

І.А.Климишин

# РЕЛЯТИВІСТСЬКА АСТРОНОМІЯ

Івано-Франківськ  
2007 р.

УДК 523.11(021)

Климишин І.А. **Релятивістська астрономія.** – Івано-Франківськ: Гостинець, 2007 – 208 с.

У популярній формі викладено ідеї спеціальної та загальної теорії відносності. Обговорено застосування цих ідей в астрономії, зокрема, при з'ясуванні проблеми чорних дір і побудови моделі Всесвіту.

Для учителів фізики й астрономії, студентів і викладачів ВНЗ, також – для найширшого кола аматорів астрономії.

#### **Україномовне видання**

(Видавництво «Наукова думка», 1980 р.)

*Рецензенти:* доктор філос. наук С.Б.Кримський,  
доктор фіз.-мат. наук В.Г.Писаренко.

*Науковий редактор:* доктор фіз.-мат.наук О.Ф.Богородський.

*Редактор:* В.П.Плачинда.

*Завідувач редакції* А.Є.Денщиков.

#### **Російськомовні видання**

(Видавництво «Наука», ГРФМЛ, 1983 р. і 1989 р. доповнене)

*Перекладач:* В.В.Босович.

*Рецензент:* доктор фіз.-мат. наук І.Д.Новиков.

*Науковий консультант:* доктор фіз.-мат. наук Д.К.Надьожин.

*Науковий редактор:* доктор фіз.-мат. наук В.С.Імшенник.

*Редактори:* Г.С.Куликов, Т.Г.Борисова.

*Завідувач редакції* І.Є.Рахлін.

ISBN

© Видавництво «Гостинець», 2007

# ЗМІСТ

ВІД АВТОРА .....	5
<b>1. ДРАМА КЛАСИЧНОЇ КОСМОЛОГІЇ .....</b>	<b>8</b>
Пошук античних філософів .....	8
Здобутки ренесансу .....	12
Тріумф і невдача Ньютона .....	15
Про моделі тяжіння .....	22
Космологічні парадокси .....	28
<b>2. СЮРПРИЗИ ЧОТИРИВИМІРНОГО СВІТУ .....</b>	<b>32</b>
Біля колиски «страховиська» .....	32
Два постулати Ейнштейна .....	36
Перетворення Лоренца .....	39
За межі «здорового глузду» .....	41
Про трансцендентні тахіони .....	45
Формула століття .....	46
Ілюзія «надсвітлових» рухів .....	48
<b>3. «...БІЛЬШЕ МАТЕМАТИКИ» .....</b>	<b>50</b>
Чотиривимірний світ Мінковського .....	50
Неевклідові геометрії .....	53
Елементи тензорного аналізу .....	57
Якісна геометрія .....	63
Відносність ... нескінченності .....	67
Про розмірність світу .....	72
<b>4. ДО ТЯЖІННЯ БЕЗ СИЛИ .....</b>	<b>77</b>
У ліфті і поза ним .....	80
Фундаментальні рівняння Ейнштейна .....	85
Експериментальна перевірка теорії .....	88
Пошук гравітаційних хвиль .....	93
Про альтернативні варіанти .....	98

<b>5. ЧОРНІ ДІРИ.....</b>	<b>102</b>
Гравітаційний радіус тіла .....	102
Релятивістський гравітаційний колапс .....	106
З двох різних поглядів .....	109
«Чорні діри не мають волосся» .....	114
Коли ж чорні діри світяться? .....	119
Кандидати у чорні діри .....	121
Термодинаміка чорних дір. ....	123
<b>6. РЕЛЯТИВІСТСЬКІ МОДЕЛІ ВСЕСВІТУ .....</b>	<b>127</b>
Моделі статичного світу .....	127
Динамічні рівняння Фрідмана .....	131
У рамках класичної теорії .....	137
Декілька нестатичних моделей .....	141
Діаграма Габбла .....	146
Фотометричні ефекти .....	151
<b>7. СПОСТЕРЕЖНІ АСПЕКТИ КОСМОЛОГІЇ .....</b>	<b>153</b>
Реліктове радіовипромінювання .....	153
Проблема «прихованої маси» .....	157
Оази в пустелі .....	160
Загадка «великих чисел» .....	163
Розширення ... з прискоренням .....	168
Шкала ядерної хронології .....	170
<b>8. ВСЕСВІТ: СЦЕНАРІЙ ЕВОЛЮЦІЇ .....</b>	<b>174</b>
Посталий «з піни» .....	174
Роздувний Всесвіт .....	179
Асиметричний і майже плоский .....	182
«Стандартна модель» Всесвіту .....	187
Всесвіт: проблема структуризації .....	191
Антропний принцип .....	197
ЗАМІСТЬ ПІСЛЯМОВИ .....	202
ЛІТЕРАТУРА .....	203
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК .....	205

## ВІД АВТОРА

Цим виданням «Релятивістської астрономії» автор, очевидно, вже завершує свою «скромну просвітницьку діяльність». А отже, тут буде своєчасним і доречним згадати й уточнити, як і завдяки кому ця книжка була написана.

Отож, ще в процесі редакційної підготовки «Астрономии наших дней» (замовленої мені у 1973 р. зав. ред. Видавництва «Наука» І.Є.Рахліним) перші читачі рукопису – С.А.Каплан (мій науковий керівник і в подальшому науковий консультант) і В.Г.Курт (рецензент АНД) якнайвище оцінили її заключний розділ «У калейдоскопі буття», де йшлося якраз про задачі й проблеми космології.

