викликають особливості спадання верхніх шарів зорі при її гравітаційному колапсу або, що фактично те саме, вільному падінні «пробної частинки» з нескінченності ($r \gg R_g$) до сфери Шварцшільда ($r = R_g$).

Покладемо, що такою пробною частинкою є космічний зонд, в якому перебуває Мандрівник (система M), і нехай за його рухом у напрямі до чорної діри слідує Спостерігач (система C). З теорії випливає, що для Мандрівника швидкість його руху при наближенні до сфери Шварцшільда зростає за законом

$$v_M \approx c \sqrt{\frac{R_g}{r}} \quad (8.7)$$

а отже, саму сферу Шварцшільда Мандрівник перетне зі швидкістю $v = c$. Він виявить також, що від початку руху з відстані r_0 до перетину ним сфери Шварцшільда минув час

$$\Delta\tau = \frac{2R_g}{3c} \left[\sqrt{\left(\frac{r_0}{R_g}\right)^3} - 1 \right] \quad (8.8)$$

Зокрема, при $r_0 = 10^6 R_g$ і $R_g = 30$ км ($M=M_\odot$) маємо $\Delta\tau = 20$ год. (усього!).

А тим часом, на думку Спостерігача, швидкість руху системи M змінюється так:

$$v_C = c \sqrt{\frac{R_g}{r} \left(1 - \frac{R_g}{r}\right)} \quad (8.9)$$

Нескладний обрахунок показує, що найбільшого значення $v_C = 0,5c$ така швидкість сягає при $r = 2R_g$, після чого при $r \rightarrow R_g$ вона зменшується до нуля ($v_C \rightarrow 0!$). З огляду на останню обставину Спостерігач буде твердити, що Мандрівник досягне сфери Шварцшільда лише в нескінченно далекому майбутньому (при $r \rightarrow \infty!$) мовляв, його відстань r від центра чорної діри на останньому етапі руху змінюється з часом t за законом

$$r = R_g + (r_0 - R_g) e^{-\frac{c(t-t_0)}{2R_g}} \quad (8.10)$$

Тут r_0 – положення системи M на момент часу t_0 . Таким чином, $r \rightarrow R_g$ при $t \rightarrow \infty$. Що більше, з погляду Спостерігача, навіть для фотона, який рухається зі швидкістю c , час падіння, що визначається формулою

$$\Delta\tau = t - t_o = \frac{r_o - r}{c} + \frac{R_g}{c} \ln \frac{r_o - R_g}{r - R_g} \quad (8.11)$$

при $r \rightarrow R_g$, стає рівним нескінченності: $\Delta t \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow R_g$.

У поданому тут прикладі як Мандрівник, так і Спостерігач перебувають по один бік (зовні) сфери Шварцшільда. Прийнято говорити, що її поверхня розмежовує дві зони: поза нею міститься так звана R -зона, всередині неї – T -зона. Аналіз виразу для квадрата інтервалу ds^2 поза сферою Шварцшільда і всередині її приводить до висновку, що на її межі знаки відповідних компонентів метричного тензора змінюються. Тому в T -зоні змінна r вже не може бути радіальною, а τ – часовою координатою. Прийнято говорити, що на межі сфери Шварцшільда r і τ міняються місцями, і в T -зоні r вже є не просторовою координатою, а має характер часу, і навпаки. T -зона, у якій всі рухи спрямовані до центра, зветься T_- -зоною. Теорія допускає існування й T_+ -зон, де всі тіла рухаються від центра назовні. Тут промені світла виходять з-під сфери Шварцшільда і не можуть увійти в неї з R -зони. Такі об'єкти, якщо тільки вони існують у природі (!), прийнято називати *білими дірами*.

Тож час падіння Мандрівника, з точки зору Спостерігача, розтягується до нескінченності ($t \rightarrow \infty$) і припиняється (бо ж $v_c \rightarrow 0$), коли Мандрівник досягає сфери Шварцшільда (при $r = R_g$). Проте для самого Мандрівника рух продовжується в T -зону аж до $r = 0$! Це означає, що зона «звичайних» координат, якими користується Спостерігач, *не перекриває* усього простору-часу. Бо, зокрема, час протікає і «за моментом $t \rightarrow \infty$ ».

Описати (а тим самим і «сумістити») ці два погляди вдалося за допомогою відповідно підібраної системи координат, так званої **метрики Крускала**, в рамках якої суто радіальний рух (падіння на чорну діру) можна зобразити й графічно (рис 8.1). На діаграмі Крускала дві прямі, проведені навхрест під кутом 45° до вертикалі, розмежовують чотири зони. Зверху розташована T_- , внизу – T_+ -зона, справа – звична для нас R -зона. Аналогічної зони зліва фактично не існує: вона вся відповідає координаті $r = 0$, де

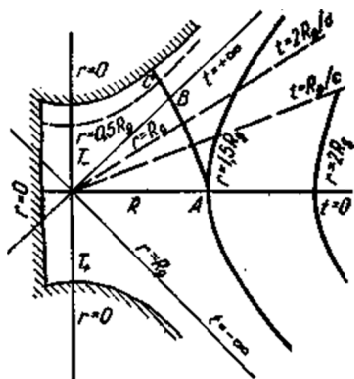


Рис. 8.1. Зображення радіального руху (падіння) пробної частинки з відстані $r = 1,5 R_g$ (точка A , момент часу $t = 0$) до центра сфери Шварцшільда (точка C) на діаграмі Крускала; точка B відповідає переходові пробної частинки через сферу Шварцшільда ($r = R_g, t = +\infty$)

собою радіус сфери Шварцшільда ($r = R_g$) і відповідає моментові часу $t = \infty$.

На рис. 8.1 показано світову лінію Мандрівника, що розпочав свій рух від точки A зі стану спокою в момент $t = 0$ з відстані $r = 1,5 R_g$ від центра сфери Шварцшільда. За інтервал власного часу $\tau = 1,98 \frac{R_g}{c}$ Мандрівник досягне сфери Шварцшільда (точка

B), а при $\tau = 2,89 \frac{R_g}{c}$ – її центра (точки C). Зовнішній Спостерігач прийме сигнал, переданий Мандрівником при наближенні до точки B , лише в нескінченно далекому майбутньому.

І ще таке зауваження. Нехай у системі M (загалом – з поверхні зорі, що стискується за свою сферу Шварцшільда) у процесі її наближення до межі $r = R_g$ випромінюється світловий сигнал з довжиною хвилі λ_0 . Далекий Спостерігач виявить, що довжина хвилі сигналу з часом t за законом

сконцентрована речовина, що створює поле тяжіння. Центри зон T_- і T_+ тут у зв'язку зі спотворенням, зумовленим змінністю масштабу малюнка, прийнято зображати у вигляді параболи як межі деякої (заштрихованої) зони. Точки, які перебувають на однаковій відстані r від центра поза сферою Шварцшільда (в R -зоні), розміщуються на кривих, що мають форму гіпербол. Точки, що відповідають одному й тому самому часові t , лежать на прямих, які виходять радіально від центра діаграми. Моментові $t = 0$ відповідає горизонтальна пряма. Пряма ж, що проходить під кутом 45° до вертикалі праворуч угору, зображає

$$\lambda = \lambda_0 e^{\frac{c(t-t_0)}{R_g}} \quad (8.12)$$

Як бачимо, при $t \rightarrow \infty$ буде $\lambda \rightarrow \infty$: довжина хвилі зростає до нескінченності, тоді як частота сигналу $\nu = \frac{c}{\lambda}$ зменшується до нуля.

Після того як поверхневі шари зорі перетнуть сферу Шварцшільда і потраплять у T -зону, промені світла, що випромінюються з поверхні зорі, взагалі *не можуть* перейти в R -зону. Тому далекий спостерігач *ніколи й нічого* не дізнається про процеси, які відбуваються в T -зоні. З тієї причини сфера Шварцшільда має також назву *горизонту подій*. Сам же стиск зорі за сферу Шварцшільда часто звуть *гравітаційним самозамиканням*.

«Чорні діри не мають волосся» – цей афоризм належить американському фізикуві **Дж. Уїлерові**. Він означає, що на відміну від зір чорні діри не мають ніяких індивідуальних характеристик.

Щоправда, три найістотніші характеристики зорі лишаються й після колапсу: маса зорі M , її момент кількості руху K і електричний заряд Q .

Маса M обумовлює існування навколо чорної діри гравітаційного поля. Завдяки йому, зокрема, подвійна система зір і надалі лишається такою, навіть коли одна з них зазнала гравітаційного колапсу. Зоря, що «згасла», взаємодіє з навколишніми тілами своїм полем тяжіння, яке особливо сильне поблизу її гравітаційного радіуса.

Обертальний рух зорі характеризують моментом кількості руху K . У випадку однорідної кулі, що має масу M і радіус R ,

$$K = 0,4MR^2 \omega \quad (8.13)$$

де $v = \omega R$ – лінійна швидкість на екваторі, $\omega = \frac{2\pi}{P}$ – кутова

швидкість і P - період обертання кулі. Для Сонця знаходимо, що $K_{\odot} = 5,9 \cdot 10^{41}$ Дж·с. З урахуванням зростання густини у напрямі до центра ця величина насправді удвічі менша..

Момент K чорної діри оцінюють з міркування, що під час її утворення лінійна швидкість обертання точок екватора не перевищує швидкості світла. Тому максимальна кутова швидкість обертання чорної діри за порядком величини вимірюється відношенням швидкості світла до гравітаційного радіуса R_g :

$$\omega_{\max} \approx \frac{c}{R_g}. \text{ При } M=M_{\odot} \text{ маємо } \omega_{\max} \approx 10^{-5} \text{ рад/с. Така чорна діра}$$

може здійснювати не більше 10 тис. обертів за секунду! Максимальне значення моменту кількості руху чорної діри дається виразом

$$K_* \approx \frac{0,4GM}{c} = 3,6 \cdot 10^{41} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2 \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Обертання чорної діри зумовлює в ній деякі нові риси. Передовсім істотно зменшується розмір сфери, поверхню якої було названо *горизонтом подій* (інша її назва – *однобічна провідна мембрана*). Тепер її радіус визначається формулою

$$R_{\text{зоп}} = \frac{1}{2} R_g \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{K}{K_*} \right)^2} \right]. \quad (8.14)$$

Як бачимо, розміри R «справжньої» чорної діри – області, з якої назовні не виходить ніяке випромінювання, – удвічі менші, ніж у випадку, коли чорна діра не обертається.

Над горизонтом подій міститься *поверхня нескінченного червоного зміщення* (рис. 8.2). Якщо $K = 0$, то ця поверхня збігається з горизонтом. Відповідні розв'язки отримав **Р. Керр** (США) у 1963 р. Простір між обома згаданими поверхнями зветься *ергосферою*. Найхарактерніше тут ось що. Жодна матеріальна частинка, потрапивши в ергосферу, не може, з погляду далекого Спостерігача, перебувати в спокої. Тут, проте, можливі стаціонарні рухи частинок по колових орбітах, розміщених між поверхнями горизонту й нескінченного червоного зміщення. При цьому в момент, коли частинка рухається до Спостерігача (з урахуванням викривлення променя зору!), її рух можна спостерігати. Інакше кажучи, з ергосфери можна по-

давати сигнал на нескінченність. Аналіз приводить також до висновку, що матеріальна частинка може проникнути в ергосферу і вийти з неї назад в R-зону за час, скінченний для далекого Спостерігача. Що більше, розділившись в ергосфері на декілька уламків, вона може вийти з неї з енергією, набагато більшою від тої, яку мала раніше!

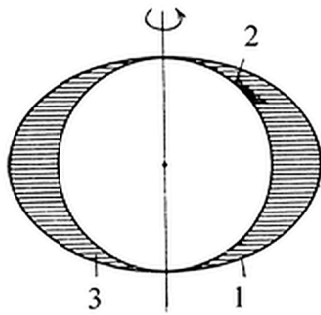


Рис 8.2. Осьовий переріз чорної діри, яка обертається: 1 – поверхня нескінченного червоного зміщення, 2 – горизонт подій, 3 – ергосфера

Тому, як висловився **Роджер Пенроуз** (США), ергосферу можна використовувати для отримання енергії. З такою метою необхідно: 1) направити в ергосферу чорної діри невеликий об'єкт, енергія якого E_1 , 2) змусити його там вибухнути (або включити ракетний двигун) з тим, щоб продукти вибуху (або продукти горіння) перетинали однобічно провідну мембрану й захоплювалися чорною дірою, 3) Скерувати рештки маси, енергія яких була б E_2 назад за поверхню нескінченного червоного зміщення. Є підстави твердити, що різниця енергій $E_2 - E_1$ може бути чимала. Досягається вона за рахунок обертання чорної діри: її момент кількості руху зменшується.

Як бачимо, обертання чорної діри істотно зменшує радіус її горизонту подій. Проте звідси аж ніяк не випливає, буцімто обертання може призвести до руйнування чорної діри. Було доведено такі дві теореми: 1) коли чорна діра вже утворилася якимсь чином, то ніколи не може бути зруйнована, і 2) одна чорна діра не може розділитися на дві, проте цілком можливе об'єднання двох цих об'єктів в один.

З'ясовано, що момент кількості руху чорної діри може істотно зменшуватися, коли на неї випадає речовина з міжзоряного середовища. Нагадаємо, що явище випадання речовини на поверхню зорі зветься *акрецією*. Аналіз показує, що чорна діра захоплює головним чином ті частинки, які рухаються *назустріч* обертанню самої чорної діри – такою вже є особливість гравітаційного поля навколо цих екзотичних об'єктів.

Як показав теоретичний аналіз, чорна діра *може* світитися – за рахунок випадання на неї речовини з міжзоряного середовища або від зорі-сусіда (якщо чорна діра є компонентом подвійної системи). Бо ж при падінні на чорну діру речовина стискується, розігрівається й висвічує частину своєї енергії.

У першому випадку йдеться про рух «самітньої» чорної діри зі швидкістю $v \approx 10$ км/с через заповнене газом міжзоряне середовище. Падаючи на чорну діру, газ нагрівається до температури близько десятків мільярдів градусів. Тож чорна діра світиться у широкому діапазоні довжин хвиль від радіо- до рентгенівського діапазону.

Після всебічного аналізу проблеми астрономи дійшли висновку, що чорну діру легше виявити, коли вона є компонентом подвійної системи. Тут можливі два варіанти: 1) впливаючи на видиму зорю-супутник своїм гравітаційним полем, чорна діра змушує її ритмічно змінювати своє положення на тлі інших, далеких зір і 2) чорна діра розташована настільки близько до «нормальної» зорі, що перетягає до себе її речовину, яка й світиться при падінні на неї.

За останні 25 років підтверджено наявність у ядрах декількох десятків галактик і в квазарах як одинарних, так і подвійних надмасивних чорних дір. Це – і «спостережувано розділені», і «спостережувано нерозділені» системи. Зокрема, є і «подвійні надмасивні чорні діри, які зливаються».

Важливим є питання про **термодинаміку чорних дір**. Як знаємо, цей розділ фізики вивчає процеси перетворення теплової енергії в механічну роботу в тих чи інших макросистемах. Першим тут є закон збереження енергії, другим – закон необоротності макропроцесів в ізольованих системах, що виявля-

ється в зростанні ентропії. Як з'ясовано, висновки та ідеї термодинаміки цілком застосовні до теорії чорних дір.

Застосування ідей термодинаміки до фізики чорних дір почалося з того, що в 1971 р. **Стівен Хокінг** (Англія) зформулював *теорему про площу*: площа A горизонту подій чорної діри за будь-яких класичних процесів не може зменшуватися, тобто вона веде себе так же, як і ентропія. Було логічним припустити, що ентропія чорної діри S пропорційна площі поверхні її горизонту подій, тобто пропорційна квадрату маси чорної діри (оскільки $R_g \sim M$):

$$S = \frac{\pi k c^3}{2hG} A. \quad (8.15)$$

У свою чергу, з факту прикінцевого значення ентропії чорної діри випливало, що її можна описати певною температурою і, далі, – що чорна діра повинна випромінювати!

С. Хокінг установив, що чорна діра «народжує» і випромінює частинки: при $M > 10^{17} \Gamma$ – тільки безмасові, тобто фотони, нейтрино і гравітони, при $5 \cdot 10^{14} \Gamma < M < 10^{17} \Gamma$ – додатково також електрони і позитрони, а при $M < 10^{14} \Gamma$ і більш важкі частинки – так же, як чорне тіло, нагріте до температури

$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 GkM} \approx 10^{-7} \left(\frac{M_o}{M} \right) K. \quad (8.16)$$

Звідси випливає, що якби маса чорної діри не поповнювалася за рахунок захоплення міжзоряного газу і випромінювання інших зір, то вона випарувалася б за час $10^{66} (M/M_o)^3$ років. Зі зменшенням маси чорної діри процес її випаровування прискорюється. Останні $3 \cdot 10^8$ с чорна діра випарує за 0,1с. При цьому випромінюється енергія 10^{23} Дж, що еквівалентне вибуху одного мільйона мегатонних водневих бомб! З усього цього випливає ще один висновок: навіть якщо у Всесвіті в минулому і формувалися чорні діри з невеликими масами, те тепер їх уже немає.

Тісне переплетення фізики чорних дір і термодинаміки привело до формулювання «чотирьох законів фізики чорних дір». *Перший* з них пов'язує зміну внутрішньої енергії $E = mc^2$

стаціонарної чорної діри зі зміною площі її горизонту, кутового моменту й електричного заряду. *Другий* – це твердження, що ентропія чорної діри не може зменшуватися, *третій* говорить, що поверхневу гравітацію неможливо перетворити в нуль за допомогою будь-якого скінченного числа операцій. І так званий *нульовий* закон констатує, що поверхнева гравітація стаціонарної чорної діри незмінна скрізь на горизонті подій. (Детальніше – РА. 102 – 126).

9. Стадії еволюції Всесвіту (інфляція, розширення, роздування)

«Посталий із піни». За давньогрецькою легендою богиня любові і краси Афродита (в римській міфології ототожнена з Венерою) народилася з морської піни. Сьогодні ця асоціація виникає при розгляді питання про «найбільш ранній» етап розвитку Всесвіту. В наші дні космологія і фізика елементарних частинок, об'єднавши свої зусилля, дійшли висновку, що Всесвіт, як і міфічна Афродита, вийшов із «просторово-часової піни», що мала, ймовірно, складну топологічну структуру. Говорять ще і інакше: він народився з вакууму...

З дивними властивостями фізичного вакууму стикаємось при обговоренні термодинаміки чорних дір. Вже загальноновизнано, що вакуум, по суті, є «найфундаментальнішим із відомих нам типів фізичної реальності». Він є основою і передумовою існування безлічі фізичних явищ. Потенційно (віртуально) вакуум містить усілякі частинки і стани, які можуть з нього породитися за наявності відповідних умов, але водночас актуально в ньому нічого немає.