АНД вийшла з друку в 1976р. І якраз саме тоді, дізнавшись про мої (чергові і не безпричинні) хвилювання щодо того «здоровий я чи ні» (адже позаду майже три роки лікувальних закладів – «придушвання кавернозного туберкульозу легень»), С.А.Каплан переконливо порадив: «Не думай про це, пиши книжку» (мав на увазі саме «Релятивістську астрономію»). Що я й почав робити влітку 1977 р.. Київське видавництво «Наукова думка», щасливо для автора, призначило її науковим редактором О.Ф.Богородського – директора АО КДУ, відомого спеціаліста і автора двох книг на цю тему. Це дало змогу у первісний варіант книги вставити, кажучи словами А.Ейнштейна, «більше математики» (влітку 1978 р., книжка опублікована 1980 р.).

Мабуть, певне вдале поєднання «популяризації і математизації» стали причиною того, що В.В.Соболев зразу ж повів мову про перевидання «Релятивістської астрономії» видавництвом «Наука». Ця думка була підтримана Я.Б.Зельдовичем, схвальну рецензію написав І.Д.Новиков, низку цінних порад висловив Д.К.Надьожин, науковим редактором призначено В.С.Імшенника. Книга з'явилася «у світ» 1983 (і друге видання 1989 р.). Невдовзі прихильну рецензію на неї написав А.Д.Чернін.

У Передмові Редактора до видання 1983 р. є, зокрема, такі слова «Автор книги І.А.Климишин з великою письменницькою майстерністю, із захватом та ентузіазмом знайомить читача з тим, якою мірою вічні проблеми простору, часу, тяжіння виявилось можливим розв'язати на основі розвитку спеціальної та загальної теорії відносності... Йому безперечно вдалося добре розповісти про видатні досягнення, про ва-

жкі і ще не вирішені проблеми... релятивістської астрофізики... І.А.Климишин... рішуче вводить у свій виклад непростий і водночас витончений математичний апарат релятивістської теорії, а за глибоким переконанням редактора лише так і можна пояснити справжній смисл і зміст сучасної релятивістської астрофізики... У більшості випадків наведені математичні формули цілком зрозумілі і без звертання до першоджерел, і це – досягнення автора. Невелика їх частка дана без виведення, але і тоді вибрані найважливіші зі справді безкрайнього моря математичних формул релятивістської астрофізики, ті, які гідні уваги зацікавленого читача». Загалом це «захоплююча популярна книга про велике і драматичне пізнання людством фундаментальних властивостей навколишнього світу». Цей висновок В.С.Імшенник повторив і в передмові до другого видання книги.

З часу появи другого російськомовного видання «Релятивістської астрономії» сплило 17 років, і багато дечого в ній, безумовно, застаріло. Тож автор був дуже здивований тим, що на неї і тепер посилаються у поважних виданнях (як ось Н.Н.Латипов, В.А.Бейлін, Г.М.Верешков у кн. «Вакуум, елементарні частинки і Всесвіт», вид. Моск. ун-ту. 2001). З інтернету «витягнуто» декілька зовсім недавно написаних рецензій, зокрема ось ця (щоправда, анонімна): «Монографія... є цінним виданням з будь-якої точки зору: наукової, популярної і пізнавальної. Книга стане прекрасним навігатором у світ релятивістської астрономії, космології і навіть філософії. Як передусім популярне видання, що має роз'яснювальне завдання, монографія має величезну наукову цінність, оскільки може бути оцінена з методологічної, критичної до різних підходів точки зору. Її можна також рекомендувати як цінне видання для вивчення загальної і спеціальної теорії відносності, викладу яких присвячена більша частина книги». Ці схвальні відгуки і заохотили автора здійснити україномовне перевидання книжки.

Зауважимо, однак, що перед читачем – злегка виправлений текст видання 1989 р. Бо астрономія «на грані ХХ – ХХІ ст.» – це стрімкий лет у безмежжя Всесвіту. Зокрема, – це телескопи з діаметрами дзеркал 8 – 10 метрів (фантастика?, але їх на початок 2004 р. налічувалося 14!!). Це космічні апарати, які кружляють навколо Землі чи долітають до Сонця або ж мчать за межі Сонячної системи, безперервно передаючи інформацію. Це надчутливі приймачі цієї інформації «із коефіцієнтом корисної дії 100 %». А отже, – це вибух, це стан, коли «вся астрономія

працює на космологію». Осмислювати все це теоретики фактично не встигають. І не випадково Стівен Хокінг сказав (орієнтовно) таке: «Професор ВНЗ, викладаючи певну космологічну ідею, навіть не підозрює, що її автор від неї давно вже відмовився»..., тож і написати таку книгу треба заново і ... комусь молодому.

На щастя, знаходяться ентузіасти, які наважуються зробити «для початку» певний «огляд стану на визначений відрізок часу». Для читача в Україні таким оглядом є книга Я.С.Яцківа, О.М.Александрова, І.Б.Вавилової та ін. «Загальна теорія відносності: випробування часом» (К., ГАО НАН України, 2005).

Найновіші дані про сучасний стан космології читач «у наші дні» може отримати з мережі Інтернету.

Упродовж багатьох років автор зберігає у своєму серці почуття найщирішої подяки тим, хто заохочував до праці над цією книгою. Хто допомагав писати її перші рядки, покращувати початкові її варіанти, хто рецензував, редагував, видавав. Автор перелічував їхні імена у передмовях до кожного видання.