З вакууму і народжуються елементарні частинки, тобто звична для нас речовина. Відомо також, як можна «вивудити» пару «частинка – античастинка» з вакуумної безодні: для цього потрібно «мати» силове поле, завдяки енергії якого частинки і античастинки одержують свої реальні маси.

З теорії «Всесвіту, який розширюється», випливає, що чим ближче «до початку», тим вища його температура. Цей результат одержаний астрономами. Зі свого боку, фізики, збільшуючи

енергію (тобто «температуру») частинок, які стикаються в прискорювачах, зробили висновки про зміну властивостей речовини у міру зростання енергії частинок, що її становлять. Інакше кажучи, вони крок за кроком наближаються до «Великого об'єднання» і «супероб'єднання» наявних у природі взаємодій – електромагнітної, слабкої, сильної і гравітаційної.

Нагадаємо, що *електромагнітна взаємодія* регулює, зокрема, взаємодію додатньо заряджених ядер і від'ємно заряджених електронів в молекулах і атомах, *слабка* – «керує» розпадом важких частинок на легші (приклад: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$), *сильна* – створює міцний зв'язок нуклонів в атомних ядрах, а *гравітаційна* керує рухом небесних тіл. У 1967 р. американські фізики **Стивен Вайнберг** і **Шелдон Глешоу**, та незалежно від них пакистанський учений **Абдус Салам** розробили єдину теорію слабких і електромагнітних взаємодій. Її головний висновок: слабкі й електромагнітні сили при енергіях порядку і вище 100 ГеВ стають нерозрізнюваними. За аналогією з електромагнітною взаємодією, де обмінна частинка – фотон, з'ясовано, що слабка взаємодія відбувається завдяки обміну квантами певного поля, названими проміжними векторними бозонами (їх спін $s = 1$). Сам акт розпаду нейтрона мав би відбуватися за схемою: спочатку нейтрон перетворюється на протон з випуском W^- -бозона ($n \rightarrow p + W^-$), а потім W^- -бозон розпадається на електрон і антинейтрино ($W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$). І справді, нові частинки – W^\pm -бозони та нейтральний Z^0 -бозон, маси яких відповідно рівні 81 і 93 ГеВ, були відкриті 1983 р. у прискорювальному центрі ЦЕРН (Швейцарія). Як відомо, і теорія електрослабкої взаємодії, і відкриття частинок – носіїв слабкої взаємодії відзначені Нобелівськими преміями.

«Штурм» проблеми об'єднання взаємодій продовжено головним чином теоретиками. Адже «Велике об'єднання» електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій реалізується при енергіях 10^{14} ГеВ (що відповідає температурі 10^{27} К), а вони в прискорювачах навряд чи будуть досягнуті. Процеси всіх чотирьох взаємодій стають нерозрізнюваними при ще більших енергіях – при 10^{19} ГеВ (рис 9.1).

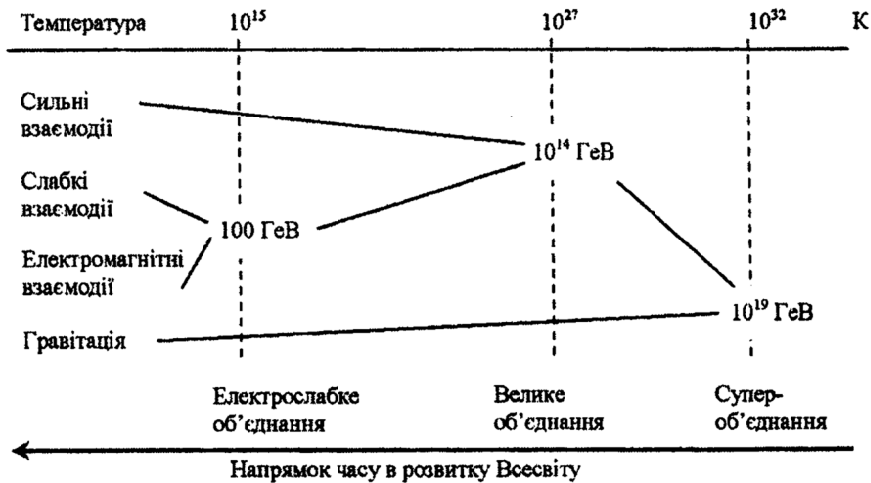


Рис. 9.1. Схема об'єднання взаємодій.

В реалізації Великого об'єднання, очевидно, важливу роль грають надважкі частинки: X і Y -бозони (та античастинки \bar{X} і \bar{Y}) з масою порядку 10^{14} GeV і дробовим електричним зарядом ($\pm \frac{4}{3} e$, де e – заряд електрона).

Об'єднання всіх чотирьох взаємодій проводиться з використанням ідей *суперсиметрії*. Важливі результати в розробці теорії явищ, що відбуваються при надвисоких температурах, типових для ранніх стадій еволюції Всесвіту, і відповідних космологічних досліджень одержано завдяки зусиллям багатьох учених. Грунтовний аналіз (і підсумок) їхніх результатів є в кн. Д.С.Горбунова та В.А.Рубакова.

Епізоди «виходу Всесвіту з піни» вже ніби то «відомі» – з моменту часу $t = t_{pl} = 10^{-43}$ с і відповідних йому інших планківських величин – просторового масштабу $l_{pl} = 10^{-33}$ см і густини $\rho_{pl} = 10^{94}$ г/см³. Їм відповідає особливий стан матерії в умовах (принаймні) Великого об'єднання (ВО), коли при температурі понад 10^{30} К, процеси електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій нерозрізнявані між собою. Цей стан має такі особливості:

- 1) Частинки матерії (як реальні так і віртуальні) поки що не мають мас (тобто вони подібні «нашому» фотону).

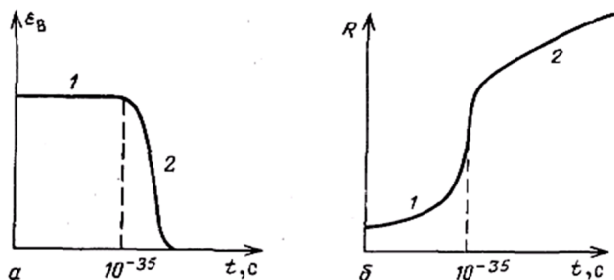


Рис 9.2. Зміна густини енергії вакууму (а) і масштабного фактора (б) з часом: 1-модель де Сіттера (інфляційний Всесвіт); 2-розширний Всесвіт

- 2) У вакуумі стану, тобто в «резервуарі» віртуальних частинок і полів, прихована найбільша потенціальна енергія, густина якої пов'язана з густиною вакууму ρ_v співвідношенням $\varepsilon_B = c^2 \cdot \rho_v$.
- 3) Завдяки роздуванню Всесвіту густина звичайної речовини і температура стрімко зменшуються, тоді як густина вакууму до певного часу залишається незмінною.
- 4) Потенціальна енергія взаємодії частинок E_{II} «регулюється» особливим *скалярним полем Гіггса* (а точніше, полями Гіггса, введеними в квантову теорію поля у 1964 р. англійським фізиком П. Гіггсом). Саме ці поля, взаємодіючи з елементарними частинками, породжують їхню масу, яка тим більша, чим сильніша взаємодія поля з частинкою. Кажуть, що частинки одержують масу, «проковтуючи» *бозони Гіггса* – «згустки» полів Гіггса. Цей механізм порівнюють із поглинанням чорнила промокаткою, де шматочки паперу – це окремі частинки, а чорнило – енергія поля Гіггса. Так скалярні поля виконують роль «спускових гачків», які стимулюють у певні моменти порушення симетрії фізичних станів, тобто відщеплювання спочатку сильної, а потім слабкої взаємодії.

Ну, і, звичайно, виникає природне питання: «а що було до моменту часу $t = 10^{-43}$ с?» Нині на нього фізика відповідає так: «на цьому рубежі безперервний потік часу обривається. Як

образно висловився **І.Д. Новиков**, «річка часу дробиться тут на неподільні краплі»: в масштабах 10^{-43} с в часі і 10^{-33} см в просторі існує своєрідна «піна» квантів простору-часу.

Роздувний Всесвіт. Теорія «Великого вибуху», тобто теорія гарячого Всесвіту, відповісти на питання «чому Всесвіт розширюється», яке постало вже наприкінці 20-х років ХХ ст., не могла. Як відзначав **Я.Б. Зельдович**, – «в цю теорію розширення закладене від початку... «руками», довільним заданням початкових умов. На питання, чому Всесвіт розширюється, чому галактики розлітаються тепер відповідь полягає в тому, що вже в першу секунду (а може й раніше) існував початковий розподіл швидкостей, відповідний розльоту» (ж. «Природа», 1984. № 2).

Розширення, яке спостерігається зараз, – усього лише «відблиск» тих могутніх процесів, що їх пережив Всесвіт у минулому, і одним із проявів яких було його роздування. Висновок: простому розширенню передувало «роздування Всесвіту» – *«інфляційна фаза»*. Зміна масштабного фактора «у той час» описувалася моделлю **де Сіттера**. Все це було обумовлене особливостями фазових переходів, що відбувалися «у фальшивому вакуумі», властивостями цього специфічного стану матерії, вивчення якого лише починається...

Одна із властивостей вакууму – «незвичний» зв'язок між тиском p_B і густиною енергії $\varepsilon_\emptyset = c^2 \rho_\emptyset$. У звичному середовищі обидві ці величини мають однаковий, додатній знак. Наприклад, тиск фотонного газу $p = \frac{1}{3} \varepsilon$. Але вакуум – середовище незвичне. У ньому тиск від'ємний, він визначається через густину енергії ε_\emptyset співвідношенням

$$p_B = -\varepsilon_\emptyset = -c^2 \rho_\emptyset \quad (9.1)$$

У земних умовах така екзотична ситуація є в розтягнутому твердому тілі, а в рідині – якщо поверхневий натяг і зчеплення зі стінками перешкоджають формуванню міхурців.

Із цього незвичайного зв'язку між тиском і густиною вакууму випливає, що незважаючи на роздування (!), густина енергії вакууму залишається незмінною: $\varepsilon_\emptyset = \text{const}$. Справді,

відповідно до першого закону термодинаміки (закону збереження енергії) кількість переданої системі теплоти dQ іде на збільшення її внутрішньої енергії dE і роботу pdV , виконану при зміні об'єму системи V . Ці величини пов'язані співвідношенням $dQ = dE + pdV$. В даному випадку $dQ = 0$. А оскільки $E = \varepsilon V$, то з (9.1) випливає, що $dE = -pdV$. Тому при $p = -\varepsilon$ маємо $d(\varepsilon V) = \varepsilon dV$ або $d\varepsilon = 0$, тобто $\varepsilon = \text{const}$.

Перший сценарій роздувного Всесвіту, який запропонував у 1981 р. американський фізик **А. Гут**, мав істотні недоліки. Але наприкінці того ж року **А.Д. Лінде** і незалежно **А. Альбрехт** і **П. Стейнхардт** (США) розробили нову модель, яка дозволяла здолати усі труднощі і водночас зберегти всі достоїнства її першого варіанту.

Зіставляючи оцінки різних авторів масштабів роздування (в 10^{50} , $10^{1000000}$ і 10^{410^8} разів), читач не повинен був розчаруватися або відчувати недовіру до самої моделі. Так «виявляє себе» невизначеність у виборі одного з параметрів задачі – густини вакууму. Саме ж співвідношення, яке дозволяє оцінити масштаб роздування, можна одержати з міркувань, аналогічних використаним при виведенні рівнянь Фрідмана «в рамках класичної теорії». Як і вище, на відстані r від центра однорідної хмари, що має густину ρ , виділимо пробну частинку m . Під дією маси хмари $M = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$ частинка набуває прискорення

$$a = -\frac{GM}{r^2} = -\frac{4}{3}\pi G\rho \cdot r, \quad (9.2)$$

направлене до центра сфери. Знак мінус означає, що частинка хмарою притягується.

Із загальної теорії відносності випливає, що насправді прискорення частинки a залежить не тільки від густини ρ , але і від тиску p . Відповідна узагальнена формула для a має вигляд

$$a = -\frac{4}{3}\pi G\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right)r. \quad (9.3)$$

І якщо зв'язок між тиском і густиною визначається співвідношенням (9.1), то з останньої формули випливає, що

$$a = \frac{8\pi}{3} G\rho_B r = \frac{\Lambda c^2}{3} r, \quad (9.4)$$

де через Λ позначена величина

$$\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2} \rho_B \quad (9.5)$$

Як видно, у вакуумі прискорення a має додатній знак і отже ним описується гравітаційне відштовхування, величина якого пропорційна відстані. І оскільки $a = \frac{d^2 r}{dt^2}$, то із співвідношення (9.4) знаходимо формулу, якою визначається зміна відстаней між частинками (а не тільки віддалення пробної частинки від маси $M!$) з часом

$$r = r_0 e^{\sqrt{\Lambda/3} ct}, \quad (9.6)$$

тобто воно справді зростає за експоненціальним законом.

У свою чергу, швидкість $v = \frac{dr}{dt}$, з якою відбувається «розгін» частинок, рівна

$$v = \sqrt{\Lambda/3} c r_0 e^{\sqrt{\Lambda/3} ct} = \sqrt{\Lambda/3} c r. \quad (9.7)$$

Зіставляючи це співвідношення із законом Хаббла (7.8), приходимо до висновку, що коефіцієнтом пропорційності у зв'язку швидкості v з відстанню r у формулі (9.6) є стала Хаббла

$$H = \sqrt{\Lambda/3} c \quad (9.8)$$

Проведемо деякі числові оцінки. Прийемо густину вакууму рівною $\rho_B = 10^{94}$ г/см³. Тоді з формули (9.4) знаходимо, що $\Lambda = 2 \cdot 10^{67}$ см⁻², а співвідношення (9.6) конкретизується так:

$$r = r_0 e^{7.5 \cdot 10^{43} t}. \quad \text{Звідси випливає, що за проміжок часу } \Delta t = 10^{35} \text{ с}$$

масштаби Всесвіту збільшилися приблизно в 10^{10^8} разів, тобто відстані між двома довільно взятими частинками на кінець роздування вже рівні $10^{-33} \cdot 10^{10^8}$ см $\approx 10^{10^8}$ см (такі закони операцій з гігантськими числами типу 10^{10^8} ...). У свою чергу,

«середня швидкість» розльоту частинок $v \approx 10^{10^8} \text{ см} / 10^{-35} \text{ с} \approx 10^{10^8} \text{ см/с}$. Звідси випливає, що у Всесвіті реалізуються умови, за яких швидкості набагато перевищують швидкість світла. Але тут йдеться про властивості самого простору!

Ну і неминуче виникає питання: як при цьому виконується закон збереження енергії?. На нього «в рамках закритого Всесвіту» відповів **Я.Б. Зельдович**: «Якщо читач запитає, що (або хто) врешті-решт виконує роботу, я відповідатиму, ґрунтуючись на точці зору глобального збереження енергії усього Всесвіту. Візьмемо закритий Всесвіт: його повна енергія рівна нулю і залишається нульовою незалежно від радіусу і об'єму Всесвіту. Нульова повна енергія Всесвіту має простий сенс: сума додатних енергій речовини, що заповнює всі елементарні об'єми, в точності компенсується від'ємною енергією гравітаційної взаємодії» (ж. «Природа», 1983. № 9, с. 2)...

Про труднощі стандартної моделі Зельдович (там же) висловився так: «Теорія Великого вибуху зараз не має помітних недоліків. Я б навіть сказав, що вона так же надійно встановлена і правильна, наскільки правильним є те, що Земля обертається навколо Сонця»...

А все ж класична теорія розширеного Всесвіту зіткнулася із рядом проблем. Їх якраз і вдалося усунути за допомогою моделі роздувного Всесвіту. Ось найважливіші з них.

1. **Проблема ентропії**: чому у Всесвіті число фотонів реліктового радіовипромінювання в одиниці об'єму N_γ приблизно в 10^9 разів перевищує концентрацію важких частинок N_B ? Інакше кажучи, чому у Всесвіті така висока питома ентропія, коли число фотонів, що припадають на один баріон, характеризує міру нагрітості речовини? З цією проблемою пов'язана проблема зарядової асиметрії речовини у Всесвіті: чому ядра атомів мають додатний електричний заряд, тоді як електрони, що «обертаються» навколо них, – від'ємний?

2. **Проблема горизонту** (або кривини): чому Всесвіт у великих масштабах однорідний та ізотропний, так що інтенсивність реліктового радіовипромінювання практично не залежить від

напряму? Адже багато точок простору, з яких вийшли ці кванти у минулому розташовувалися ззовні горизонтів видимості, окреслених навколо інших точок для тої епохи, тобто вони не були причинно зв'язані і за час розширення Всесвіту не могли обмінятися сигналами (тобто енергією завдяки чому могло б відбутися вирівнювання температури).

3. **Проблема евклідовості геометрії** (плоского простору Всесвіту): чому густина матерії у Всесвіті дуже близька до її «критичного» значення ($\rho = \rho_{кр}$, $\Omega = 1$), а геометричні властивості простору такі близькі до властивостей плоского евклідового простору.

4. **Проблема однорідності і первинних флуктуацій** (утворення галактик): чому в дуже великих масштабах Всесвіт такий однорідний? Чому в малих масштабах у ньому спостерігаються порожнечі (войди) протяжністю близько 40 Мпк, в яких галактики практично відсутні? І як у Всесвіті виникають неоднорідності, з яких надалі утворюються галактики?

5. І, нарешті (або – передусім), – найбільшою проблемою теорії розширеного Всесвіту, було **питання про сингулярність**: чи справді Всесвіт народився у стані з нескінченною густиною?

Про це останнє вже сказано вище: Всесвіт виник внаслідок квантового стрибка з «просторово-часової піни». Щодо інших «резюме» таке:

1. Проблема ентропії і зарядової асиметрії вирішується в теорії Великого об'єднання. Як згадано, при енергіях порядку 10^{15} ГеВ ефективно народжуються надважкі X -бозони і відповідно в такій же кількості античастки \bar{X} . Кожна з цих частинок може – двома різними каналами і (що дуже важливе) з *дещо* *неоднаковою імовірністю* – розпадатися на кварки й антикварки. Наприклад, X -бозон, який має електричний заряд $+4/3$, розпадається на два u -кварки ($X \rightarrow q_u + q_u$) або ж на антикварк \bar{d} із зарядом $+1/3$ і антилептон (позитрон e^+) з електричним зарядом $+1$ ($X \rightarrow q_d + e^+$). Розпади X - і \bar{X} -бозонів і відбуваються у роздувному Всесвіті після деякого зниження температури. Тоді ж утворюється певний надлишок кварків над антикварками; після їх об'єднання в протони й антипротони з'являється

невеликий надлишок частинок над античастинками, а після їх анігіляції – «залишок», що й спостерігається сьогодні, як «звична» речовина. При цьому, унаслідок процесів анігіляції утворюється, як показали розрахунки, також надлишок числа фотонів по відношенню до числа баріонів. Існування двох каналів (схем) розпаду X -бозона на кварки або антикварк-антилептон фактично означає, що баріонний заряд не зберігається. Звідси випливає висновок: *у природі повинні відбуватися процеси розпаду протонів*. Період піврозпаду протона оцінений в 10^{32} років.

Три інші проблеми також одержали своє пояснення якраз у теорії роздувного Всесвіту.

2. Проблема горизонту вирішується так. Точки, з яких ми сьогодні приймаємо сигнали (звідки до нас приходить реліктове радіовипромінювання), «до роздування» перебували дуже близько одна до одної, усередині загального горизонту видимості для того моменту. Між ними, звичайно, відбувався обмін сигналами (квантами енергії) і відповідно відбулося вирівнювання температури. Пізніше, внаслідок роздування ці точки розійшлися на відстані, істотно більші від відстані до горизонту. Тож ми приймаємо сигнали усього лише з невеликої частини тієї області, де відбулося вирівнювання температури.

3. Проблема плоского простору також легко з'ясовується і навіть допускає пояснення за допомогою елементарного прикладу. Якщо в початковий момент t_{pl} кривина двовимірного простору – поверхні кулі (її відхилення від площини) була дуже великою, то після роздування (адже йдеться про фантастичне збільшення масштабів у 10^{10^6} або навіть в $10^{4 \cdot 10^8}$ разів!) геометрія його поверхні стає практично евклідовою (рис. 9.3).

До речі, легко переконатися, що із співвідношень (8.5) і (8.8) випливає зв'язок між густиною вакууму ρ_v і сталою Габбла H типу (7.19).

Стандартна модель» Всесвіту. Обговорення загальної картини розширення Всесвіту у ХХ ст.. розпочинали з деякого мінімального часу $t_{\min} \approx 10^{-6}$ с, дотримуючись погляду, що за допомогою наявної фізичної теорії неможливо описати явища,

які відбувалися при $t < t_{\min}$. Всю подальшу історію розвитку Всесвіту прийнято поділяти на чотири стадії: адронну еру, лептонну еру, еру фотонної плазми та післярекомбінаційну еру.

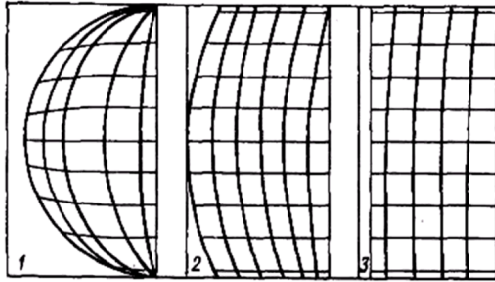
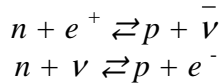


Рис. 9.3. Приклад, який пояснює евклідовість просторової геометрії в спостережуваній частині Всесвіту: при різкому збільшенні розмірів сферичного тіла геометрія його поверхні стає практично евклідовою

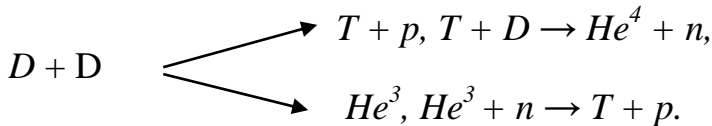
1. **Адронна ера** ($t_{\min} < t < 10^{-4}$ с) – ера важких частинок і мезонів. Тут густина $\rho \approx 10^{14}$ г/см³ і температура $T \approx 10^{12}$ К. Важливою особливістю адронної ери є співіснування частинок (скажімо, протонів) з античастинками (антипротонами). У той час кількість нуклонів (протонів і нейтронів) та антинуклонів в одиниці об’єму була однаковою з кількістю фотонів. Згодом у процесі розширення Всесвіту відбулася анігіляція важких частинок та відповідних їм античастинок. Відтепер важливу роль почала грати та обставина, що у Всесвіті не було повної зарядової симетрії.

2. **Лептонна ера**. За час від $t \approx 10^{-4}$ с до $t \approx 10$ с температура зменшується від 10^{12} до $5 \cdot 10^9$ К, а густина – від 10^{14} до 10^4 г/см³. На початку цього періоду енергія рівномірно розподілялася між фотонами, електронами й позитронами, мюонами, нейтрино та антинейтрино. Останні «народжуються» завдяки реакціям анігіляції електронів і позитронів за схемою $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$. Обрахунок, проте, свідчить, що в момент $t \approx 0,2$ с взаємодія нейтрино з іншими частинками та між собою припиняється.

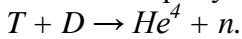
Як показує аналіз, при $t \leq 0,01$ с завдяки наявності в речовині електронів та позитронів, нейтринно й антинейтринно тут відбуваються неперервні перетворення нейтронів на протони і навпаки за схемою



Проте з пониженням температури перебіг цих процесів істотно сповільнюється. Ефективнішими стають процеси з'єднання нейтронів з протонами, за яких утворюються дейтони D : $n + p \rightarrow D + \gamma$ і даліші термоядерні реакції з утворенням тритію або ізотопа гелію He^3 :



Кінцевим продуктом реакції є ядро гелію He^4 :



Теоретичний аналіз привів до висновку, що через 100 с від початку розширення утворюється (за масою) 25% гелію ($Y = 0,25$), останні ж 75% залишаються у формі водню ($X = 0,75$). Результати таких обрахунків практично не залежать від прийнятої густини речовини у Всесвіті.

Предбачення вмісту гелію у первинній речовині вважається тріумфом теорії гарячого Всесвіту.

Справді, гелію в природі майже у 20 разів більше, ніж це могло б бути, якби він утворювався тільки внаслідок термоядерних реакцій у надрах зір! Спостереження дають число, яке практично збігається зі знайденим теоретично на підставі уявлень про гарячу модель Всесвіту. Зокрема, від Сонця відлітають потоки речовини, де вміст гелію становить усього 20%.

3. Ера фотонної плазми. Протягом періоду від $t \approx 10$ с до $t^* \approx 10^{13} \approx 1$ млн. років густина зменшується від 10^4 до 10^{-21} г/см³, а температура від 10^{10} до 3000 К. На початку цієї ери закінчується синтез гелію і деякий час тривають ще процеси анігіляції

електронів з позитронами. Протягом цього періоду відбувається інтенсивне розсіювання фотонів на електронах (надлишок яких над позитронами «мусить бути» для забезпечення зарядової нейтральності Всесвіту). Ось чому температура випромінювання на той час ще однакова з температурою речовини. При $T \cong 3000$ К енергія квантів зменшується настільки, що вони стають нездатні іонізувати атоми водню, і тому процеси рекомбінації електронів з протонами не зрівноважуються зворотними процесами іонізації. Так настає «відрив» випромінювання від речовини. З того моменту головну роль у розширенні Всесвіту починає грати не випромінювання, а речовина.

4. *Післярекомбінаційна ера*, або ера речовини. Вона розпочинається з моменту рекомбінацій і триває дотепер. Температура речовини у процесі розширення тут зменшується як R^{-2} , і в наш час вона мала б становити усього 0,01 К. За певного моменту тієї стадії і розпочалися процеси формування галактик та зір.

Отже, сьогодні розвиток Всесвіту є своєрідною «комбінацією» трьох класичних моделей – де Сіттера, Айнштайна-де Сіттера та Еддінгтона-Леметра.

(див. також ФК с. 28-30 та 38-40).

10. Хімічна еволюція в надрах зір

«Історія існування будь-якої зорі – це справді титанічна боротьба між силою гравітації, яка намагається її необмежено стиснути, і силою газового тиску, котра прагне її «розпоршити», розсіяти в навколишньому міжзоряному просторі. Багато мільйонів і мільйонів років триває та «боротьба». Протягом цих дивовижно великих строків сили рівні. Та врешті-решт... перемога буде за гравітацією. Такою є драма еволюції будь-якої зорі». Такими словами **Й.С. Шкловський** чітко охарактеризував причину, яка призводить до утворення чорних дір: на певному етапі розвитку зорі її рівновага порушується і настає катастрофічний стиск. Пригляньмося до цього явища уважніше.

За сучасними уявленнями, зорі формуються з газопилових хмар. У процесі стискування протозорі – «уламка» такої хмари – густина і температура (а отже, і тиск) в її надрах неперервно зростають. І ось як тільки температура в ядрі зорі досягне значення близько 10 млн. градусів, розпочинаються процеси перетворення водню на гелій, супроводжувані виділенням великої кількості енергії. Унаслідок цього стиск зорі (який тривав близько 20 млн. років) припиняється. На довгі мільйони та навіть мільярди років (перше стосується зір з масою $M \geq 10 M_{\odot}$, друге – з масою $M \approx 1 M_{\odot}$) вага зовнішніх шарів зорі зрівноважується тиском газу її розігрітих надр. Прийнято говорити, що в той час зоря перебуває в стані гідростатичної рівноваги.

Проте така рівновага зорі ілюзорна. У процесі «вигорання» водню в ядрі зорі воно стає «прозорішим». Кванти світла, які тут утворилися, легше виходять у зовнішні шари зорі і, поглинаючись в них, наче «відштовхують» їх від ядра. Через те ядро зорі стискується, тоді як її оболонка розбухає. Такий процес перебування зорі триває неперервно.

Зокрема, у надрах Сонця з чотирьох протонів утворюється ядро гелію (два протони при тому перетворюються на нейтрони). Маса одного протона в атомних одиницях (ат. о.) становить 1,00813, отже, маса чотирьох протонів – 4,03252 ат. о., тоді як маса ядра гелію дорівнює 4,00389 ат. о. Отже, випромінюється лише різниця маси $\Delta m = 0,02863$ ат. о., тобто лише 1/140 частина маси, що бере участь в реакціях синтезу.

За формулою (3.10) знаходимо, що з утворенням одного ядра гелію виділяється енергія $E = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж. При світності Сонця $L = 4 \cdot 10^{32}$ Вт у його надрах щосекунди утворюється 10^{38} ядер гелію. І ще: при «згорянні» маси водню, що дорівнює масі Сонця (2×10^{33} г), може виділитися енергія близько $1,3 \cdot 10^{45}$ Дж. Звідси випливає, що, витрачаючи енергію у нинішньому темпі, Сонце могло б існувати протягом 100 млрд. років. Насправді ж тривалість життя Сонця зменшують у 10 разів, бо «вигоряє» лише та частина водню, яка міститься в його центральних зонах, де температура достатньо висока для перебігу термоядерних реакцій.

Можна визначити також, на скільки зменшується маса Сонця за рахунок того, що воно щосекунди висвічує енергію $L = 4 \cdot 10^{33}$ Дж. Розділивши L на c^2 , знаходимо $\Delta m = 4\,400\,000$ т. Як на наші земні масштаби, це чимала величина. Проте маса Сонця становить $2 \cdot 10^{27}$ т. Отже, такі втрати маси Сонцем аж ніяк не можуть виявити себе в зміні величини сили притягання, а тому не можуть змінити параметри планетних орбіт, навіть коли міркувати масштабами в декілька мільярдів років.

Та ось запаси водню у надрах зорі вичерпалися. І тепер подальша доля зорі визначається величиною її маси. Зокрема, коли вона менша $1,25 M_{\odot}$, то приблизно через 10 млрд. років після сформування зорі її оболонка плавно відокремлюється і протягом 10-20 тис. років існує навколо зорі у вигляді планетарної туманності, що повільно розширюється у навколишній простір. Ядро ж, стиснувшись, до розмірів 5-10 тис. км, стає зорею білим карликом. Як гадають, саме так закінчують своє життя близько 95% усіх зір, така сама доля чекає через 5 млрд. років і наше Сонце.

Зоря, що має масу M , більшу від $1,2 M_{\odot}$, стає *нейтронною зорею* (якщо $M < 3M_{\odot}$) або *чорною дірою* (при $M > 3M_{\odot}$). У цьому випадку після вигоряння водню й стискування ядра температура в ньому зростає до 100-200 млн. градусів. Завдяки цьому тут стають можливими реакції перетворення гелію на вуглець за схемою $3He^4 \rightarrow C^{12} + \gamma$. Розрахунок показує, що запаси цього «пального» витрачаються за декілька мільйонів років. Стиск ядра продовжується, і з підвищенням температури в ньому до 500 млн. градусів тут протягом декількох сотень тисяч років відбуваються реакції синтезу дедалі складніших хімічних елементів (як от $C^{12} + He^4 \rightarrow O^{16} + \gamma$, $O^{16} + He^4 \rightarrow Ne^{20} + \gamma$, $O^{16} + O^{16} \rightarrow S^{32} + \gamma$ і т. д.) аж до заліза включно.

І доки температура у надрах зорі менша 1 млрд. градусів, перенесення енергії від ядра зорі до її поверхні здійснюється головним чином фотонами. Кванти світла повільно «просочуються» через товщу зорі, поглинаючись і перевипромінюючись тисячі й мільйони разів. Усе те певним чином забезпечує рівновагу зорі. Проте зі зростанням температури дедалі більшу

роль у підтримуванні рівноваги зорі (точніше, в порушенні цієї рівноваги) відіграють нейтрино (ν) і антинейтрино ($\bar{\nu}$).

У надрах Сонця температура не перевищує 15 млн. градусів. І, як показують обрахунки, близько 5% енергії, звільнюваної тут під час перетворення водню на гелій, вноситься в безмежність саме нейтрино! Ці елементарні частинки утворюються внаслідок перетворення протонів на нейтрони за схемою $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ (бо ж ядро гелію складається з двох протонів і двох нейтронів!). І що дуже важливе: з'явившись (чи «народившись») внаслідок такої реакції, нейтрино зі швидкістю світла рухається через всю товщу Сонця...

Зі зростанням температури в надрах зорі роль нейтрино у «викраданні» енергії дедалі зростає. Зокрема, за температур вище 300 млн. градусів чимала кількість нейтрино й антинейтрино утворюється внаслідок розсіювання гамма-квантів на електронах (за схемою $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$), далі – при вільних переходах електронів e^- у полі (тобто поблизу) атомних ядер Z : $Z + e^- \rightarrow Z + e^- + \nu + \bar{\nu}$ тощо.

Виносячи велику кількість енергії з надр зорі (а при температурі, більшій 1 млрд. градусів, це становить відповідно понад 50% усієї енергії, яка звільняється за рахунок термоядерних реакцій і гравітаційного стискування), нейтрино тим самим істотно охолоджують ядро і змушують його далі стискуватися та витратити запаси ядерного пального у щораз швидшому темпі. Зокрема, за обрахунками, без таких втрат енергії вуглець у ядрі зорі масою $15,6M_{\odot}$ «згоряв» би протягом 250 тис. років. «Викрадання» енергії нейтринними парами скорочує тривалість еволюції зорі на цьому етапі до ... 20 тис. років. Наступні термоядерні реакції, коли б не було нейтринних потоків, тривали б близько 600 тис. років. Перенесення енергії з надр зорі нейтринними потоками призводить до того, що фази еволюції зорі мають характер вибуху – ядро зорі стискується катастрофічно в буквальному розумінні слова. При тому велика частина енергії затрачається вже на «розвал» («дезінтеграцію») заліза та інших важких ядер на легші. Відбувається також «нейтронізація» речовини – «втискування» електронів у протони

(реакції $p + e^- \rightarrow n + \nu$), супроводжувана різким зростанням втрат енергії на висвічування нейтрино. За обрахунками, коли маса зорі становить $10M_{\odot}$, то протягом якихось 0,06с нейтринна світність зорі зростає до $3 \cdot 10^{46}$ Вт, проте в цілому таке випромінювання має характер короткочасного (тривалістю близько 0,03 с) імпульсу.

Шкала ядерної хронології. Оцінку віку розширеного Всесвіту t_0 можна отримати, виходячи із співвідношення Габбла, якщо стала H відома. Якщо $\rho \approx \rho_{кр}$ ($\Omega=1$), то $t_0 \geq \frac{2}{3}t_H$ і при $H = 70 \text{ км/с/Мпк}$ знаходимо $t_0 \approx 14$ млрд. років.

З іншого боку, з деякого моменту у Всесвіті починаються процеси зореутворення і зразу ж у надрах зір відбуваються реакції синтезу ядер все складніших хімічних елементів. Очевидно, спочатку це були масивні догалактичні зоряні об'єкти (інакше важко пояснити той факт, що навіть найстаріші зорі містять хоча й малу, але все-таки цілком визначену кількість металів), які швидко проходили всі етапи еволюції, завершуючи її спалахом наднової. Так речовина, з якої формувалися далі галактики й окремі зорі в них, поповнювалася елементами, важчими від гелію, зокрема їхніми радіоактивними ізотопами.

Отже, починаючи з деякого моменту, у Всесвіті відбуваються процеси синтезу ядер складних хімічних елементів і зворотні їм процеси розпаду окремих їхніх ізотопів. Унаслідок цього ізотопний склад речовини Всесвіту – матеріалу, з якого на певному етапі зформувалася і наша Сонячна система, безупинно змінювався.

Аналізуючи вміст окремих радіоактивних ізотопів і продуктів їхнього розпаду в речовині Землі, Місяця і метеоритів, *ядерна космохронологія* прагне відновити хронологічну картину цього процесу утворення ізотопів хімічних елементів у Всесвіті, а за їх відносним змістом – визначити проміжок часу, що відокремлює сучасний момент від початку синтезу. Які ж висновки впливають із зіставлення даних ядерної хронології і теорії розширеного Всесвіту?

Передусім – поширеність хімічних елементів, що є у Всесвіті, є наслідком перебігу близько десяти різних ядерних процесів. Майже усі вони відбуваються в надрах зір, причому їхні швидкості, та й самі можливості їх «реалізації», істотно залежать від щільності і температури в надрах зорі, як і на кожному етапі еволюції визначаються її масою. Ось короткий перелік цих реакцій (рис 10.1.):

1) *H-процес* – перетворення водню в гелій у надрах «звичайних» зір (зокрема і Сонця) при температурі $T \sim 15 \cdot 10^6$ К за схемою $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$.

2) *α -процес* – сукупність реакцій синтезу вуглецю з гелію за схемою $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ і подальших реакцій синтезу ядер кисню, неону, магнію ($^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} + ^4\text{He} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ і т.д.), що відбуваються при $T_c \geq 5 \cdot 10^8$ К в надрах зір з масою $M \geq 1,5M_\odot$.

3) *e-процес* – утворення ядер елементів групи заліза ($^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$, $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$ та ін.) у надрах масивних зір при $T_c \approx 3 \cdot 10^9$ К безпосередньо перед спалахом зорі як наднової.

4) *s-процес* (від англійського slow – повільний) – процес повільного захоплення нейтронів у ядрах зір із $M \geq 1,5M_\odot$ на пізньому етапі їхньої еволюції. Потрапляючи в ядро, нейтрон перетворюється в протон раніше, ніж це ядро захопить ще один нейтрон і стане стійким ізотопом. Так утворюються ядра все важчих (після заліза) хімічних елементів аж до вісмуту (^{209}Bi). Джерелами вільних нейтронів є реакції типу $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{S} + n$.