Сьогодні ж автор щиро вдячний ректору Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника професору Б.К.Остафійчуку, директору Інституту Природничих наук ПНУ професору В.М.Кланічці, друзям-співробітникам кафедри теоретичної і експериментальної фізики, студентам-фізикам 4-го курсу (2005/2006 навч. року – староста Г.В.Войтків) і, особливо, В.І.Пронику, за багатогранну допомогу у підготовці цього, а також і електронного видання книги. Це останнє є на сайті Наукової бібліотеки Прикарпатського НУ за адресою <http://www.pu.if.ua>

*Жовтень 2006 р.*

# 1. ДРАМА КЛАСИЧНОЇ КОСМОЛОГІЇ

## Пошук античних філософів

Космос... Мовою мешканців Давньої Еллади це слово означало «оздоба», «прикраса». Згодом вони стали називати так і весь навколишній Всесвіт. Привабила їх, мабуть, не лише краса зоряного небосхилу, а й дивна гармонія рухів на ньому «блукаючих світил» – планет.

Давньогрецьких філософів цілком слушно можна назвати основоположниками *космології* – науки про Всесвіт, про закономірності його будови й розвитку. Бо ж хоча більшість їхніх уявлень про небо була наївною, але трапляються серед них і справжні перлини. Таке проникнення у таємниці світобудови не може не дивувати й нас. Тут найпримітивніші уявлення про закономірності руху «земних» і «небесних» тіл співіснують з глибокими роздумами про властивості простору й часу.

То ж доречно нам передовсім оглянутися на шлях, пройдений за останні два з половиною тисячоліття, тим більше що давні філософи зформулювали низку питань, навколо яких ще й дотепер точаться суперечки і котрі безпосередньо стосуються проблем сучасної космології.

Саме у Давній Греції виникло уявлення про безконечність простору і часу. Щоправда, більшість давньогрецьких філософів вважала світ обмеженим у просторі. Наприклад, у діалогу «Тімей» філософ **Платон** (427 – 347 рр. до н. е.), маючи на увазі Бога-Творця, каже так: «Обриси ж він надав Всесвіту такі, які були б для нього пристойні і йому споріднені... Отож він шляхом обертання округлив космос до стану сфери, поверхня якої скрізь однаково віддалена від центра».

Правильність такого погляду «обґрунтовував» **Аристотель** (384 – 322 рр. до н. е.) на підставі фізичних міркувань. Він розмежував «земне» і «небесне». «Земна» частина світу мала б складатися з чотирьох елементів – землі, води, повітря і вогню, які в такій послідовності і розташовуються один над одним у вигляді концентричних сфер. Кожен з елементів, змістившись зі свого «природного» місця, намагається знову зайняти попереднє положення. Тому, мовляв, у природі й спостерігається рух важких елементів униз, а легких угору, де вони переходять у стан спокою. Усі ж небесні тіла складаються з «неземного», п'ятого елемента («квінта ессенція») – ефіру. Всесвіт, за Аристотелем, скінченний, бо інакше, мовляв, один з його елементів мав би бути безконечний, а тоді не залишилося б місця для інших. Крім того, нескінченне не



може мати центра, а Всесвіт повинен мати його, бо «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». Сферичність Всесвіту Арістотель доводив тим, що він досконалий, а сфера – єдина досконала фігура. Крім того, при своєму обертанні сфера завжди займає той самий простір... Радіус Всесвіту (відстань до сфери зір) мав би бути... у дев'ять разів більший, ніж відстань від Землі до Сонця.

У той же час давньогрецький філософ **Демокріт** (бл. 460 – 370 рр. до н. е.) висловив думку, що простір («порожнеча») безконечний. Його погляд згодом прокоментував **Іоанн Філіпон** (VI ст. н. е.): «Демокріт приймав існування безконечних світів, вважаючи, що порожнеча безконечна. Бо на основі якого принципу розподілу одна частина порожнечі була б заповнена якимсь світом, а інші – ні? Отже, якщо світ існує в якій-небудь частині порожнечі, то, очевидно, і в усій порожнечі. А що порожнеча безконечна, то безконечними будуть і світи». Про те ж писав і давньоримський філософ **Тіт Лукрецій Кар** (бл. 99 – 56 рр. до н. е.) у своїй поемі «Про природу речей»:

Краю ніякого з жодного боку Всесвіт не має...

Де б ти не був, скрізь, з того місця, яке ти займаєш,

У напрямках всіх він лишається все безконечним.

Для античних учених простір був «місцем», «посудиною», яка, за словами Арістотеля, «не має нічого спільного з предметами, що в ній містяться». Тим самим вони проголосили незалежність простору від матерії. Давні філософи міркували і над питанням, який цей простір – неперервний, тобто подільний до безконечності, чи дискретний, що складається з окремих «атомів». Так, **Анаксагор** (бл. 500 – 428 рр. до н. е.) твердив, що «і в малому немає найменшого, але завжди є менше», звідки випливала можливість необмеженої подільності.

З другого ж боку, за уявленнями **Левкіппа** (бл. 500 – 440 рр. до н. е.) і **Демокріта**, як матерія, так і простір складаються з атомів скінченних розмірів. Аналогічно послідовники **Піфагора** (бл. 580 – 500 рр. 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.

У світлі сказаного стає зрозумілим твердження творця першої геліоцентричної системи світу **Аристарха Самоського** (бл. 310 – бл. 250 рр. до н. е.), що «коло, по якому... обертається Земля, так відноситься до відста-

ні нерухомих зір, як центр сфери до її поверхні», бо ж тут центр сфери уявляється у вигляді «геометричного атома скінченних розмірів».

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»). Думку про те, що час складається з окремих миттєвостей, обгрунтував римський учений **Марціан Капелла** (V ст. н.е.). Згодом, у XII ст., єврейський філософ-ідеаліст **Маймонід** (1135 – 1204) вважатиме, що Всесвіт існував би лише в один з цих моментів, якби Бог неперервно не відновлював його. Того самого погляду, нібито «Аллах щомиті творить світ заново», дотримувалися й окремі арабські філософи.

Тут доречно згадати й про відомі апорії **Зенона Елейського** (V ст. до н.е.). Сьогодні важко сказати, з якою метою він їх складав (апорія в перекладі означає «суперечність у міркуванні, яка здається непереборною»), невідомі також і первісні варіанти цих своєрідних творів. Але й дотепер апорії Зенона привертають увагу філософів. Загальновизнано, що вони мали величезний вплив на розвиток науки.

Апорії поділяються на дві групи. У першій час і простір розглядаються як дискретні, що складаються з неподільних малих одиниць. У другій їх мають за подільні до нескінченності. Зокрема, апорія «Стріла» зпрямована проти твердження, що час складається з неподільних моментів, бо в цьому випадку нібито рух неможливий. І навпаки, в апорії «Ахілл і черепаха» Зенон підкреслював, що рух неможливий також, коли час і відповідно простір нескінченно подільні. Ось як звучать ці апорії.

*Апорія «Стріла».* Стріла, що летить, перебуває у спокої. Справді, коли будь-яке тіло, котре перебуває у спокої, займає рівний йому об'єм і коли всяке тіло, яке летить, в будь-який момент часу займає об'єм, рівний самому собі, то воно не може рухатися.

*Апорія «Ахілл і черепаха».* Ахілл, який наздоганяє черепаха, ніколи не пережене її. Передовсім він повинен досягнути місця, де вона вже перебуває. За цей час черепаха відійде уперед, і Ахілл повинен наздоганяти її знову, а черепаха скористається цим, щоб пройти наступний відрізок шляху. Він неперервно наближається до черепахи, але ніколи не наздожене її.

Давньогрецькі філософи порушили питання і про тривалість існування світу. За Аристотелем, Всесвіт мав би бути обмеженим у просторі, але вічним у часі. Правда, Аристотель зауважив, що «розгляд безконечного має свої труднощі, оскільки багато неможливого постає і з визнання і з заперечення його існування...». **Платон** у «Тімеї» писав, нібито деміург (творець), надаючи форму й порядок первісній матерії, що перебувала у стані хаосу, «надумав створити деякий рухомий образ вічності і ось, влаштуваючи заразом небо, створює... вічний образ, який бере свій початок у числі (обертається за законами числа) – те, що назвали ми часом». Тут, як бачимо, час виникає разом зі створенням небес. Так само розв'язував згодом цю проблему і християнський богослов **Августин** (354 – 430). Задавши питання: «Бачучи, отже, що Бог, вічність якого незмінна, створив світ і час, як можна говорити, що він створив світ у часі, коли ви лишень не хочете сказати, що було щось створене перед світом, котре стало передумовою світу?», Августин формулює відповідь так. «Істинно, світ був створений з часом, а не в часі, бо те, що створене в часі, існує до деякого часу і після деякого часу». Як побачимо далі, питання про вічність у часі є одним з основних у сучасній космології.

Аристотель дійшов також висновку, що час не слід ототожнювати з рухом, бо «рух може бути швидший чи повільніший або справді рівномірний чи нерівномірний, і ці терміни самі визначаються за допомогою часу, тоді як час не може бути визначений сам по собі». Для Аристотеля час — процес лічби, заснований на нашому уявленні про «до» і «після» у русі, причому «один і той самий час є повсюди одночасно». Привертає увагу і твердження **Стратона Лампсакського**, учня Аристотеля, що «день, ніч і рік не є ні часом, ні частиною часу, але відповідно світлом і темрявою та обертанням Сонця і Місяця; насправді час є величиною, в якій вони існують».

Доречно також згадати, що давньогрецькі філософи-піфагорійці перейняли від давньовавілонських учених 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. Як твердив згодом грецький філософ-ідеаліст **Прокл** (410 – 485), «рух часу з'єднає кінець з початком, і таке відбувається нескінченне число разів». Про те саме говорить очікування давніми греками й римлянами «золотого віку», який буцімто вже був за володарювання Сатурна й знову мав прийти на Землю. Уявлення про постійне повторення циклів часу

відображене і в символі давніх римлян – змії (як «уособлення часу»), котра пожирає свій хвіст.

Як бачимо, проблема часу чи не найбільше хвилювала античних філософів. І закономірно. Бо ж, як висловився **Дж. Уїтроу** (Англія), «простір здається нам даним увесь зразу, тоді як час постає перед нами лише проміжками. Минуле треба відновлювати за допомогою ненадійної пам'яті, майбутнє приховане від нас, і лише теперішнє безпосередньо переживається нами. Ця дивовижна відмінність простору і часу ніде не мала більшого впливу, як у фізичній науці, заснованій на понятті виміру...».

### Здобутки ренесансу

Майже півтори тисячі років Аристотель залишався найвищим авторитетом ученого, до творів якого зверталися в пошуках відповідей на всі питання, що їх ставила перед дослідниками Природа. Уявлення ж цього філософа про світ здебільшого були помилковими...

Тут пригадуємо, що **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, котра, 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, котре також зазнає руху.