5) *r-процес* (від слова rapid – швидкий) – процес захоплення нейтронів атомними ядрами, який відбувається у надрах наднової під час спалаху упродовж усього близько 100 с, тоді саме утворюються ядра елементів з атомною масою до $A \approx 270$ (зокрема урану і торію).

Зокрема, за рахунок *s*-процесів утворюються «надлишки» ядер поблизу атомних мас $A \approx 86, 130$ і 196 , за рахунок *r*-процесів – при $A \approx 90, 140$ і 210 .

6) *p-процес* – процес захоплення протонів ядрами важких елементів, що відбувається в оболонках наднових.

7) *X-процес* – утворення літію, берилію і бору внаслідок процесів сколювання, при яких легка частинка високої енергії зударяється з важким ядром і вибиває з нього легкий осколок. Цей процес, зокрема, міг зіграти важливу роль у зміні ізотопного складу речовини, з якого утворилися планети, завдяки потужному корпускулярному випромінюванню молодого Сонця.

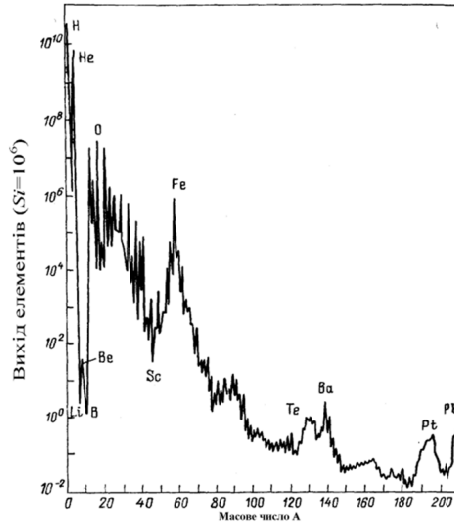


Рис 10.1. Поширеність хімічних елементів у Сонячній системі

8) *v-процес* – утворення в оболонці наднової ядер деяких хімічних елементів при взаємодії з речовиною оболонки потоків нейтрино, які виходять з надр зорі при колапсі її ядра.

Саме з «попелу» давно згаслих зір, після їх спалаху як наднових, перемішаного з «вихідною» речовиною Галактики, і сформувалася наша Сонячна система. Для визначення її віку використано явище радіоактивного розпаду ядер хімічних елементів, період напіврозпаду яких більший за 1 млрд. років. Мова йде головним чином про ізопои урану і торію, продуктом розпаду яких є свинець: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$ ($T_{1/2} = 4,5$ млрд. років), $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7^4\text{He}$ (0,7 млрд. років), $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6^4\text{He}$ (14 млрд. років).

Зіставлення вмісту ізопоів урану, торію і свинцю в метеоритах привело до висновку, що вік планетної системи $\theta_n \approx 4,55$

млрд. років. Нагадаємо, що вік зразків установлюється надійно лише у випадку, якщо радіоактивний елемент і кінцевий продукт його розпаду залишаються зв'язаними між собою. Ця умова порушується, якщо зразок розплавлювався, що траплялося на Землі (найдавніші зразки земних порід мають вік 3,6 млрд. років) і частково на Місяці. Цього уникла речовина більшості метеоритів, так званих хондритів. «Вкраплені» у них *хондри* – крапельки (діаметром до 1 см) містять практично всі хімічні елементи (за невеликими винятком) у тому ж співвідношенні, що й в атмосфері Сонця. Речовина ж, яка оточує хондри, складається зі звичайних силікатних мінералів.

Встановлення віку Галактики методами ядерної космохронології здійснюється з урахуванням а) синтезу ядер хімічних елементів (нуклеосинтезу) у Галактиці до утворення Сонячної системи і одночасного розпаду їх на стадії газоподібних туманностей. Згодом, б) «вільного розпаду» ядер, зокрема ізотопів урану і торію, протягом якого газоподібна туманність після конденсації речовини у планети і метеоритні тіла. Узгодженості різних даних досягнуто у припущенні, що в найближчих до нас околицях Галактики безпосередньо перед початком процесу формування Сонячної системи стався сплеск («спайк») нуклеосинтезу (як тут не згадати гіпотезу **Фреда Хойла** про те, що в минулому Сонце було подвійною зорею і що один з компонентів спалахнув як наднова...).

Радіоактивних ізотопів з періодом піврозпаду близько 10^9 років налічується біля десятка. Найбільш надійними для встановлення космохронологічної шкали є згадані ізотопи урану і торію, а також плутонію – 244 (період піврозпаду = 0,08 млрд. років).

Знайдений цим шляхом (незалежно від космічних даних) вік нашого Всесвіту сягає 14 млрд. років.

Детальний аналіз проблем ядерної астрофізики здійснено, зокрема, в монографії «Ядерна астрофізика» (автори – Ф.Хойл та ін., М. 1986), приуроченій 70-річчю видатного дослідника, лауреата Нобелівської премії (1983 р.) **Уільяма Фаулера**.

У ядерній космохронології є ще дуже багато невизначеностей. Досить сказати, що похибки ефективних перерізів деяких

реакцій надто великі. Дуже далека ще від розв'язку проблема так званих обійдених ядер (збіднених нейтронами ядер важких елементів). І все ж збіг віку Всесвіту за даними космохронології і теорії його розширення виявляється все-ж непоганим.

11. Реліктове радіовипромінювання (РРв)

Зацікавившись питанням, «як сталося, що у Всесвіті існують хімічні елементи від водню аж до урану і саме в таких, а не інших пропорціях?», Г. Гамов у 1946 р. висловив думку, що водень, гелій і всі важчі хімічні елементи утворилися внаслідок реакцій синтезу при розширенні первинної дозоряної речовини, яку учений назвав «ілем» (Аристотель називав так «найголовнішу субстанцію Всесвіту»). А щоб такі реакції були можливими, довелося прийняти, що температура у Всесвіті в момент «Великого вибуху» сягала мільярдів градусів. Інакше кажучи, на ранніх стадіях розширення Всесвіт мав би бути *гарячим*, а отже, заповненим квантами високих енергій. У процесі розширення Всесвіту енергія кожного фотона зменшується. Тому, твердив Гамов, у наш час спектральний розподіл енергії цих квантів повинен відповідати випромінюванню чорного тіла, нагрітого до температури 5–6 К, і шукати ці кванти треба у сантиметровому діапазоні радіохвиль.

Невдовзі Пензіасу й Вільсону (США) і вдалося зареєструвати (1965 р.) випромінювання, інтенсивність якого в zenіті відповідала температурі 6,7 К. Строгий аналіз привів до висновку, що з цієї величини 2,7 К пов'язано з випромінюванням земної атмосфери, а 0,9 К – з випромінюванням окремих вузлів радіоприймача.

Інтенсивність зареєстрованого випромінювання з точністю до 0,1% не залежала від орієнтації антени радіотелескопа, його не можна було віднести на рахунок висвічування зір, радіогалактик чи розсіювання квантів світла на міжзоряних пилинках. Тому це відкриття зразу ж було належно оцінене: антена вловлює *космічне радіовипромінювання*, яке є доказом того, що Всесвіт у минулому перебував у гарячому стані.

Отже, міжгалактичний простір заповнений квантами низької частоти. При температурі $T = 2,7$ К густина енергії цих квантів

становить $u = a_R T \approx 4 \cdot 10^{-20}$ Дж/см³ (тут $a_R = 7,56 \cdot 10^{-22}$ Дж/см³/К⁴ – стала випромінювання). Середня енергія одного кванта $\overline{\mathcal{E}} \approx 2,7 kT \approx 10^{-22}$ Дж ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана). Звідси знаходимо, що середнє число квантів в одиниці об'єму $N_\gamma = u / \overline{\mathcal{E}} \approx 400$ см⁻³. І за сучасної середньої густини речовини у Всесвіті $\rho \approx 10^{-30}$ г/см³, це дає концентрацію частинок $N = \rho/m_H \approx 5 \cdot 10^{-7}$ см⁻³ ($m_H = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г – маса атома водню). Отже, у Всесвіті на кожен нуклон припадає близько 1 млрд. фотонів!

У процесі розширення Всесвіту енергія кожного кванта зменшується за законом

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_0} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} = \frac{v_1}{v_0} \quad (11.1)$$

Так теорія підтверджує факт, що на ранній стадії розширення (при $R(t_1) \ll R(t_0)$) частота цих квантів була дуже високою – у далекому минулому Всесвіт і справді був гарячим!

Густину маси, еквівалентної згаданій густині енергії u , знаходимо за формулою спеціальної теорії відносності

$$\rho_\gamma = \frac{u}{c^2} = \frac{a_R T^4}{c^2} = 4,5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3 \quad (11.2)$$

– таке значення майже на чотири порядки менше від середньої густини речовини у Всесвіті. Це означає, що в наш час реліктове випромінювання зовсім не впливає на особливості розширення Всесвіту (не визначає тип моделі). Проте в минулому ситуація була зовсім інша. Із закону збереження числа частинок в елементі об'єму впливає, що густина маси частинок змінюється обернено пропорційно кубу радіуса кривини:

$$\rho_m \sim \frac{1}{R^3(t)} \quad (11.3)$$

За тим же законом змінюється й число фотонів в одиниці об'єму. Що ж до енергії випромінювання, то за рахунок червоного зміщення вона зменшується ще в $R(t)$ разів.

$$\varepsilon \sim \frac{1}{R^4(t)}. \quad (11.4)$$

Неважко отримати й закон зміни температури у розширеному Всесвіті. Адже коли випромінювання відіграє головну роль, то $u = a_R T$,⁴ і тому знаходимо:

$$T = \left[\frac{3c^2}{32\pi G a_R} \right]^{1/4} t_0^{-1/2} \approx \frac{3.4 \cdot 10^{10} \text{ K}}{\sqrt{t}}. \quad (11.5)$$

Важливим є питання про роль реліктового радіовипромінювання як певної привілейованої системи відліку. Справді, можна уявити, що наша Галактика з її мільярдами зір, зокрема із Сонцем, занурена в море низькочастотних фотонів, які рівномірно з усіх боків пронизують місцезнаходження спостерігача. Коли ж цей спостерігач рухатиметься зі швидкістю v , то реєструватиме надлишкову інтенсивність реліктового випромінювання у напрямі свого руху і меншу – з протилежного боку. Відповідно величина зареєстрованої ним температури становитиме

$$T(\theta) \cong T_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos\theta \right), \quad (11.6)$$

де θ – кут між вектором швидкості руху спостерігача і напрямом осі радіотелескопа. Надлишок інтенсивності, що відповідає надвишкві температури і справді виявлено Тож – з'ясовано, що стосовно «фону РРв» Сонячна система рухається зі швидкістю $u \approx 400$ км/с, а центр нашої Галактики – зі швидкістю $u \approx 600$ км/с у напрямі на сузір'я Лева.

Високий ступінь ізотропії РРв свідчить, що Всесвіт у великих масштабах однорідний. Важливість досліджень РРв підтверджена тим, що вони двічі були відзначені Нобелівською премією з фізики. У 1978 р. її отримали **А. Пензіас** та **Р. Вілсон** за виявлення його) і в 2006 р. **Дж. Мазер** та **Дж. Смут** (керівники однотисячного колективу учених, інженерів і техніків проекту супутника COBE) «За роботу, що допомагає просунути у вивченні процесу виникнення Всесвіту і розумінню походження галактик і зір». Точніші дослідження флуктуацій РРв здійснено за допомогою космічного апарата WMAP (рис. 11.1), а згодом і винятково прецизійним апаратом «Планк».

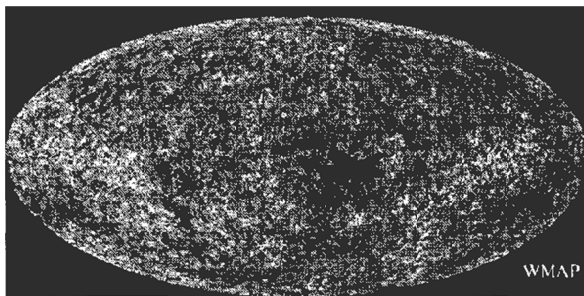


Рис. 11.1. Кутовий розподіл інтенсивності реліктового радіовипромінювання за даними експерименту WMAP (флуктуації $\delta T \approx 0,0002$ K)

За даними цих спостережень здійснено аналіз залежності усереднених квадратів різниць інтенсивностей РРв $(I_2 - I_1)^2$ або ж, що те саме, температур $(T_2 - T_1)^2$ як функції кутової відстані θ між довільно взятими точками «1» і «2» небесної сфери.

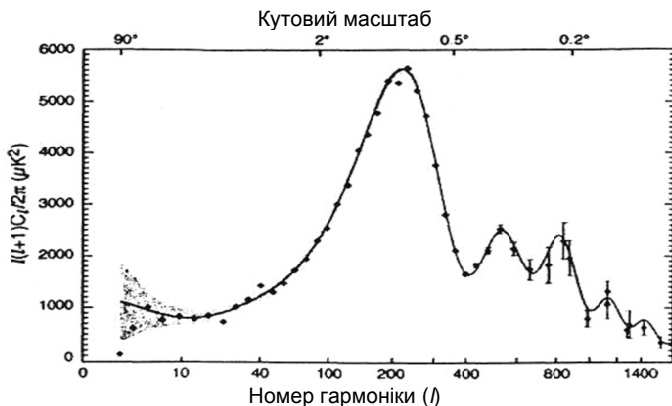


Рис. 11.2. Спектр флуктуацій реліктового випромінювання за даними експериментів: космічного WMAP, наземного СВІ та балонного АСВАР. По горизонталі – номер кутової гармоніки (мультиполя) та відповідний їй кутовий масштаб (зверху), по вертикалі – нормований спектр потужності флуктуацій (тобто відображення флуктуацій температури).

Виявлено **акустичні піки**, які зайняли на рис.11.2 місце, близьке до передбаченого А.Д. Сахаровим ще 1967 р. (тому і є поняття **сахаровських піків**). Прийнято вважати, що з часу появи цього графіка космологія стала **прецизійною наукою**.

Приглянемо уважніше до рис. 11.2 – спектра температурних флуктуацій реліктового радіовипромінювання. Верхня

горизонтальна шкала вказує на кутові відстані між точками неба, на яких виявляють себе відхилення «від середнього» інтенсивності (температури) РРв. Перший максимум, головний, – при кутовій відстані близько 1° , другий – $0,33^\circ$, третій – $0,2^\circ$.

Спробуємо тут, у край поперехово (з огляду на математичну складність проблеми), проілюструвати «математичне підґрунття» рисунка 11.2. На ньому – віддзеркалення процесів, які відбуваються «на сфері останнього розсіювання– ОР» при переході від гарячого стану, який «зовні» сфери, до звичного для нас «холодного». Уявляємо: зі зростанням відстані «в той бік» ми могли б «заглибитися» у все більш ранні стадії розвитку Всесвіту. Відстань же «від нас» до сфери ОР описуємо величиною червоного зміщення z (яке тим більше, чим далі у просторі перебуває об'єкт, що світиться). У шарі ж сфери ОР відбуваються процеси рекомбінацій, тут кванти світла вже «відриваються» від речовини і можуть вільно пронизувати все, що всередині «нашої» сфери останнього розсіювання. Оскільки ж вона стрімко продовжує розширюватися, то «бувші жорсткі» кванти згодом і стають реліктовим радіовипромінюванням. Ці кванти залишають сферу ОР в момент часу t_1 і досягають Спостерігача (нас) в момент t_0 .

Зі співвідношення для зміни z часом температури в інфляційній моделі можна знайти: типове для перебігу процесів рекомбінацій її значення ($T \sim 10\,000\text{K}$) досягається при $t_1 \sim 10^{13}\text{с}$, коли $z \sim 1000$. Протяжність причинно-пов'язаних зон тут сягала значення $D \sim ct_1$. Вік же Всесвіту «для нас», беручи до уваги режим його розширення, $t_0 \sim 3 \cdot 10^{17}\text{с}$, а $z = 0$. Тож відстань d_m до сфери останнього розсіювання – горизонта частинок – в космологічній моделі зі степеневим законом зростання масштабного фактора оцінюють величиною $d_m \sim ct_0$. Звідси отримуємо, що очікуваний максимум флуктуацій (перший із **сахаровських піків**) має бути на такому кутовому масштабі, під яким спостерігається згадана вище зона на момент рекомбінацій: $\Theta \approx (1 + z_1)ct_1/ct_0$, що при наведених вище величинах дає положення максимуму флуктуації РРв при масштабі бл. 1° . Це якраз і відображене на рис. 11.2.

«З практики знаємо»: якщо D – власний розмір об'єкта, що перебуває на відстані d , то його спостережуваний кутовий розмір (в радіанах) $\Theta = D/d$. Але ж «у космології» все складніше! Ось хоча б: доки світловий промінь долає відстань від об'єкта до спостерігача, простір розтягується і то для кожної космологічної моделі по-своєму. Або: відстані часто визначають за величиною світлового потоку, що приходить від об'єкта (тоді її звать *фотометричною*). І тут доводиться вносити дві поправки: на зменшення енергії фотона за рахунок червоного зміщення і за зменшення кількості фотонів, що реєструють за одиницю часу, якщо їх джерело віддаляється. Встановлення ж *метричної відстані* чи горизонту частинок вимагає урахування (знову ж таки залежно від прийнятої космологічної моделі) зміни масштабного фактора за час руху променя світла...

Пригадаймо ще таке. Звучання певного музичного інструмента відрізняється від іншого тембром, тобто «якістю, забарвленням» – сукупністю *обертонів*, що супроводять основний тон найменшої частоти (і якщо частоти обертонів кратні частоті основного тону, їх звать *гармоніками*). Отже, обговорювану вище сферу останнього розсіювання можна розглядати як своєрідний *сферичний барабан* – 2-вимірну поверхню.

Додаймо «дещо» і про математичний апарат аналізу цих коливних рухів. Коливання струни описують за допомогою *тригонометричних функцій*, круглої мембрани – *бесселевих функцій*. Коливання ж «на сфері» відображають *сферичними функціями*. В кожному випадку йдеться про спільний внесок тонів та обертонів у величину відхилення струни (і ін.) від положення рівноваги. Для опису ж коливань, які здійснює сфера, – 2-вимірних, *сферичних гармонік* Y_{lm} – використовують числа l і m , причому для кожного l ціле число m приймає значення від $-l$ до 0 і далі до $+l$.