Не може не дивувати й таке твердження Аристотеля: «Більша кількість [вогню] рухається уверх швидше, ніж мала. Також більша кількість золота чи олова рухається вниз швидше, ніж мала; так відбувається з усіма важкими тілами». Сказане він уточнює так: «Коли якась вага проходить якусь відстань за певний час, то більше тіло пройде ту саму відстань за коротший час, і відношення ваг одна до одної буде відповідати відношенню часових проміжків один до одного, тобто якщо половина ваги пройде дану відстань за  $s$ , то ціла вага пройде її за  $\frac{1}{2}s$ ». Як бачимо, Аристотель вважав, нібито швидкості падіння тіл пропорційні їхній вазі.

Річ ясна, створити наукову картину світу на таких неправильних уявленнях про закони руху тіл було неможливо.

Відкриття Колумбом Америки (1492 р.) і кругосвітня подорож Магеллана (1519 – 1521 рр.), а головне стрімкий розвиток техніки в XV і XVI ст. сприяли остаточному пробудженню людського розуму від тисячолітньої сплячки.

Розпочинається становлення нової науки, що зумовило наприкінці XVII ст. створення *наукової картини світу*. В астрономії і фізиці започаткував це видатний польський астроном **Микола Коперник** (1473 – 1543). Побудувавши геліоцентричну систему світу, він «прирівняв» Землю до інших планет. Коперник започаткував зближення астрономії з фізикою, передовсім з механікою. Відкинувши протиставлення «земного» і «небесного», учений поставив перед наукою питання: в чому полягають причини руху взагалі і руху планет зокрема? Що утримує Місяць поблизу Землі, а всі планети поблизу Сонця?

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. За його переконанням, «коли ми надаємо Землі який-небудь рух, то цей рух виявиться таким самим і в усьому, що перебуває поза Землею, лише тільки в протилежний бік...»

У 1609 – 1619 рр. німецький астроном **Йоганн Кеплер** сформулював свої три славетні закони руху планет навколо Сонця. Тоді саме він задумався і над питанням про те, що змушує планети рухатися навколо Сонця. Кеплер, однак, все ще перебував у полоні давніх уявлень і вважав, що рух, не підтримуваний безперервно якоюсь силою, має припинитися. Джерело такої рушійної сили, котра нібито подібна до магнітної, він вбачав в обертанні Сонця. А що рух планети тим повільніший, чим далі від Сонця вона перебуває, то дія цієї сили мала б змінюватися обернено пропорціонально відстані.

У працях Кеплера знаходимо також відхід від учення Аристотеля про існування «єдиного центра світу». Кеплер писав: «Коли б у якому-небудь місці світу були два камені на близькій відстані один від одного і поза сферою дії якого б то не було спорідненого їм тіла, то ці камені поривалися б з'єднатися один з одним, подібно до двох магнітів...»

Видатним новатором у фізиці та астрономії був італійський учений **Галілео Галілей**. За висловом **Б.Г.Кузнецова** (СРСР), Галілей «підійшов до світу як перший спостерігач, відкинувши традиційні погляди, і світ заблищав перед його очима чистими й новими барвами».

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 такі рухи є однаково «природними». **Галілей** довів абсурдність твердження Аристотеля, нібито швидкість падіння пропорціональна вазі тіла. Для цього, зокрема, він провадив спостереження за рухом куль по похилій площині, що дало йому змогу зформулювати *принцип інерції руху*: «Коли тіло рухається по горизонтальній площині, не зустрічаючи ніякого опору рухові, то... рух його рівномірний і продовжувався б незмінно, якби площина простягалася у просторі без кінця».

Підтверджуючи тезу Коперника про рух Землі навколо Сонця, **Галілей** подає приклад з кораблем, на якому стоїть посудина з рибками, є мухи та інші дрібні комахи, і каже так: «Змушуйте тепер корабель рухатися з будь-якою швидкістю, і тоді (якщо лише рух буде рівномірний і без погойдування в той чи той бік) у всіх вказаних явищах ви не виявите найменшої зміни і ні за одним з них не зможете встановити, рухається корабель чи стоїть нерухомо». Тим самим **Галілей** зформулював *принцип відносності руху*: у системі, що рухається рівномірно, усі фізичні процеси відбуваються так само, як і в тій, котра перебуває у спокої.

**Галілеєві** не вдалося встановити причину рухів планет навколо Сонця. У своїх працях він обмежувався уявленням про те, що ці рухи є коловими, бо вони, мовляв, випливають із «найдосконалішого порядку»: спочатку нібито неупорядкований стан Всесвіту включав і прямолінійні рухи; проте коли Всесвіт досягнув гармонії, збереглися лише колові рухи. Однак і у твердженнях щодо обмеженості чи безмежності Всесвіту **Галілей** був обережний. Наприклад, у відомому «Посланні до богослова Інголі (1624 р.) **Галілей** запитує: «І хіба вам невідомо, що дотепер ще не вирішено, і я думаю, що людська наука ніколи не вирішить, чи Всесвіт скінченний чи безконечний?»

Вагомий вплив на розвиток фізики у XVII ст. мали праці французького вченого **Рене Декарта** (1596 – 1650). Досліджуючи закони руху тіл, **Декарт**, зокрема, дійшов висновку, що «рух і спокій є лише двома різними станами 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.

Чималим був і внесок у фізику нідерландського вченого **Христіана Гюйгенса** (1629 – 1695), який, зокрема, 1673 р. сформулював *закон коливання маятника*. Гюйгенс вивів формулу для доцентрової сили, яка діє на тіло з масою  $m$  під час його руху зі швидкістю  $v$  по коловій орбіті радіуса  $r$ :

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

Гюйгенс, щоправда, не здогадався, що така формула дає змогу оцінити величину сили, яка утримує планету на її орбіті. Услід за Декартом він писав: «Планети повинні плавати у матерії... бо без цього що утримувало б їх... від утечі і що привело б у рух? Кеплер помиляється, приписуючи цю роль Сонцю».