Величину l прийнято іменувати *кутовим моментом*, що співвідносний із флуктуаціями кутового масштабу π/l . Вводиться поняття *мультиплета* – комбінації усіх «тонів», що мають однакове l . Для кожного з них можна обчислити відповідну амплітуду C_{lm} , що можливе якраз за допомогою сферичних

гармонік. Оскільки ж Всесвіт ізотропний, то фактично залежності згаданої амплітуди від l немає. Тому загалом йдеться про сферичну функцію порядку n як суму $(2n + 1)$ «однорідних поліномів ступеня n » – *поліномів Лежандра*. Врешті-решт і отримують для середньоквадратичної флуктуації температури $\langle(\Delta T)^2\rangle$ співвідношення

$$\langle(\Delta T)^2\rangle \approx T^2 \int \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l d \ln l. \quad (11.7)$$

Підінтегральна величина якраз визначає потужність, що припадає на одиничний логарифмічний інтервал l , інакше – сукупний внесок кутових моментів. Його і відкладено на вертикальній шкалі рис. 11.2. Саму ж величину C_l іменують спектром потужності флуктуацій температури РРв.

Що ж до фізичних ефектів, які «упорядковують» на сфері ОР ці флуктуації, то обмежимося усього лише таким зауваженням. Це передусім відомий *ефект Доплера*, а ще, на малих взаємних відстанях точок сфери, – ефект *Сілка*: з ділянки підвищеної концентрації речовини випромінюється певний надвишок фотонів.

Винятково важливим і математично вкрай нелегким є питання про взаємозв'язок реєстрованих флуктуацій з параметрами (тої чи іншої) космологічної моделі. Адже, «строго кажучи», щоб знайти величину C_l при $l=200$, треба розглядати сукупність 400 рівнянь... Річ ясна, реалізуються певні спрощення – аналітичні наближення, але і розробляються відповідні програми обчислень на потужних ЕОМ.

Аналіз рис. 11.2 передбачає урахування таких параметрів космологічної моделі: густини баріонної речовини ρ_b , густини темної матерії ρ_{tm} , переобчисленої в масу темної енергії – ρ_{te} , сталої Габбла H , параметра k , що визначає кривину простору, загалом – 11 параметрів моделі. Розв'язки згаданих рівнянь отримують «перебиранням» величин кожного з цих параметрів. Зміна одного чи двох із них веде до зсуву вправо-вліво положення сахаровських піків рис. 11.2, до «придушення» чи вивищення того або іншого. Графічне відображення сказаного можна побачити в монографії І.В. Архангельської та ін. (див. додаток Література).

Найбільш адекватною, що узгоджується з результатами спостережень, виявляється така добірка параметрів «нашого Всесвіту»: звичної для нас баріонної речовини– 5% (з цього щоправда лише 0,5% «світної»), темної матерії(невідомої все ще природи) – 25%, «темної енергії» – 70%, стала Габбла $H = 68 \pm 9$ км/с/Мпк, реалізовується модель евклідового простору ($\kappa = 1$).

12. Проблема структуризації речовини у Всесвіті

Питання про походження галактик і квазарів (оскільки ці другі є такими ж космологічними об'єктами) – одне із найскладніших в астрономії. Весь гігантський і розмаїтий світ галактик був відкритий буквально в наші дні. Вивчення структури галактик і процесів, що в них відбуваються, лише починається. Тому нічого дивного в тому, що та чи інша з обговорюваних схем еволюції зрештою виявляється надто спрощеною.

Між тезою «флуктуації густини речовини пояснюються специфікою розпаду вакууму» й адекватною моделлю формування галактик і їх скупчень пролягло ще незоране поле, на якому проставлені усього лише окремі мітки-орієнтири. Тому тут передусім доцільно оглянути, в яких напрямках розвивалася космологія галактик і які успіхи (а вони безперечні) на цьому шляху вже є.

Популярною залишалася «конденсаційна» точка зору, за якою галактики формувалися внаслідок стиснення (конденсації) речовини.Цю точку зору висловив ще **Ньютон**: «Мені здається, що якби речовина нашого Сонця й планет і взагалі вся речовина Всесвіту була рівномірно розподілена по всьому простору небес, а кожна частинка речовини відчувала б природжене тяжіння до всіх інших, і повний об'єм простору, в якому розсіяна ця речовина, був би скінченним, то речовина з країв цього об'єму прагнула б завдяки тяжінню до усієї тої речовини, що в середині, і тому падала б до центра цього простору і вклалася б там у єдину велику сферичну масу. Але якби ця речовина була рівномірно розподілена в нескінченному просторі, вона ніколи

не злилася б у єдину масу; якась його частина згущувалася б в одну масу, інша – в іншу, так що виникло б нескінченне число великих мас, розкиданих по всьому цьому нескінченному простору на великій відстані одна від одної. І так могли б утворитися Сонце і нерухомі зорі, якщо припустити ще, що за своєю природою ця речовина світилася. Але яким чином речовина могла б розділитися на дві частини і та, що підходить для цього, злилася в тіло, яке світиться, тоді як інша залишилася темною або перетворилася на темну, коли перша залишилася незмінною, – це вже, на мій погляд, не можна пояснити одними лише природними причинами і я повинен приписати це думці і діянню, виконаного волею Творця».

У ХХ ст. питання «чому зорі світяться, а планети ні» вирішене, так би мовити, природним шляхом: у надрах зір як масивних тіл завдяки достатньо високій температурі і густині «забезпечується» звільнення енергії за рахунок реакцій ядерного синтезу. Ідею ж Ньютона про гравітаційну нестійкість нескінченного однорідного середовища в математичну форму перетворив (1902 р.) англійський астроном **Джеймс Джинс** (+1946). Він встановив *критерій гравітаційної нестійкості*: нескінченно протяжне однорідне середовище, що має густину ρ і температуру T , внаслідок випадкових збурень (скажімо, проходження звукових хвиль) під дією сили тяжіння розпадається на окремі ущільнення з розміром

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi a^2}{G\rho}} = \sqrt{\frac{\pi\gamma AT}{\mu G\rho}}. \quad (12.1)$$

Тут a – швидкість звуку, $A = 8,3$ Дж/моль/К – газова стала, γ – відношення питомих теплоємностей, μ – молекулярна маса. Внаслідок цього утворюються фрагменти речовини з початковим об'ємом λ_J^3 і джинсовою масою

$$M_J = \lambda_J^3 \rho_{\text{реч}} \quad (12.2)$$

де $\rho_{\text{реч}}$ – густина речовини.

Однак, критерій Джинса одержано в припущенні, що нескінченне однорідне середовище перебуває у спокої. Поведінка ж

малих збурень густини в однорідному середовищі, що розширюється, має свої особливості.

Розрахунок показує, що за час від одної секунди до $t \sim 3 \cdot 10^9$ років відносна величина збурення зростає не більше, ніж у 10^7 разів. А це значить, що при $t \approx 1$ с в догалактичному середовищі вже повинні були бути збурення густини з відносною величиною $\delta\rho/\rho \approx 10^{-17}$, що не так вже й мале. Якщо ж говорити про «звичні» теплові флуктуації в середовищі, то для них $\delta\rho/\rho \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$, де N – число частинок у системі. І для Галактики при $N = 10^{68}$ частинок маємо $\delta\rho/\rho \approx 10^{-34}$, тобто на багато порядків менше!

Тому, як відзначали **Л.Е.Гуревич** і **А.Д.Чернін**, «початкові збурення, підсилювані гравітаційною нестійкістю, повинні бути набагато вищі за рівень теплових флуктуацій упродовж фактично усієї еволюції світу, яку взагалі можемо вивчати на підставі встановлених фізичних законів. У цьому значенні можна говорити про ці збурення як про деяку дозоряну, догалактичну структуру, що існувала у Всесвіті задовго до зір і галактик.

Питання про природу цієї початкової структури належить до числа найважчих у космології. Пошуки підходу до його з'ясування тепер ведуться на основі новітніх ідей, які об'єднують висновки загальної теорії відносності і квантової теорії. Найімовірніше, походження первинних збурень зобов'язане тим же процесам, які обумовили і саме космологічне розширення; однак, про це ми ще дуже мало знаємо»...

Певні висновки про особливості розвитку неоднорідностей у розширеному Всесвіті все ж вдавалося зробити, беручи до уваги, що в епоху до рекомбінації космічної плазми, коли головну роль відігравало випромінювання, джинсова довжина зростала пропорційно часу. І оскільки швидкість звуку у фотонному газі $a = c / \sqrt{3}$, то

$$\lambda_j = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} ct. \quad (12.3)$$

Інакше, джинсова довжина тут є навіть трохи більшою відстані до горизонту світу $r_H = ct$. А це робить неможливим

причинний зв'язок між її краями. До моменту часу $t_* \approx 100\,000$ років джинсова маса менша $10^{15} M_\odot$, утримується гравітацією як єдине ціле, еквівалентне великому скупченню галактик. Після рекомбінації плазми, при $t \approx 1$ млн. років температура зменшується приблизно до 3000 К, а швидкість звуку до $a \approx 6$ км/с. У цей момент густина $\rho \approx 3 \cdot 10^{-22}$ г/см³ і $M_J \approx 10^6 M_\odot$ (усього !). А це – маса типового кулястого скупчення.

За однією з тогочасних гіпотез, формування неоднорідностей типу скупчень галактик, відбувалося на післярекомбінаційній стадії розширення Всесвіту і... «з підігрівом» речовини ударними хвилями, важливу роль при цьому мали б зіграти нейтрино. В якості механізмів, які стимулюють розвиток неоднорідностей, розглядали адіабатичні або ентропійні збурення, як також космічні вихори.

В теорії *адіабатичних збурень* покладають, що частинки речовини і фотони поведуться як єдине середовище. В адіабатичних згущеннях температура і густина вищі, ніж у навколишньому середовищі. Але якщо збурення виникло, то зразу ж потоки фотонів переносять тепло із зони згущування, причому тим ефективніше, чим вона менша. Тому розвиток малих неоднорідностей придушується і до епохи рекомбінації повинні б «виживати» збурення з масами порядку $10^{15} M_\odot$.

У теорії *ентропійних збурень* згущення і розрідження плазми відбувається на фоні повністю однорідного випромінювання. Після рекомбінації плазми відокремлюються згущення з масою, типовою для маси кулястих скупчень.

Третя теорія утворення галактик – теорія *космічних вихорів* – йде від Декарта. Починаючи з 1948 р., німецький фізик **Карл Вейцекер** спробував відтворити картину Всесвіту, виходячи з припущення, що в догалактичному середовищі існували складні вихорові (турбулентні) рухи. Вони, нібито, забезпечували обертання протогалактик і сприяли їх виділенню із неперервного середовища, яке Вейцекер вважав холодним. Згодом, у 1952 р. Г. Гамов підтримав «вихорову космогонію» і припустив, що вихори існують у Всесвіті від початку і мають ту ж природу, що і саме космологічне розширення.

І тут-то виникли питання. Якщо поява галактичної структури пов'язана з розвитком адіабатичних збурень, то мали б спостерігатися неоднорідності реліктового радіовипромінювання у напрямках, що розрізняються за кутом навіть на декілька хвилин дуги. З іншого боку, ентропійні збурення приводять до утворення всього лише зоряних систем типу кулястих скупчень. І залишалося незрозумілим, як вони згодом об'єднуються в галактики так, що в метagalacticному просторі їх немає.

У теорії ж вихорів із закону збереження моменту кількості руху (добуток швидкості руху у вихорі на його розмір і число охоплених ним частинок повинен залишатися незмінним) впливало, що у міру космологічного розширення швидкості вихорів повинні зменшуватися. І, навпаки, в ранню епоху ці швидкості мали б бути близькі до швидкості світла (а формально і надсвітловими). Ця суперечність, здавалося, була усунена після відкриття реліктового випромінювання: у фотонному газі з домішкою плазми вихорові швидкості залишаються незмінними упродовж усієї епохи переважання випромінювання (порядку 3000 км/с). Проте вихори з такою швидкістю створювали б помітні флуктуації в реліктовому фоні.

Лише заключний етап великомасштабної структуризації Всесвіту – фактично висновки із критерію гравітаційної нестійкості Джинса – було досліджено якнайповніше. Адже йдеться про стискування речовини при температурі, близькій до 10 000 К, яка відповідає переходу водню від іонізованого до неіонізованого стану, і такий режим стискування сприяє найпоширенішому охолодженню речовини. При цьому відбувається *каскадна фрагментація* – розвал великих фрагментів на менші, оскільки відповідно до критерію Джинса зі збільшенням густини джинсова маса зменшується. Цей процес зупиняється, як тільки фрагмент став непрозорим для власного випромінювання. Тоді з кожного такого фрагмента й утворюються окремі зорі.

Що ж стосується походження первинних збурень, то його пов'язують із *квантовими флуктуаціями скалярного поля*, які виникли через $\sim 10^{-34}$ с після Великого Вибуху. Певні «сліди» цих процесів мало б зберегти реліктове радіовипромінювання, а

саме – його анізотропія, тобто «відчутні» флуктуації величини інтенсивності (температури) залежно від кутової відстані точок небесної сфери.

Аналіз приводить до такого висновку. При розширенні (перед тим – роздуванні!) Всесвіту у певний момент, коли температура знижується до величини $\lesssim 10\,000\text{K}$ і настає епоха рекомбінації, «востаннє» здійснюється акт розсіювання фотонів. Відтоді й упродовж наступних 13 млрд. років випромінювання «зберігає себе як чорнотільне», поступово охолоджуючись до сучасного значення (2,72K). Визначальною тут є кутова відстань між точками на поверхні «останнього розсіювання», які ніколи не були у причинно-наслідковому зв'язку одна з одною, її оцінено в 2° . І – масштаби $> 2^\circ$ стосується тих збурень, які виникли якраз завдяки згаданим уже флуктуаціям скалярного поля. Масштаби ж $< 2^\circ$ розповідають про фізичні пронеси, що відбувалися в епоху рекомбінації «у зоні причинно-наслідкового контакту» (зокрема про акустичні коливання фотон-баріонної рідини, які і є безпосередньо пов'язані з процесами утворення галактик).

Повертаючись, однак, до «реалій нинішнього дня», «в рамки апробованих моделей», наведемо фрагмент тексту із «Загальної астрофізики» **А.В. Засова** і **К.А. Постнова** (2006 р.): «Спостережувана великомасштабна структура не могла зформуватися без участі прихованої маси – невидимої матерії, яка виявляє себе лише своєю гравітаційною взаємодією. Справді, із флуктуацій температури реліктового випромінювання ми знаємо, що флуктуації густини на момент рекомбінації сягали значень $\frac{\delta\rho}{\rho} \leq 10^{-5}$.

Після рекомбінації ці флуктуації зростають пропорційно масштабному фактору, і на момент $z \approx 1$ можуть зрости в ~ 1000 разів, тобто до рівня 10^{-2} , що цілком недостатнє (на два порядки!) для початку розвитку гравітаційної нестійкості й утворення структур, і це – незалежний вагомий аргумент на користь існування невидимої матерії... Саме флуктуації густини темної матерії, які б мали бути на два порядки більшими, ніж флуктуації звичайної (баріонної) речовини в момент рекомбінації, і створили потенціальні «ями». Ці «ями», очевидно, ста-

ли центрами конденсації звичайної речовини, з якої згодом стали формуватися галактики і скупчення галактик».

Отож – «взьми те, не знаю що», а це фактично означає заміну одного невідомого (умов структуризації) іншим (чинником, який її забезпечить). **Л. Ксанфомаліті** у дуже інформативній статті під назвою «Темний Всесвіт» (ж. «Наука и жизнь, №5, 2005), заторкуючи також проблему «сингулярності – таємничої точки відліку», зіронізував з цього приводу, мовляв це «як у медиків: якщо чогось не розумієш, назви латинською, щоб пацієнт поважав».

А ось ще один фрагмент із тої ж книги А.В.Засова і К.А.Постнова: « У наш час непогано відомі, принаймні в загальних рисах, характер розширення Всесвіту в сучасну епоху, особливості і загальна спрямованість еволюції галактик і систем галактик. Очевидним виглядає і народження спостережного Всесвіту зі стану надвисоких густин і температур. Однак питання про найбільш ранні етапи розширення Всесвіту, про формування і ріст збурень, про властивості простору, часу, елементарних частинок на планківських масштабах залишаються відкритими і допускають різні варіанти розв'язків фізичної картини, що описує динамічну еволюцію Всесвіту від самого початку його розширення, ще не створено, оскільки наявні фундаментальні фізичні теорії залишаються справедливими лише в обмеженому діапазоні параметрів... Інфляційна теорія раннього Всесвіту, як і теорія гарячого Всесвіту, теорія холодної темної речовини, відповідальної за появу великомасштабної структури або взагалі загадкової «темної енергії», залишаються поки що лише, в кращому випадку, добре аргументованими гіпотезами, їх перевіряють і розвивають, як тільки з'являються нові дані.

Тому відповідь на питання про «народження» Всесвіту не може бути даною у підручнику».

13. Проблема темної маси і темної енергії

Як з'ясовано у розділі 6, тип космологічної моделі визначається співвідношенням між величиною середньої густини речовини у Всесвіті ρ та її критичним значенням

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G} .$$

Модель буде закрита, коли $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{кр}} > 1$.

Щоб визначити середню густину речовини галактик, скажімо, в кубі зі стороною ℓ_* , необхідно знайти їхню загальну масу в цьому об'ємі. Орієнтовна схема визначення маси галактики виглядає так. У випадку спіральної галактики визначають (спектральним методом) швидкості руху v зір у найвіддаленіших ділянках спіралей навколо її центра. Лінійну відстань r зорі від центра галактики знаходять за її кутовою відстанню до нього та за відомою відстанню від спостерігача до галактики. Далі вважали, що вся маса зір M , які містяться всередині сфери радіуса R , сконцентрована в центрі галактики. Прирівнюючи сили тяжіння $f_g = \frac{Gm}{R^2} M$ і відцентрову $f = \frac{mv^2}{R}$, знаходили масу галактики

$$M = \frac{Rv^2}{G} \quad (13.1)$$

Еліптичні й неправильні галактики обертаються надто повільно. Проте кожна зоря тут хаотично рухається і швидкість руху тим більша, чим більша загальна маса системи. Спектральні дослідження дають певне середнє значення тієї швидкості, яку й підставляють у формулу (13.1).

В минулому неодноразові визначення середньої густини речовини, сконденсованої у формі галактик, приводили до висновку, що вона орієнтовно рівна 10^{-32} г/см³, тобто у 50 разів менша за критичну: $\Omega_{гал} \approx 0,02 \ll 1$.

Оскільки масу галактик визначали динамічним методом, то в знайдене значення її середньої густини мали б входити і ті форми речовини, які, перебуваючи всередині сфери згаданого радіуса R та створюючи гравітаційне поле, безпосередньо не спостерігаються. Це могли би бути навіть чорні діри або великі кількості нейтронних зір. А «природньо поклавши», що основна ця маса сконцентрована до центра гравітуючої системи, можна

було очікувати, що лінійна швидкість зір V з відстанню r від центра мала б зменшуватися орієнтовно як $1/\sqrt{r}$ (такою є залежність для колової швидкості без урахування взаємного впливу «сусідніх зір»). Насправді ж спостереження вказують навіть на істотне зростання швидкості V з відстанню r . І в нашій Галактиці, як і в інших, лінійна швидкість обертання зір спочатку зростає з відстанню r від центра і, досягнувши при (орієнтовно) $r = 2$ кпк швидкості 250 км/с (це – в нашій, в інших галактиках – від 200 до 300 км/с) залишається практично незмінною при зростанні радіусів орбіт зір до 30 кпк. Це – незаперечне свідчення того, що в усіх цих зоряних системах є невидима речовина, «темна маса», Вона не лише регулює орбітальні швидкості зір, а й формує з них протяжні велетенські структури – спіральні «рукави»: в половини спостережуваних галактик.

Однак «загадка темної маси» постала перед астрономами ще у 1932 р. Тоді то **Ф. Цвіккі** (США), визначаючи швидкості руху галактик відносно центра тяжіння скупчення з сузір'я Волосся Вероніки, виявив, що ці швидкості (бл. 1000 км/с) «занадто великі». Створювалося враження, ніби це скупчення мало б розпастися за 1 – 2 млрд. років, тоді як вік галактик (а через те і їхніх скупчень!) у 5 – 10 разів більший!

Можна сказати й так: кінетичні енергії галактик мали б «змусити» їх розлетітися в міжгалактичний простір, переборюючи сили їхнього взаємного притягання. Оскільки ж цього не сталося, то висновок був такий: стійкість скупчення забезпечується масою (речовиною), яку ми не бачимо, не реєструємо. А її – чи не в десятки разів більше тієї, яку бачимо! І, отже, вона, **темна невидима маса** також керує і «життям» кожної галактики. Зокрема, визначає її форму, як ось, бути їй спіральною чи ні, а якщо так, то з перемичкою чи без неї...

Математика тут нескладна. Як установив 1870 р. німецький фізик **Рудольф Клаузіус**, значення середньої кінетичної енергії E_k системи частинок (зір у галактиці, галактик у скупченні тощо) пов'язане із середнім значенням потенціальної гравітаційної енергії U співвідношенням:

$$2E_k + U = 0 \quad (13.2)$$

Тож якщо M – маса системи, R – її розмір (радіус), G – гравітаційна стала, тоді $U = -\frac{GM^2}{R}$, а $E_k = -\frac{Mv^2}{2}$ ($\overline{v^2}$ – середня квадратична швидкість складових системи). І якщо зі спостережень знайдено $\overline{v^2}$ і R , то із співвідношення (13.2) оцінюють масу галактики (чи відповідно скупчення галактик):

$$M \approx \frac{R\overline{v^2}}{G}.$$

Певний час замість поняття *енергія* вживали *сила* (лат. *vir*). Зокрема, замість *кінетична енергія* – *жива сила*. Тому то співвідношення (13.2) названо *теоремою про віріал*. А що знайдене при вивченні скупчень галактик «занадто велике $\overline{v^2}$ » вимагало (для пояснення стійкості скупчень) істотного збільшення маси M , ця ситуація отримала назву *віріального парадокса*. Усунення ж (пояснення) його якраз і полягало в припущенні, за яким маса скупчення істотно перевищує величину, знайдену зі співвідношення «світність – маса галактики», встановленого для близьких галактик.

Можна, отже, думати, що насправді в скупченні основна частина маси перебуває в «прихованому» стані у формі «невидимої» речовини. Тим самим було б $\Omega \approx 1$ і, можливо, навіть $\Omega > 1$. Наприкінці 80-х рр. ХХ ст вважали, що цією речовиною частково могли б бути ті ж такі зорі. Річ у тім, що дотепер провадилися дослідження лише внутрішніх ділянок галактик. За допомогою найновіших методів певні сліди світлої речовини галактик виявили на відстанях, котрі перевищують 100 кпк від центра, тоді як радіуси ділянок, де видно спіральні вітки, здебільшого не перевищують 10 кпк. Або ж що галактики оточені протяжними коронами (гало) зі слабких карликових зір, на які і припадає основна частина маси галактик. Що, можливо, чимала кількість галактик залишається недосяжною для спостережень через їх «розрідженість» і відповідно малу поверхневу яскравість, або ж, навпаки, з огляду на малі розміри вони практично не відрізняються від зір. Можливо, є й «мертві» галактики, де всі зорі завершили свою еволюцію.

Не виключалася і можливість існування в міжгалактичному середовищі чорних дір, котрі поруч з галактиками входять до скупчень як їхні рівноправні члени. Висловлювалося припущення, за яким певна частина речовини у міжгалактичному середовищі може перебувати у вигляді сконденсованого водневого «снігу» – розміри сніжинок мали б сягати десяти кілометрів .

У 1962 р. було відкрито ізотропне космічне рентгенівське (а згодом і ультрафіолетове) випромінювання, яке й пов'язують з висвічуванням водневої плазми, нагрітої до температури близько 1 млн. градусів. Як висловився свого часу **Ян Оорт** (Голландія), галактики наче «плавають» у середовищі гарячого міжгалактичного газу. Підсумував ці пошуки **П. Піблс**: «Наївно було б думати, що середню густину речовини у Всесвіті можна оцінити на основі однієї компоненти, котра піддається детальному вивченню, – галактик, навіть коли ми досягнемо сутність цих об'єктів, але, з другого боку, так само нерозумно було б робити висновок про безнадійність спроб визначити ρ ». Бо «немає причин вважати, що наша винахідливість уже вичерпана».

Ще складнішою (водночас і цікавішою!) є проблема **темної енергії**. У травні 1998 р. відбулася знаменна астрономічна конференція, де було розглянуто особливості розширення Всесвіту. «Більшістю голосів – 40 із 60» стверджено: почавши від червоних зміщень $z = 0,5$ це розширення є прискореним! Це відкриття започаткувало нову революцію в космології.

Отож дві групи дослідників (керівники **С. Перлмуттер**, **Б.Шмідт** та **А. Рісс**, одна опрацювала дані спостережень 35 наднових, друга 42) незалежно провели співставлення отриманих ними видимих зоряних величин і червоних зміщень Наднових «типу Ia» у декількох десятках випадків. 1 – постало питання: що є причиною цього «додаткового розтягування» простору? Відповідь дано таку: очевидно, так виявляє себе *вакуум*.

Конкретизуємо сказане так званим **парадоксом Габбла-Сендіджа**, суть якого з'ясовують співставленням двох діаграм Габбла. Накреслена ним 1929 р. діаграма стосується залежності $v(r)$ до відстаней $r_m \approx 20$ Мпк (Габбл помилково приймав $r_m \approx$

2 Мпк). У наш же час її надійно складають за даними про галактики, відстані до яких перевищують 700 Мпк. Там уже (при $r \geq 100$ Мпк) Всесвіт можна вважати однорідним. Отож для такого галактичного світу маємо сталу Габбла $H \approx 73$ км/с/Мпк. Габбл же встановив «залежність $v = Hr$ «у зоні», де розподіл речовини дуже неоднорідний і де дисперсія швидкостей (їх відхилення від середнього значення для заданої відстані) сягає 74 км/с! Питання ось у чому: як же стається так, що, незважаючи на істотну неоднорідність просторового розподілу цих близьких галактик, незважаючи на так великий розкид швидкостей їхнього руху, все ж за даними тепер уже про 145 галактик цього «місцевого об'єму» стала Габбла $H = 64 \pm 10$ км/с/Мпк! Чітку відповідь на це питання дали **І.В. Архангельська**, **І.Л. Розенталь** та **А.Д. Чернін** у кн. «Космологія і фізичний вакуум» (М. 2006, с. 186-191): «...кінематика галактик у місцевому об'ємі має мало спільного з їх просторовим розподілом,... за спостережуваною кінематикою стоїть динаміка, яка з розподілом мас галактик фактично не пов'язана». І хоча слід врахувати ще й наявну тут темну матерію, маса якої – у 10 разів більша, дві сили – сила притягання, створювана масою місцевої групи, і сила відштовхування створювана вакуумом, «зрівнюються за абсолютною величиною при $r \approx 2$ Мпк, на більших же відстанях домінує анти-тяжіння вакууму. [А тому] почавши з відстані в декілька мегапарсек, галактики місцевого габблівського потоку рухаються як пробні частинки на ідеально регулярному фоні вакууму, який їх розганяє ...» Бо «головний внесок у космічну густину створює вакуум з його ідеально однорідним розподілом у просторі. За своєю ефективною гравітуючою густиною він перевищує сумарну середню густину майже у п'ять-шість разів».

І висновок такий: «лише з відкриттям космічного вакууму (див ще §14) став ясним реальний смисл відкриття Габбла: у Місцевому об'ємі він виявив глобальний космологічний феномен».

Можна б згадати ще два інші варіанти пояснення прискорення в русі галактик, які наче і не потребують «темної енергії»: 1) якщо «наш Світ» насправді є 10-вимірний, то їх гравітаційна

взаємодія на «тих» далеких відстанях може послаблюватися «завдяки провалюванню її носіїв – гравітонів – в інші виміри», і 2) наш спостережуваний Всесвіт перебуває у велетенській «порожній» ямі – в якомусь мегавойді, оточеному фантастично великими згущеннями гравітуючої речовини.

Можливо, ми усього лише Жани (чи Жаки), які втішаються тим, що з вершини Ейфелової вежі «бачать увесь світ» (не підозріваючи навіть, що десь є пінгвіни, а десь білі ведмеді)...

14. Від Стандартних моделей до плетива струн

«Стосунки між астрономією і фізикою складні й багатоманітні, зокрема, і в психологічному аспекті. Астроном із задоволенням застосовує новини фізики (експериментальної і теоретичної) для своєї науки – від спектрального аналізу до лічильників фотонів, від класичної механіки до квантової фізики. І водночас в астрономів зрють грона – не гніву, звичайно, але бажання реваншу – ніщо так не цінується астрономами, як можливість активно втрутитися у фізику. Не брати у фізиків, а дати їм щось нове! На тому шляху в астрономів є чудові досягнення, прикладами можуть бути закон тяжіння, визначення швидкості світла і багато іншого. Спроби просунути у тому самому напрямі і дати астрономічне пояснення найважливішим фізичним величинам і явищам тривають і досі».

Такими словами **Я.Б. Зельдович** й **І.Д. Новиков** підкреслили значення і змагання астрономії, зокрема космології, у встановленні найфундаментальніших законів природи. Сьогодні, як ніколи раніше, саме від космології очікують вирішальних відкриттів, значення яких виходило б далеко за рамки суто астрономічних проблем. Бо саме в космології одночасно переплітаються ролі законів тяжіння, квантової механіки і теорії елементарних частинок...

До того ж можливості фізиків сягати у колайдерах якомога вищих «температур», здається, вичерпуються (і реєстрація бозона Гігса була останньою з можливих?...). «А тут» – Природа вже «здійснила свій експеримент», лише у зво-

ротному напрямку – від температур надвисоких до сучасних. І тому, як образно висловився Я.Б.Зельдович, фізики «мають безплатний ланч». Упевнившись у тому, що вихідне уявлення про надвисоку колись (14 млрд. років тому) температуру правильне, їм залишається адекватно аналізувати наслідки цього великомасштабного експерименту. Поєднуючи наявний в них теоретичний багаж Стандартної моделі фізики елементарних частинок (ФЕЧ, тобто *мікрофізики*) з найновішими здобутками космології (доцільніше вже сказати – *космофізики*) у побудові складних комбінацій стандартних (уже) моделей еволюціонуючого Всесвіту.

Тож – маємо щастя бути принаймні свідками становлення чи не найвизначальнішої галузі науки – *космомікрофізики*. «Зверху» тут – миготливе небо, де на відстані $z = 1000$ породжуються флуктуації реліктового радіовипромінювання. «Вниз» – «вакуумні бульбашки», складені із реальних струн/суперструн (чи їх лише «образів?»), які «плавають» (принаймні) у 10-вимірному просторі при гармонійній «реалізації» ідей суперсиметрії та супергравітації...

З'ясування усіх цих аспектів, напевне, можливе...

Пошук у цьому напрямі розпочали **А. Еддінгтон** і **П. Дірак** з виявлення взаємозв'язку параметрів, якими описуємо масштаби в просторі й часі доступного для спостережень Всесвіту, з константами мікросвіту. Що більше, Дірак навіть спробував урахувати вплив Всесвіту як цілого на окремі фізичні сталі.

Йдеться передусім про співвідношення між кулонівською і гравітаційною силами взаємодії електрона і протона. Відношення цих сил

$$K_1 = \frac{F_e}{F_g} = \frac{e^2}{Gm_e m_p} \approx 0,23 \cdot 10^{40} . \quad (14.1)$$

Це далі співвідношення між радіусом кривини Всесвіту $R \approx \frac{c}{H}$ і так званим класичним радіусом електрона $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} \approx 2,8 \cdot 10^{-13}$ см.

$$K_2 = \frac{R}{r_e} = \frac{ct_H}{r_e} \approx 6 \cdot 10^{40}. \quad (14.2)$$

Далі – співвідношення між середньою густиною речовини електрона і середньою густиною речовини у Всесвіті $\rho \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$:

$$K_3 = \frac{\rho_e}{\rho} \approx 10^{40}. \quad (14.3)$$

І ще: число нуклонів у Всесвіті, точніше, в замкненій сфері радіусом $R \approx ct_H$

$$K_4 = \frac{2\pi^2 R^3 \rho}{m_p} \approx (0,9 \cdot 10^{40})^2 \quad (14.4)$$

Таких безрозмірних великих чисел є ще декілька.

Важливим є результат комбінування трьох фундаментальних фізичних сталих – швидкості світла c , сталої гравітації G і сталої Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – «планківські» одиниці довжини ℓ_g , часу t_g , маси m_g і густини ρ_g :

$$\begin{aligned} \ell_g &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad t_g = \frac{\ell_g}{c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5,3 \cdot 10^{-44} \text{ с}, \\ m_g &= \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad \rho_g \approx \frac{m_g}{\ell_g^3} = \frac{c^5}{G^2\hbar} \approx 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3. \end{aligned} \quad (14.5)$$

Отож маємо ще й такі «великі числа»:

$$K_5 = \left(\frac{r_e}{\ell_g} \right)^2 \approx 31 \cdot 10^{40}, \quad K_6 = \frac{m_g^2}{m_e m_p} = 31,8 \cdot 10^{40}. \quad (14.6)$$

Якщо $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$ – маса «середньої» зорі, то отримуємо також число

$$K_7 = \frac{m}{m_g} \approx 0,01 \cdot 10^{40} \quad (14.7)$$

Співвідношення між радіусом кривини Всесвіту і класичним радіусом електрона спробували прочитати й інакше. Бо ж величина $\tau \approx 10^{-23} \text{ с}$ є певною «атомною» одиницею часу, яку іноді звать «темпоном» або «хрономом». Отже, буде:

$$K_2 = \frac{t_H}{\tau} \approx 6,6 \cdot 10^{40} \quad (14.8)$$

Таким чином, «велике число» K_2 – не що інше, як вік Всесвіту, виражений в атомних одиницях часу!

Як бачимо, тут порівнюються різні, на перший погляд зовсім не пов'язані між собою, величини. І в кожному випадку отримуємо число, близьке до 10^{40} ... У зв'язку з цим **Я.Б. Зельдович** та **І.Д. Новиков** писали: «Серед фізиків існує переконання, що безрозмірні величини, які істотно відрізняються від одиниці, підлягають поясненню... Це переконання наштовхує на думку, що близькість великих безрозмірних чисел з різноманітних явищ природи вказує на наявність внутрішніх зв'язків між тими явищами і може бути маяком, котрий вказує шлях розвитку науки».

Спробу пояснити подані збіги «великих чисел» зробив уже П.Дірак. При цьому він міркував так. У чисельнику останнього запису величини K_2 стоїть «вік» Всесвіту, який зростає з часом. А це означає, що «магічне число» 10^{40} також не залишається сталим. Тому й будь-яка інша безрозмірна комбінація параметрів (K_1 , K_2 і т. д.) має зростати пропорціонально t . Так П.Дірак дійшов висновку, що не всі фізичні сталі зберігають одне і те саме значення у процесі розширення Всесвіту. Зокрема, оскільки праві сторони співвідношень (14.1) і (14.2) рівні (з точністю до певного числового множника), то в кожен момент часу мали б бути рівними і їхні ліві частини, тобто

$$\frac{e^2}{Gm_e m_p} = \frac{t_H}{e^2 / (m_e c^3)} \quad (14.9)$$

А що t_H зростає, то треба б підозрівати, що змінюються або маси елементарних частинок, або елементарний заряд, чи, нарешті, стала гравітації. Перші дві можливості треба було відкинути, бо ж сталість маси і заряду елементарних частинок підтверджена багатьма лабораторними експериментами. Тим часом стала гравітації G грає істотну роль саме в космічних масштабах, під час взаємодії великих мас. Тому П.Дірак виснував, що змінюється, і то обернено пропорціонально часу t , стала гравітації G ($G \sim t^{-1}$).

За однією з гіпотез, відносна швидкість зменшення сталої G мала б становити

$$\frac{1}{G} \left| \frac{dG}{dt} \right| \approx -3 \cdot 10^{-11} / \text{рік} \quad (14.10)$$

Наскільки важко виявити таке зменшення сталої G , видно ось з якого прикладу: збільшення радіуса Землі в місці спостереження усього на 0,1 мм за рік призводить до зміни у прискоренні сили земного тяжіння $\frac{1}{g} \left| \frac{dg}{dt} \right|$ на $10^{-11} / \text{рік}$, тобто на таку саму величину, котру треба виміряти.

Змінність сталої тяжіння G мала б істотні геологічні та й астрономічні наслідки. Зокрема, радіус Землі в наш час мав би бути на декілька сотень кілометрів більший, ніж у момент формування твердої оболонки нашої планети 3 млрд. років тому. По-друге, в минулому Земля мала б перебувати ближче до Сонця, ніж сьогодні ($\Delta a \approx 5$ м/рік), а сама світність Сонця була б значно вища, оскільки вона суттєво залежить від величини сталої гравітації ($L \sim G^7$!). Тому й температура на поверхні Землі за докембрійського періоду мала б сягати 300°C , інакше кажучи, Світовий океан на той час (700 млн. років тому) мав би кипіти... А тим часом палеонтологи мають незаперечні дані, що тоді як у воді, так і на суші існували різноманітні форми життя!

В одній зі своїх останніх статей Г.Гамов висловив припущення, що «велике число» K_2 визначається не радіусом Всесвіту на сучасний момент, а на момент рекомбінації водню в гарячому Всесвіті $t_* \approx 10^6$ років (що становить $3 \cdot 10^{36}$ темпонів). У цей момент зрівнюються середні значення густин випромінювання й речовини, а при $t > t_*$ (як уже зазначалося) головну роль у розширенні Всесвіту відіграє речовина. Гамов зіставив також силу кулонівської та гравітаційної взаємодії двох протонів, через що число K_1 (тут позначимо його через K_1^*) набуло значення

$$K_1^* = \frac{e^2}{Gm_p^2} \approx 10^{36} \quad (14.11)$$

Загалом якщо ці співвідношення й відображають якийсь глибокий зв'язок між гравітацією, квантовою механікою і теорією елементарних частинок, то цей зв'язок поки що прихований...