Так у XVI – XVII ст. шлях до створення класичної космології проходив через планетну систему. Тоді питання про причину руху планет навколо Сонця було поставлено в один ряд із проблемами руху тіл на поверхні Землі, що само по собі було справді революційним актом. Та коли в розробленні останніх було досягнуто чималих успіхів, механізм обертання планет все ще залишався загадковим...

## Тріумф і невдача Ньютона

Вершиною здобутків фізики й астрономії XVII ст. стала праця англійського фізика і математика **Ісаака Ньютона**, що мала назву «Математичні основи натуральної філософії» (1687 р.). За висловом **Я.А.Смородинського** (СРСР), тут «закон всесвітнього тяжіння постав як найзагальніший закон Всесвіту, і на його основі було побудовано строгу математичну теорію... Великими «Основами» Ньютона відкрилася нова наука – *небесна механіка*. Рух Місяця, планет, а згодом зір, галактик і, нарешті, самого Всесвіту став зрозумілий для людини. Уперше було виявлено, що закони космосу не різняться від законів земних... Ньютона слід вважати фундатором теоретичної фізики: він пер-

ший з природодослідників перейшов від якісного описування явищ до їх строгої математичної теорії.

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 справді, перш ніж накреслювати загальну картину світобудови (а третя книга «Основ» і має назву «Про систему світу»), Ньютоніві довелося дати визначення маси як «кількості матерії», чітко зформулювати поняття *сили*, розрізняючи при цьому «пасивну», або «вроджену», силу – інерцію і «активну», «прикладену» силу, котра створює рух, а також дати визначення понять простору й часу.

Ньютон твердив, зокрема, що «із-за інерції матерії... кожне тіло лише з зусиллям виводиться зі стану спокою або руху». Тому «вроджена сила» могла б бути дуже переконливо названа «силою інерції». Як конкретний зразок «прикладеної» сили він подає доцентрову силу – ту, з якою «тіла до деякої точки, ніби до центра притягаються...». Це, зокрема, сила тяжіння, «під дією якої тіла спрямовуються до центра Землі».

Але в чому полягав природа отої «вродженої» сили, або сили інерції? І якщо саме сила тяжіння (а про це Ньютон здогадувався задовго до публікації «Основ») утримує Місяць навколо Землі та планети навколо Сонця, коли вона також об'єднує зорі у велетенські системи, то як, зокрема, ота сила змінюється з відстанню між двома взаємодіючими тілами? І як та сила передається на далекі відстані? На зазначених питаннях Ньютон і зосередив увагу. Розпочинати ж доводилося від встановлення «найелементарніших» законів руху.

Проте зформулювати закони механіки було неможливо без конкретних уявлень про час і простір. Як зауважив німецький фізик **Макс Борн** (1882 – 1970), без таких визначень виявляється беззмістовним навіть найпростіший закон механіки – закон інерції. Думку підтверджує приклад кулі, що «за інерцією» котиться по столі. Адже для спостерігача, який перебуває на іншій планеті, шлях кулі не буде прямолінійним хоча б тому, що Земля обертається навколо своєї осі. Отже, тут виникає потреба точно задати простір, точніше, систему відліку, в якій рух можна розглядати як прямолінійний і рівномірний.

Міркуючи в такий спосіб, Ньютон дійшов висновку, що таку систему відліку неможливо пов'язати не лише з Землею, а й із Сонцем. Закон інерції ніби «підштовхував» до думки про істотну роль самого



простору, який може мати певні фізичні властивості. Ньютон знав також, що при вимірюванні часу «дні у природі насправді не рівні один одному, хоч звичайно і вважаються рівними та використовуються як міра часу».

Тому **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: «Абсолютний простір самою своєю суттю безвідносно до чого б то не було зовнішнього лишається завжди однаковим і нерухожим» і «Відносною є його міра або певна обмежена рухома частина, що визначається нашими почуттями за положенням його відносно деяких тіл та яка в повсякденному житті вважається за простір нерухожий...»

Отже, за Ньютоном, світ складається з трьох незалежних рівноцінних вартостей: матерії, простору і часу. Вважаючи простір безконечним, Ньютон гадав також, що й речовина розподілена в ньому скрізь, у всіх його закутках. Бо, як твердить він в одному зі своїх листів (1692 р.), «якщо матерія рівномірно розподілена у безконечному просторі, то вона ніколи не змогла б зібратися в єдину масу, але частина її зібралася б в одну масу, частина – в іншу з тим, щоб утворити нескінченну кількість великих мас, розсіяних на значних відстанях одна від одної по всьому безконечному просторі».

Підтвердження своїх уявлень про абсолютний простір Ньютон вбачав у відцентрових силах (а вони – найяскравіший приклад сил інерції!), що виникають у системах відліку, які обертаються. Ось як він описує дослід, котрий мав би підтвердити існування абсолютного обертання (тобто обертання відносно абсолютного простору) і пролити світло на природу сил інерції: «Ефекти, які відрізняють абсолютний рух від відносного, – то сили відриву від осі при коловому русі. Бо не існує таких сил у суто відносному коловому русі, тільки в істинному та абсолютному коловому русі... Якщо посудину, підвішену на довгій мотузці, повертати багато разів в один бік так, щоб мотузка виявилася сильно закрученою, наповнити водою і підтримати її разом з водою у спокої, то в подальшому під дією другої сили вона почне обертатися у протилежний бік... поверхня води спочатку буде плоскою... але потім посудина, поступово передаючи свій рух воді, змусить її почати обертатися і відступати по-

троху від середини, притискуючись до стінок посудини і утворюючи на поверхні вгнуту фігуру (як я сам переконався)...