Отже з початку 80-х років ХХ ст. історію нашого Всесвіту вже почали описувати від моменту $t \approx t_{pl} \approx 10^{-43}$ с і просторового масштабу $l_{pl} \approx 10^{-33}$ см.

Приймалося, зокрема, що при температурі понад 10^{30} К, процеси електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій нерозрізнявані між собою. Цей стан має такі особливості:

1. Частинки матерії поки що не мають мас.

2. У вакуумі стану, тобто в «резервуарі» віртуальних частинок і полів, прихована потенціальна енергія, густина якої пов'язана з густиною вакууму ρ_v співвідношенням $\varepsilon_v = c^2 \cdot \rho_v$ причому в деяких варіантах теорії приймалося $\rho_v = 10^{74}$ г/см³, в інших $\rho_v = \rho_{Pl} = 10^{94}$ г/см³, так що густина енергії цього псевдовакууму відповідно рівна 10^{88} Дж/см³ або 10^{108} Дж/см³.

3. Завдяки роздуванню Всесвіту температура стрімко зменшується, тоді як густина вакууму до певного часу залишається незмінною.

Вакуум, поле й бозони Гігса

За визначенням, *вакуум – найфундаментальніший із відомих тип фізичної реальності*. Він є основою і передумовою існування *безлічі* фізичних явищ. Потенційно (віртуально) вакуум містить усілякі частинки і стани, які можуть з нього породитися за відповідних умов, але водночас актуально в ньому нічого немає. Відомо, проте, як можна «вивудити» пару «частинка-античастинка» з вакуумної безодні: для цього потрібно «мати» силове поле, завдяки енергії якого згадана пара одержує свої реальні маси.

Є декілька незаперечних даних про дівість фізичного вакууму як такого. Передусім це *лембівське зміщення лінії в спектрі атома водню*. Як виявили у 1947 р. У. Лемб і Р. Різерфорд (США) стан $2S_{1/2}$ знаходиться вище, ніж $2P_{1/2}$, на величину $\Delta E = 1057,77$ МГц (теоретичне – 1057,19 МГц). Це стало блискучим підтвердженням теорії Дірака про «реальність фону

заповнених станів із $E < 0$ і, отже, впливу флуктуацій цього нульового поля вакууму на електрон в атомі водню (Нобелівська премія 1955 р.).

Другим свідченням є *ефект Казимира*, передбачений у 1948 р. нідерландським ученим **Ф. Казимиром** і підтверджений експериментально через десять років. Йдеться про поляризацію вакууму квантованого поля, що виникає внаслідок зміни спектра нульових коливань при обмеженні об'єму квантування. Тож на одиницю площі двох провідних плоскопаралельних пластин, встановлених у вакуумі на взаємній відстані a , діє сила притягання $F = \left(\frac{\pi^2}{240}\right) \cdot (\hbar c / a^4)$: оскільки тангенціальна скла-

дова електричного поля на пластинках рівна нулю, тому і змінюється спектр нульових коливань. Конкретно при $S = 1 \text{ см}^2$, $a = 0,5 \text{ мкм}$ $F = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$.

Прийнявши факт реальності вакууму, звернемо увагу на таке. Із *принципу невизначеності* Гайзенберга випливає, що найнижча енергія квантово-механічного осцилятора (на відміну від класичного) не може бути рівною нулю, її найменше значення $\hbar\omega/2$. Інтегрування ж по всіх частотах ω веде до висновку, що енергія тут – безконечно велика. Щоправда, з міркувань фізичної осмисленості її обмежували значенням ε_{pl} .

Питання це, багатократно підсилене наявністю різних класів частинок, і тепер остаточно не з'ясоване. З одного боку, завдяки розвитку ідей суперсиметрії, є твердження, за яким енергія бозонних нульових коливань в точності компенсується від'ємною енергією ферміонних нульових коливань. А отже, енергія вакууму мала б бути рівною нулю. Не виключене однак (див. **А.Д. Долгов** і ін., 1988), що оскільки маси бозонів і ферміонів різні, точного скорочення вакуумної енергії немає.

Із розгляду всіх складових тензора імпульсу-енергії в рамках загальної теорії відносності випливає, що тиск p_e у вакуумному середовищі від'ємний. І пов'язаний він із густиною енергії ε_e так:

$$p_e = -\varepsilon_e = -c^2 \rho_e \quad (14.12)$$

Але, якщо «усе з вакууму», то звідки і як частинки отримують масу? Надіючись отримати відповідь на це питання, звертаємося до книги **Гордона Кейна** (1990 р., за наступні роки ситуація не стала істотно ліпшою). Тут не менше п'яти разів зустрічаємо таке: «Механізм появи ненульових мас... зветься механізмом Гігса. Математично він ясний, але фізичний його смисл все ще незрозумілий...» (с. 20). Або ж – «причини появи мас електрослабких частинок ще не з'ясовані» (с. 267). Як також: «Незрозумілою є фізика гігсового механізму в стандартній моделі. Це головна проблема, з якою зіткнулася сучасна фізика елементарних частинок. гігсів механізм входить істотною частиною до стандартної моделі, але запропоноване ним вирішення проблеми мас..., очевидно, найімовірніше є проміжним етапом на шляху до нової фізичної теорії» (с. 286).

Напевне, все з'ясується у теорії суперструн. «Та доки цього не зроблено», зупинимося на одному з варіантів опису ролі поля Гігса у породженні надважких X - та Y -бозонів (і відповідних античастинок), що мали б мати дробовий електричний заряд $(+\frac{4}{3}e$, де e – заряд електрона). «Стартовим» є стан Великого Об'єднання (ВО) – нерозрізнянності трьох взаємодій (електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій) при енергіях 10^{19} ГеВ (рис. 9.1).

Отже, у рамках Стандартної моделі було прийнято, що початковим станом еволюції речовини є вакуум, що спочатку температура $T > T_{ВО}$ і що в подальшому вона різко зменшується. Тому стійкість системи порушується, її властивості змінюються, з'являється бозе-конденсат Гігса (реалізується *фазовий перехід*), X - та Y -бозони набувають маси і сильна взаємодія відщеплюється.

Звичайно, виникає природне питання: «а що-було до моменту часу $t = 10^{-43}$ с?». Поки що фізика відповідає так: «на цьому рубежі безперервний потік часу обривається». Як образно висловився **І.Д. Новиков**, «річка часу дробиться тут на неподільні краплі»...

Фізика процесів, які розгортаються на ранній стадії еволюції, як також проблеми баріосинтезу та баріонної асиметрії

Всесвіту детально розглянуті у монографії М.Ю. Хлопова (2004 р.).

Об'єднання всіх чотирьох взаємодій проводиться з використанням ідей *суперсиметрії*. Важливі результати в розробці теорії явищ, що відбуваються при надвисоких температурах, типових для ранніх стадій еволюції Всесвіту, і відповідних космологічних досліджень одержано завдяки зусиллям багатьох учених. Грунтовний аналіз (і підсумок) їхніх результатів є в кн. Д.С. Горбунова та В.А. Рубакова.

Епізоди моделі «виходу Всесвіту з піни» вже ніби то «відомі» – з моменту часу $t = t_{Pl} = 10^{-43}$ с і відповідних йому інших планківських величин – просторового масштабу $l_{Pl} = 10^{-33}$ см і густини $\rho_{Pl} = 10^{94}$ г/см³. Їм відповідає особливий стан матерії в умовах (принаймні) Великого об'єднання (ВО), коли при температурі понад 10^{30} К, процеси електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій нерозрізнявані між собою.

Потенціальна енергія взаємодії частинок E_{Pl} «регулюється» особливим *скалярним полем Гіггса* (а точніше, полями Гіггса, введеними в квантову теорію поля у 1964 р. шотландським фізиком **П. Гіггсом**). Саме ці поля, взаємодіючи з елементарними частинками, породжують їхню масу, яка тим більша, чим сильніша взаємодія поля з частинкою. Кажуть, що частинки одержують масу, «проковтуючи» *бозони Гіггса* – «згустки» полів Гіггса. Цей механізм порівнюють із поглинанням чорнила промокаткою, де шматочки паперу – це окремі частинки, а чорнило – енергія поля Гіггса. Так скалярні поля виконують роль «спускових гачків», які стимулюють у певні моменти порушення симетрії фізичних станів, тобто відщеплювання спочатку сильної, а потім слабкої взаємодії.

Дуже ймовірно, що сценарій становлення нашого Всесвіту буде істотно змінений. І то – на принципово інших основах, з використанням нових математичних ідей і прийомів. А що математика тут вкрай складна, то за прикладом багатьох інших авторів ухилимося від їх обговорення, обмежившись лише якісною характеристикою цих ідей (див. **М. Грін, Дж. Шварц, Е. Вітген** («Теория суперструн» у 2-х т., М., 1990).

Стандартна теорія елементарних частинок – «найуспішніша з усіх фізичних теорій», бо, зокрема, «відтворює природу з точністю $10(-9)$. Однак «вона – наче будинок без даху, оскільки не в змозі дати відповіді на ряд надто важливих питань». І **Мічіо Кайку** у своїх книгах (2005, 2007 р.) про неї пише образно як про «поєднання мула, слона і кита» чи, в іншому місці, «африканського мурахоїда, кита і жирафи». Бо ця теорія нездатна «включити в себе» гравітацію. Далі, вона не пояснює, «навіщо природі» саме три покоління (родини) кварків і лептонів. А ще – вона потребує «введення вручну, ззовні» 19 констант для опису мас окремих елементарних частинок та інтенсивностей їх взаємодій (швидкість світла, сталу Планка, гравітаційну сталу та ін.).

Наприкінці ХХ ст. фізика, точніше – космомікрофізика, вийшла на якісно вищий рівень опису властивостей матерії – рівень суперструн. Найкраще про це написано у Передмові редакторів перекладу «Теорії суперструн» – **І. Ареф'євої та І. Воловича**: «Теорія суперструн – це сучасний варіант єдиної теорії фундаментальних взаємодій, іноді її навіть звать теорією всього суцього... Струна – це крива у просторі, тому теорія струн – це теорія кривих, тобто протяжних об'єктів... Зі зміною часу струна замітає певну поверхню, дія для струни вводиться дуже природно – це якраз площа заметеної поверхні. Взаємодія струн також вводиться дуже природним геометричним чином – вона пов'язана з процесами розриву і злипання струн... В теорії суперструн здійснився синтез різноманітних ідей і методів теоретичної і математичної фізики.

Теорія струн заторкує найглибші питання світобудови і є найбільше розробленою сучасною спробою відповіді на питання про природу фундаментальних взаємодій. Однак, незважаючи на великий інтерес до теорії і пречудові досягнення, слід сказати, що основні проблеми тут залишаються відкритими. З фізичної точки зору головна проблема – відсутність експериментальних передбачень... Також залишається нерозв'язаною фундаментальна задача побудови адекватного математичного формулювання в дусі польової теорії струн...»

Самі ж автори завершили 1-й том книги зауваженням: «Насправді хоча нам багато відомо про теорію струн, але головна її суть залишається прихованою. Нам невідомо, які принципи

об'єднують всі ті несподівані співпаданья, що роблять можливою теорію струн. Відповіді на такі питання можуть прийти з таких напрямків, звідки їх поки що ніхто не чекає».

Повторюючись, скажемо: з 1968 р. фізики здійснюють спробу розглядати елементарну частинку як об'єкт протяжністю l_{pl} . Тобто – у фізику введено новий (і несподіваний!) принцип: на найменшому, мікроскопічному рівні все складається з вібруючих волокон. І – вже немає мови про різні частинки, а йдеться про різні ноти, які звучать на фундаментальній струні. А різні моди коливань породжують різні маси і константи взаємодії. Чим більша амплітуда і менша довжина хвилі, тим більша енергія, а нею і визначається маса елементарної частинки.

Як вдалося з'ясувати, заміна точкових елементарних компонентів матерії струнами веде до усунення суперечності між загальною теорією відносності і квантовою механікою. Як хтось вдало висловився, теорія струн розплутує гордіїв вузол сучасної теоретичної фізики. Математичне ж узгодження рівнянь теорії струн досягають, якщо коливання струни відбувається в 11-вимірному просторі-часі: тут 10 просторових, з них сім компактифікуються – згортаються в кільця розміром l_{pl} . Щоправда, є теорії, в яких деякі з цих додаткових вимірів можуть простягатися на нескінченність. Ми їх, однак, не сприймаємо, бо «приковані до своєї 3-вимірної гіперповерхні». Теорія ж суперструн є частиною грандіозного синтезу, що має назву М-теорії (хтось каже – від слова «мембрана», інші – «містерія»).

Таким чином, «вперше в історії фізики є єдина теорія, яка може пояснити всі фундаментальні особливості, що є в основі будови Всесвіту» (Б. Грін, 2005). Щоправда, «поки що фізики використовують лише наближені варіанти цих рівнянь, і навіть ці наближені рівняння настільки складні, що дотепер вдається отримати лише часткові розв'язки». І далі: «Ми не знаємо, якими були початкові умови у Всесвіті. В нас навіть немає ідей, понять і мови, які слід використовувати для їх опису. На наш погляд, безумні початкові умови з безконечною енергією, густиною і температурою у стандартній та інфляційній моделях є ознакою

того, що ці моделі неправильні і дають неправильний опис справді тоді бувших початкових умов. Теорія струн дозволяє покращити опис, доказуючи, що такі екстремальні умови можна обійти. Однак ні в кого так і немає відповіді на питання, як усе розпочиналося насправді. Недостача наших знань поширюється навіть на грубший рівень: ми не знаємо, чи можна взагалі ставити питання про визначення початкових умов, або ж чи буде воно назавжди перебувати за межами будь-якої теорії, і ставити його так же безглуздо, як і намагатися за допомогою теорії відносності пролити світло на те, з якою силою кинуто м'яч...Сьогодні наш рівень розуміння космології в контексті теорії струн/М-теорії надто примітивний для того, щоб визначити, чи є гідним кандидат на «теорію всього» свого високого призначення і чи визначаються в його рамках початкові космологічні умови, які згодом можуть бути піднесені до рангу фізичних законів. Це – головна тема майбутніх досліджень» (Б. Грін, 2005, с. 236).

Слово С. Вайнбергу (2004 р.): «Це буде єдина фундаментальна теорія. Але поки що ніхто не знає, як записати рівняння цієї теорії. А головне – невідомо, які фізичні принципи керують такою фундаментальною теорією». Справді, скажімо, в основі загальної теорії відносності лежить принцип еквівалентності тяжіння й інерції!

Є припущення, що теорію струн не будуть формулювати «в рамках простору-часу». Так. **С. Вайнберг** говорить про необхідність змін наших уявлень про матерію, простір і час. Аналогічно висловився й **Е. Віттен**: «Поняття «час-простір» приречене, від нього, очевидно, доведеться відмовитися». Тож не надто й дивують слова Ш.Глешоу: «Ті, хто працює над суперструнами та іншими загальними теоріями, більше не займаються фізикою, тому що їхні розмірковування вийшли далеко за межі будь-якого емпіричного тесту. А отже положення теорій необхідно приймати на віру і, вперше з часів раннього середньовіччя, ми бачимо, як може закінчитися наш благородний пошук, коли віра ще раз замінить науку».

Труднощі, які виявили себе у згаданих тут теоріях та уявленнях про «фундамент світооснови», про «містично-

феєричні мандри ландшафтами, в окремих закутках яких навіть нема потреби в гіпотезі про інфляцію», висвітлив у згаданій праці **Л.Смолін**, сформулювавши «П'ять великих проблем теоретичної фізики». Це, однак, потребує індивідуального обдумування слухача/читача. Чи зможе кожен? Бо ось що записав у своїх «Спогадах» видатний російський учений, лауреат Нобелівської премії миру академік **А.Д.Сахаров**: «Я поставив своєю задачею вивчити теорію струн і суміжні теорії, а також вивчити теоретичні праці на стику космології і фізики високих енергій. Я не дуже надіюся на особистий творчий успіх..., але розуміти суть того, що, можливо, є черговою революцією у фізиці, – повинен прагнути!!!». Згодом же читаємо таке: «У грудні 1985 – травні 1986 р. я посильно займався цим; на жаль, наявність серйозних прогалин у моїх знаннях перешкодила мені досягнути бажаної мети»...

Ну, попри те, що «неможливо охопити неохопне», хтось та колись щось усе ж зможе: «зловити блошеня на блосі», «звеличити розум» – перед «лицем подальшої стадії демографічного вибуху, виснаження ресурсів планети аж до примітивних потреб виживання окремого представника *homo sapiens*»... І в цьому велич, але і трагедія як людської спільноти, так і окремої людини, яка вдивляється в глибини неозорого Космосу...

15. Антропний принцип

За останні 350 років масштаби світу, який вивчає астрономія, зросли у мільйон мільярдів разів. Людство стало на шлях звільнення від *антропоцентризму* (гр. *ανθρωπος* – людина) – уявлення, за яким Земля, а отже – і людина, займає у світі центральне місце.

Передусім, у 1543 р., **М. Коперник** «зрушив Землю»: у «центр світобудови поставив Сонце», Земля ж стала «рядовою» планетою. У 1918 р., **Х. Шеплі** довів, що Сонце перебуває не в центрі Галактики, а на її околиці, і що воно здійснює навколо нього оберт за 200 млн. років. І, нарешті, **Е. Хаббл** у 1924 р. виявив, що наша

Галактика – лише одна з багатьох подібних до неї зоряних систем. Три, одна за одною, «революції» в астрономії!

Для багатьох філософів осмислення явищ навколишнього світу, щоденна практична діяльність вели до висновку: все, що навколо, виникло з волі Творця, Майстра. У давніх греків ці висновки сформульовано як аргументи – *космологічний* і *телеологічний*. Перший із них філософ **Платон** (+347 до н.е.) подав у вигляді: **«Усе, що виникло, вимагає певної причини»**. Тобто, перед нами Всесвіт (космос) і має бути причина його появи, яка мала би бути поза ним. Телеологічний аргумент (гр. τέλεος – мета) формулюється так: **у навколишньому світі проявляється надзвичайно тонке допасування окремих параметрів та їхніх систем, і це знову ж таки не могло статися інакше, як за задумом Творця**.

«Зупинивши Сонце і зрушивши Землю», **Коперник** не захитав «небесної тверді». Тому, зокрема, Католицька Церква сприйняла його модель світу відносно спокійно. Але **Галілей** своїми логічними розмірковуваннями і вдалим асоціаціями переконливо довів, що «з усієї сукупності зір, які бачимо, не знайдеться й двох, які були б на однаковій відстані від Землі». Внаслідок цього, образно кажучи, кришталева сфера розкришилася на друзки. І людина залишилася віч-на-віч з безкрайнім, холодним, байдужим і навіть ворожим Всесвітом, місце перебування Творця в якому стало неозначеним. Її, людину, охопив переляк, вона відчула себе беззахисною і покинутою.

Наприкінці 20-го століття (березень 1998 р.), відзначивши успіхи у з'ясуванні таємниць мікро- і мегасвіту, Президент Російської Академії наук академік **Ю.С. Осипов** зазначив: «...сама наукова космологія ставить проблеми, які співвідносяться з обговорюваними у традиційній теології питаннями походження Всесвіту. Як мовиться, коло замкнулося і дуже сильно. Не випадково многі природодослідники і математики, почавши свої дослідження як люди невіруючі, кожен своїм шляхом, по-різному, але приходили врешті-решт до віри, бо створення будь-якої стрункої наукової системи неминуче веде до думки про існування, як кажуть у нашому середовищі, Абсолютного Буття».

Під цим кутом зору й розглянемо *антропний принцип* – науковий принцип, який стверджує, що *існування життя на Землі істотно залежить від найзагальніших властивостей Всесвіту*. Суть його з'ясовують ще й так: наявність життя, представником якого ми є, накладає на властивості Всесвіту низку сильних обмежень. Тобто: *Всесвіт не може бути іншим, ніж він є, оскільки ми існуємо*.

Одним із перших, у 1974 р., антропний принцип сформулював англійський астроном фізик **Брендон Картер** у формі: *«Ми існуємо, тому що Всесвіт такий, яким він є»*. Невдовзі почали його розглядати у двох варіантах (версіях).

За *слабкою версією*, те, що у Всесвіті існує розумне життя (ми), слід сприймати як експериментальний факт, який допомагає нам зрозуміти, чому та чи інша стала (константа) має саме таке, а не інакше значення.

Формулювання *сильного антропного принципу* жорсткіше: *«усі фізичні константи Всесвіту були точно підібрані (Творцем) так, щоб у нашому Всесвіті було можливим життя»*. Пол Девіс висловився так: *«Здається, що для створення Всесвіту хтось привів усі кількісні параметри у взаємну відповідність... Усе це створює грандіозне враження задуму»*.

Довгий час астрономи (у своїй же царині – фізики, хіміки, геологи) задовольнялися питанням: *«Як збудований світ?»*. Тепер же (зрештою, так ставив питання ще **Ляйбніц**) їх цікавить: *«Чому світ є саме таким?»* Бо ж навіть дуже невеликі зміни тих чи інших параметрів системи призвели б до катастрофічних наслідків.

Ось передовсім декілька прикладів, що стосуються умов на нашій планеті:

1. Вісь добового обертання Землі нахилена до площини, в якій планета рухається навколо Сонця, під кутом $66,5^\circ$, тим самим забезпечується на Землі зміна пір року, істотно злагіднюється клімат планети.

2. Дивовижні властивості має вода, ця головна складова частина усіх живих організмів. Ось одна з них: якщо у всіх тіл при зменшенні температури густина зростає, то для води вона

найбільша при температурі плюс чотири градуси. Тому лід, як легша компонента, утримується на поверхні води. Внаслідок цього у водоймах під льодом зберігається температура, яка є достатньою для підтримування рослинного і тваринного життя. Інакше лід випадав би на дно, вся вода вимерзла б і життя в ріках, морях та океанах гинуло б.

3. Атмосфера Землі складається з таких газів і в такому співвідношенні, які найкраще сприяють життю на планеті. Справді, якби концентрація кисню тут була не 20,9% (за об'ємом), а, скажімо, 50%, то все, що може горіти, давно згоріло б. А коли кисню було б менше за 10%, то горіння стало б узагалі неможливим.

4. В атмосфері Землі є усього 0,03% вуглекислого газу і «сліди» (близько 0,23%) водяної пари. Але якраз їхні молекули інтенсивно поглинають інфрачервоне випромінювання земної поверхні і приблизно половину його «переадресовують» назад на неї, де це випромінювання знову поглинається. Внаслідок цього тут виник «парниковий ефект»: середня температура біля земної поверхні досягла +15° Цельсія. Без цього ефекту вона була б на 40° нижчою, тобто усього -25°С. І, річ ясна, вода на Землі легко перетворилася б у сніг і лід. А що сніг відбиває від 45 до 95% енергії сонячних променів, то таке охолодження призвело б до того, що вся наша планета залишилася б безмовною сніговою пустелею.

5. В атмосфері Землі, на висотах від 15 км до 80 км (найбільше – на висоті біля 25 км) є молекули озону (там кисень частково об'єднується в триатомні молекули). Загальна кількість цих молекул нікчемно мала. Так, якби їх зібрати біля поверхні Землі при температурі і тиску, типових для земної атмосфери, то товщина шару озону становила б усього 2,5 міліметра. А проте він відіграє величезну роль у збереженні всього живого на Землі, поглинаючи вбивчі ультрафіолетові промені Сонця.

А ось декілька прикладів того, як «підібрані» параметри нашого світу у «великому масштабі»:

1. Маса електрона у 1840 разів менша за масу нейтрона (у 1836 разів менша від маси протона). Як доведено, коли б вона була усього лише в три рази більша, то електрон не зміг би

«кружляти» навколо протона, утворюючи в сукупності атом водню, він мусив би «впасти» на протон. А тоді у Всесвіті протонів (і атомів водню) не було б зовсім. Зорі й галактики склалися б з одних лише нейтронів. Не було б атомів і молекул, не було б усієї багатоманітності навколишнього світу.

2. Приймаючи за одиницю виміру маси електрона, кажемо, що протон має їх 1836 одиниць, тоді як нейтрон 1840. Виникає питання: а що коли б ця різниця мас між нейтроном і протоном була удвічі більша (наприклад, нейтрон 1840, протон – 1830)? Виявляється, у цьому випадку протон не міг би об'єднуватися з нейтроном, щоб утворити дейтрон. А тому не могли б відбуватися реакції синтезу гелію та важчих хімічних елементів. Тоді Всесвіт складався б з одного лише водню, не було б усіх складніших елементів – гелію, а особливо вуглецю, кисню, заліза... Словом, усього того, що є основою для будівництва планет і живих організмів.

3. Ядра гелію та інших елементів утримуються як єдине ціле тому, що між протонами і нейтронами, з яких вони складаються, діють сили, що їх «цементують». Якби ця сила взаємодії між нуклонами (така загальна назва протонів і нейтронів) була хоча б на 5-7% більшою, то протони і нейтрони зразу після їх появи об'єдналися б у гелій. І цей елемент був би єдиним у Всесвіті. І навпаки, якби та сила взаємодії була на якихось 5% меншою, то гелій взагалі утворюватися не міг би і Всесвіт був би чисто «водневим».

4. У ядрах протони не лише притягуються взаємно завдяки дії ядерних сил, а й відштовхуються (бо ж це однойменні електричні заряди!). І коли б ця електрична сила відштовхування була дещо більшою, то ядра розвалювалися б. Отже, знову таки, увесь навколишній світ складався б лише із найпростішого елемента – з водню.

5. У масштабах нашої Сонячної системи і нашої Галактики вирішальною, об'єднуючою є сила тяжіння. Величиною сталої гравітації G визначається і температура в надрах Сонця та зір. Як з'ясовано, коли б ця сила тяжіння була, наприклад, у десять разів більшою (а теоретично це не заперчується ніякими вимо-

гами чи міркуваннями), то «запаси пального» в надрах Сонця вичерпалися б не за мільярди років, а всього за декілька мільйонів. І на місці Сонця на сьогодні вже була б дуже слабка зоря білий карлик, промені якої нас аж ніяк не зігріли б. Зрештою, при такій великій силі тяжіння наша планета мала б значно менші розміри, та й умови на ній навряд чи були б привабливі.

6. Наш простір тривимірний. Чому саме «реалізовано» якраз таке число вимірів, при якому можуть існувати стійкі планетні системи?

7. Нарешті, повертає факт розширення світу галактик, тривалість якого істотно залежить від середньої густини речовини у Всесвіті. Якби розширення тривало значно менше (тобто якби середня густина речовини була більшою), то не встигли б сформуватися галактики, зорі і планети, бо розширення давно вже змінилося б стискуванням. Якби ж ця середня густина була меншою, то зорі (і Сонце) не змогли б сформуватися...

8. Для багатьох вчених дивовижно високий рівень взаємної допасованості (близько 30 параметрів, якими визначається стабільність усіх рівнів буття Всесвіту), є доказом створення цього Всесвіту Творцем. Про це 200 років тому сказав **Лейбніц**: «Бог є тим розумом, котрий створив наш старанно спланований світ». Далі він підкреслив, що є дивна гармонія між реальним світом і світом математики. Справді, фундаментальні закони природи формулюються, записуються за допомогою математичних символів.

9. Тут передусім звернемо увагу на винятково влучне висловлювання Нобелівського лауреата з фізики (1965 р.) **Джуліана Швінгера**: «Є синдром, що вражає кожне покоління фізиків: нездоланне бажання одержати відповіді на всі фундаментальні питання ще за їхнього життя».

А. Айнштайн же з гумором зауважив: «Природа показує нам лише хвіст лева. Але я не сумніваюся, що лев там є, навіть якщо він не може відразу показатися через свої величезні розміри».

І справді – вдумаймося: внаслідок фантастично стрімкого роздування у перші миті становлення Всесвіту його масштаби

сягнула величини 10^{10^8} см, астрономи ж за допомогою найпотужніших 11-метрових телескопів вивчають його до відстаней 10^{28} см! Співставимо ці нулі: 100 мільйонів проти 28! Як не згадати того Жака, який прожив безвиїзно в Парижі і якоїсь днини видряпався на вершок Ейфелевої вежі (її висота 300 м.) та щасливо закричав: «Я вже побачив увесь світ» – у радіусі всього лише 62 км.. Не побачив він білих ведмедів... А лише краєчок хвоста та ще й невідомо якого звіра!

Упродовж близько ста років, від середини ХІХ ст., небо над фізиками було затьмарене трьома *парадоксами* – фотометричним, гравітаційним і термодинамічним («тепловою смертю»). Врешті-решт усвідомлено: не можна певне знання (закони), отримане (встановлене) у нашому закапелку, поширювати «на весь безконечний Всесвіт»! Як у просторі, так і в часі, так і в обговоренні властивостей-характеристик того, що звемо речовиною, елементарними частинками, взаємодіями, загальніше – можливостями того чи іншого розділу науки, передусім квантової механіки.

Космос живих форм на Землі. Серед незліченної кількості питань, що стосуються «космосу живих форм», особливо важливі чотири: 1) сама *поява життя* на Землі, 2) зростання складності, тобто те, що назване *еволюцією* життя, 3) проблема *архітектурного плану*, за яким «самобудується» конкретний організм, і 4) *місце людини* серед інших істот.

Як відомо, головним *будівельним матеріалом* живих організмів є *білки*, *інформація «про все» записана у хромосомах*, точніше – в *молекулі ДНК*. Білки збудовані із 20 амінокислот (АК), хоча їх загалом у природі є близько 200.

І тут зразу виникає питання. Ті, хто «сповідує» атеїзм, мали б пояснити, як – без Творця, а отже, сліпо-глухо-німа – природа, «всліпу» перебираючи усі можливі (а як інакше?) варіанти, може «змонтувати» для кожного конкретного організму потрібні йому понад сто видів різних білків? Формула для числа варіантів проста: $W = n^N$, тут N – кількість АК, з яких складається молекула білка, $n = 20$ – кількість «цеглинок» – амінокислот, з яких вона «монтується». У найпростішому випадку $N = 100$.

Отже число варіантів $W = 20^{100} = 10^{130}$! Найпростіша АК складається із 10 атомів. Отже їх, атомів, потрібно 10^{131} , у всьому ж доступному для спостережень Всесвіті їх налічують усього 10^{80} . Насправді ж, якщо попередньо обчислити варіанти для «монтування» самих АК (і то не 20, а всіх 200!), замість 131 нуля матимемо 300 (якщо обчислюємо лише для 20 АК) і понад 700 у загальному випадку.

Як бачимо, ні про яке «монтування білків всліпу» та «перебирання усіх варіантів» не може бути й мови. Тому й сказав англійський астроном **Фред Хойл** так: «Та не мучилася природа всліпу. Бо від початку Надінтелект дав їй програму!»

Ще страшніші (не побоїмося цього слова) числа отримуємо, розглядаючи «випадкове монтування» молекули ДНК. «Літер» («цеглинок») тут усього чотири ($n = 4$), але число їх пар (що є «щаблями» у «драбинці» ДНК) сягає десяти мільярдів: $N = 10^{10}$. Отже, варіантів буде... одиниця і за нею шість мільярдів нулів!

Тож зрозуміло, що як молекули білка, так і ДНК (це особливо, бо йдеться про фантастичну концентрацію інформації в мікроскопічному об'ємі!) не могли б утворитися внаслідок (випадкового!) «монтування самих себе».

Здається, найкраще про це сказав **Стівен Мейєр (США)**, відомий природодослідник і філософ: «Упродовж усього XIX століття вчені вважали, що існують два основні фактори – матерія та енергія. На початку XX століття з'явився третій наріжний камінь, з яким повинна рахуватися наука, – це *інформація*. Коли ми маємо справу з біологією століття інформації, виникає й міцнішає розуміння того, що *молекула ДНК є реальним доказом розуму, реальним доказом інтелекту*. Це те, що може бути поясненим лише за допомогою уявлень про розумний задум».

І ще: «Відомо, що розумні істоти можуть створювати інформаційно насичені системи. *Наші* (взагалі людські) *докази ґрунтуються не на тому, чого ми не знаємо, але на тому, що ми знаємо* про причинно-наслідкову структуру світу. *Нам невідомі природні причини появи інформації*. Цей процес не можна пояснити з матеріалістичної точки зору, – у всякому разі, це не

природній добір, не процеси самоорганізації і не випадковість. Нам, однак, *відомий один фактор, справді здатний породжувати інформацію, й цей фактор – розум*. Тому, коли люди з наявної інформації в ДНК роблять висновок про наявність задуму, вони, з погляду історичної науки, доходять правильного й очевидного висновку. Коли ми знаходимо інформаційно насичену систему в клітині, точніше, в молекулі ДНК, ми можемо зробити висновок, що вирішальну роль у появі такої системи відіграв розум».

Завершити ж ці роздуми, напевне, доцільно словами: «Світ дуже складний, і людський розум явно не в змозі повністю збагнути його. Саме тому людина придумала штучний прийом: у складній природі світу звинувачувати те, що прийнято іменувати випадковістю, і, таким чином, змогла виділити царину, яку можна описати за допомогою простих закономірностей. Складнощі отримали назву початкових умов, а те, що абстраговане від випадкового, – законів природи» (Юджин Вігнер, Нобелівський лауреат).

«Я мав можливість проконсультуватися із 40 фізиками-теоретиками. Мої колеги, незважаючи на різноманітність їх поглядів, притримуються принаймні одного переконання. Усі визнають, що \$\$\$ми не розуміємо природи матерії, законів, які керують нею, і мови, якою вона може бути описана» (Роберт Опенгеймер).

І хоча від часу, коли прозвучали ці слова, минуло більше 50 років, їх актуальність, з огляду, зокрема, на проблему «темної маси» і «темної енергії», «проблем суперсиметрії та супергравітації» є незмінною!

Насамкінець не можна не згадати про *велике здивування* видатного астрофізика **Й.С.Шкловського**: *Всесвіт мовчить*, нізвідки нема якихось сигналів, які б ми не могли пояснити природними причинами/механізмами. Отже, ми, можливо, – єдині в ньому. Певного часу був оптимізм (*ейфорія!*), і цю проблему названо *SETI* – «Зв'язок із позаземними цивілізаціями», згодом її перейменовано на *SETI* – «Пошук позаземних цивілізацій». Насьогодні уже виявлено близько тисячі планет біля інших зір. Але «це не те» – бо *мовчанка*.

Література

Архангельская И.В. Космология и физический вакуум / И.В. Архангельская, И.Л. Розенталь, А.Д. Чернин. – М.: УРСС, 2006. – 216 с.

Бисноватый-Коган Г.С. Релятивистская астрофизика и физическая космология / Г.С. Бисноватый-Коган. – М.: Красандр, 2011. – 376 с.

Вайнберг С. Первые три минуты / С. Вайнберг. – М.: Энергоиздат, 1981. – 210 с.

Гинзбург В.Л. О теории относительности / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1979. – 238 с.

Горбунов Д.С. Введение в теорию ранней вселенной / Д.С. Горбунов, В.А. Рыбаков. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 522 с.

Грин Брайан. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски / Брайан Грин. – М.: УРСС, 2005. – 288 с.

Грин М. Теория суперструн. Т.1. / М. Грин, Дж. Шварц, Э. Виттен – М.: Мир, 1990. – 518 с.

Долгов А.Д. Космология ранней Вселенной / А.Д. Долгов, Я.Б. Зельдович, М.В. Сажин. – М.: Изд. МГУ, 1988. – 199 с.

Засов А.В. Общая астрофизика / А.В. Засов, К.А. Постнов. – М.: Фразино, 2006. – 454 с.

Зельдович Я.Б. Строение и эволюция Вселенной / Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков. – М.: Наука, 1975. – 736 с.

Крамаровский Я.М. Синтез элементов во Вселенной / Я.М. Крамаровский, В.Д. Чечев. – М.: Наука, 1987. – 160 с.

Латыпов Н.Н. Вакуум, элементарные частицы и Вселенная / Н.Н. Латыпов, В.А. Бейлин, Г.М. Верешков. – М.: Изд. МГУ, 2001. – 226 с.

Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология / А.Д. Линде. – М.: Наука, 1990. – 276 с.

Лукаш В.Н. Физическая космология / В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева. – М.: ФМЛ, 2010. – 404 с.

Физика элементарных частиц / Л.Б. Окунь. – М.: Наука, 1988. – 272 с.

Фридман А.А. Мир как пространство и время / А.А. Фридман. – М.: Наука, 1965. – 112 с.

Яцків Я.С. Загальна теорія відносності: випробування часом / Я.С. Яцків, О.М. Александров, І.Б. Вавилова. – К.: ГАО НАН У, 2005. – 288 с.

Кайку Мічіо. Гіперпростір / Мічіо Кайку. – Л.: Літопис, 2005. – 458 с.

Хлопов М.Ю. Основы космомикрoфизики / М.Ю. Хлопов. – М., 2004. – 368 с.

Для нотаток

Навчальне видання

Іван Антонович Климишин

Основи космології

Підп. до друку 4.03.2014 р. Формат 60x84/16.
Папір офсет. Друк цифровий. Гарнітура Times New Roman
Умов. др. арк. 9,53. Наклад 100 прим.

Віддруковано у видавництві «Симфонія форте»
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Крайківського, 2.
Тел. (0342) 77-98-92

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців та виготівників видавничої продукції: серія ДК № 3312 від 12.11.2008 р.