Спочатку, коли відносний рух води у посудині був найшвидший, він не викликав намагання віддалитися від осі: вода не виявляла тенденції до обертання чи перетікання ближче до стінок посудини; її поверхня залишалася плоскою, і тому справжній коловий рух не розпочинався. Але потім, коли відносний рух води зменшився, відступ останньої у бік стінок посудини виявив її прагнення віддалитися від осі; це намагання показувало, що істинний коловий рух води став зростати доти, доки не досягнув найбільшої величини, коли вода вже перебувала у спокої відносно посудини».

На такій підставі **Ньютон** твердить, що відносний рух не супроводжується змінами стану тіл, відцентрові ж сили проявляються лише при абсолютних обертаннях тіл. Кутову швидкість абсолютного обертання тіла можна нібито встановити, вимірюючи кривину поверхні води, яка обертається разом із посудиною.

Пояснюючи свою тезу про існування абсолютних («істинних») рухів, Ньютон наголошує, що «ми маємо деякі напрямні вказівки, зокрема сили, які є причинами та ефектами істинних рухів. Наприклад, якщо дві кулі утримувані на заданій відстані одна від одної за допомогою шнура..., приводяться в рух відносно їх спільного центра ваги, то ми можемо, виходячи з натягу шнура, виявити намагання куль до віддалення від осі їх руху, а звідси можна обрахувати величину їх колового руху... Отже, ми могли б знайти як величину, так і напрям колового руху, навіть коли б це відбувалося в абсолютній порожнечі, де немає нічого зовнішнього або відчутного, з чим можна було б порівнювати ті кулі».

Подані міркування означають також, що абсолютне обертання певної планети можна виявити навіть тоді, коли вона оточена суцільними хмарами: для цього досить виміряти її сплюснутість, котра і є наслідком дії відцентрової сили.

За словами **Я.Г.Дорфмана** (СРСР), перебуваючи на особливому піднесенні, Ньютон в «Основах» надає законам руху характеру «божественних велінь», формулюючи їх в урочистій наказовій формі:

«**Закон I.** Всякому тілу продовжувати зберігати свій стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, поки й оскільки воно не спонукується прикладеними силами до зміни цього стану.

**Закон II.** Зміні кількості руху бути пропорціональній прикладеній рушійній силі і відбуватися у напрямі тої прямої, по якій ця сила діє.

**Закон III.** Дії завжди зустрічати рівну протидію, інакше – взаємодії двох тіл одне з одним бути рівній і направленій у протилежні сторони».

Другий із законів Ньютона ми записуємо звичайно у вигляді

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

звідки видно, що прискорення  $a$ , одержуване тілом під дією сили  $F$ , обернено пропорціональне 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** у «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 пропорціонально квадрату відстані до «силового центра»; 2) якщо доцентрова сила обернено пропорціональна квадратам відстаней місць до центра, то тіло може рухатися по еліпсу, параболі або гіперболі залежно від початкових умов (величини швидкості на певній відстані від центра притягання).

Далі на прикладі Місяця **Ньютон** переконливо довів, що та доцентрова сила – це сила тяжіння. Узагальнюючи результат, він висловлює і таке важливе твердження: «Усі тіла тяжіють до кожної окремої планети, і ваги тіл на кожній планеті за однакових відстаней від її центра пропорціональні масам цих планет», бо «немає сумніву, що природа тяжіння на інших планетах така сама, як і на Землі». Так геліоцентрична модель світу М.Коперника через 150 років знайшла у праці Ньютона своє *динамічне обґрунтування*.

Надзвичайно важливими були Ньютонові дослідження коливань двох однакових маятників – діжечок, підвішених на нитках однакової довжини та заповнених різними речовинами (наприклад, одна деревом, інша золотом). У такий спосіб **Ньютон** виявив, що «будучи встановленими поруч, вони при рівних коливаннях йшли назад і вперед протягом дуже тривалого часу. Отже, кількість речовини (маса) в золоті... відносилася до кількості речовини у дереві як дія рушійної сили на все золото до її дії на все дерево, тобто як вага одної до ваги другої».

Наслідки такого експерименту давали змогу твердити, що вага кожного тіла  $P$  завжди пропорційна його масі  $m$ . Таке твердження можна записати у формі

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

Тут  $g$  – деякий коефіцієнт пропорційності – прискорення земного тяжіння. Рівності (1.2) та (1.3), як і дослідження Ньютона з маятниками, ми розглянемо згодом уважніше.

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.

Встановивши закон всесвітнього тяжіння, Ньютон зміг дати відповідь на питання, чому Місяць обертається навколо Землі та чому планети рухаються навколо Сонця. Він знайшов «рецепт», що давав можливість у кожному конкретному випадку обрахувати величину сили тяжіння. Але як передається взаємодія між масами, що притягаються одна до одної, яка природа тої сили? Відповідей на ці питання Ньютон дати не міг...

Визнавши свою безпорадність перед такими питаннями, Ньютон писав єпископові **Бентлі**, котрий був активним учасником підготовки другого видання «Основ» (1713 р.): «Не можна уявити собі, яким чином нежива груба речовина могла б – без посередництва чогось стороннього, яке нематеріальне, – діяти на іншу речовину інакше, ніж при взаємному стиканні. А так повинно б бути, коли б тяжіння, в розумінні Епікура, було притаманне матерії. Допустити, що тяжіння природжене матерії, властиве їй так, що одне тіло має діяти на відстані через вакуум на інше без посередництва чогось стороннього, за допомогою якого дія і сила від одного тіла проводиться до другого, – є для мене таке безглуздя, що гадаю, в нього не впаде жодна людина, здатна до мислення про філософські речі. Тяжіння повинно спричинятися деяким чинником, що діє за певними законами. Який це чинник – матеріальний чи нематеріальний – я залишив на розміркування читача».

Відомо, що за тих часів неабиякого поширення набули погляди згаданого вже **Р. Декарта**. На його думку, взаємодія між окремими матеріальними тілами відбувається з допомогою проміжних елементарних частинок – «тонкої матерії». Цих уявлень дотримувалися й послідовники вчення Декарта – картезіанці.

Тимчасом з праць Ньютона тяжіння постає перед нами як сила, що діє на великих відстанях начебто без жодного матеріального посередника. Це привело до поняття про «далекодію», прийнятого на озброєння так званими ньютоніанцями в їхній боротьбі проти картезіанців.

**Ньютон** закінчив «Основи» словами: «Дотепер я пояснив небесні явища і припливи наших морів на підставі сили тяжіння, але я не вказував причину самого тяжіння. Та сила настає від деякої причини, яка проникає до центра Сонця і планет без зменшення своєї здатності... причому її дія поширюється повсюдно на великі відстані, зменшуючись обернено пропорціонально квадратам відстаней... Причину ж цих властивостей сили тяжіння я до цих пір не міг вивести з явищ, а *гіпотез я не вигадую*».

І нарешті: «Тепер слід було б трохи додати про деякий найтонший ефір, який пронизує всі суцільні тіла і міститься в них, силою й діями якого частинки тіл на дуже малих відстанях взаємно притягуються, а при стиканні зчіплюються... Але це не можна викласти коротко, до того ж немає і достатнього запасу дослідів, якими закони дії цього ефіру були б точно визначені й показані».

Проте в мемуарі «Про одну гіпотезу, що пояснює властивості світла» (1675 р.) Ньютон таки говорить про ефірне середовище, яке нібито багато де в чому має «ту саму будову, що й повітря, але значно більш розріджене, тонке й еластичне». Там само Ньютон висловлює думки: «Можливо, усі речі постали з ефіру» або «Гравітаційне притягання Землі може також зпричинятися неперервною конденсацією якогось іншого, подібного ефірного газу. Той газ – не основне тіло м'якого ефіру, але щось більш тонке й субтильне, розсіяне в ньому, яке, можливо, має маслянисту або клейку, в'язку й пружну природу... Сонце, як і Земля, може, багато вбирає газів для збереження свого саява і для стримування планет – щоб вони не віддалилися від нього».

У першому виданні «Оптики» (1704 р.) питання про ефір **Ньютон** взагалі не порушував, а через два роки різко виступив проти такої гіпотези. А 1717 р. він хоч і зауважує, мовляв, «я не знаю, що таке ефір»,

та все одно провадить підрахунок, наскільки наявність ефіру в світовому просторі могла би вплинути на рух планет...

З усього сказаного випливає, що Ньютон якнайсерйозніше обмірковував питання про наявність певного матеріального «агента», за допомогою якого й відбувається гравітаційна взаємодія тіл. Проте у розв'язанні проблеми він зазнав невдачі, бо навіть найбільшому з геніїв не завжди дано збагнути те, що відкриється перед майбутніми поколіннями лише через декілька століть...

### Про моделі тяжіння

Чим же все-таки зумовлюється інерція тіл? Як відбувається гравітаційна взаємодія між двома тілами, що перебувають на чималій відстані одне від одного? Наскільки точним є закон Ньютона, за яким сила тяжіння змінюється обернено пропорційно квадрату відстані, і чому ця залежність є саме такою, а не інакшою? Упродовж майже 200 років ці питання привертали увагу багатьох фізиків і філософів. А проте й тепер не можна твердити, що на кожне з них уже знайдено вичерпну відповідь...

Так, наприклад, через 20 років після публікації «Основ» ірландський філософ **Джордж Берклі** (1685 – 1753) виступив проти уявлень Ньютона щодо ролі (та й узагалі існування) абсолютного простору. У праці «Принципи людського пізнання» Берклі твердив, що «будь-який рух відносний», а тому «рух не може бути визначений без вказівки його напрямку, а той напрям, у свою чергу, не може бути заданий інакше, як відносно нас або якогось іншого тіла». І таким чином, коли «все на світі зникло за винятком одної кулі, то зовсім неможливо уявити собі який-небудь рух цієї кулі...».

Усупереч Ньютоніві Берклі пише: «Уявімо собі, що існує всього дві кулі і що крім них немає нічого матеріального; тоді рух цих двох куль навколо їхнього спільного центра тяжіння виявити неможливо. Але припустимо, що раптово було створене небо з нерухомими зорями, тоді ми зразу зможемо виявити рух куль за їхнім розташуванням відносно різних ділянок неба». Проте Берклі – представник суб'єктивного ідеалізму, – заперечуючи об'єктивність простору, часу і матерії й твердячи, що ми взагалі знаємо лише відчуття, не пояснив, чому виникають відцентрові сили. Ось через що на його книжку, опубліковану перед другим виданням «Основ», Ньютон не звернув уваги.

Із принциповою критикою поглядів Ньютона на простір і час виступив англійський філософ **Джон Толанд** (1670 – 1722). Визнаючи, що рух – основний спосіб буття матерії, Толанд писав: «... я не можу повірити в абсолютний простір, котрий відмінний від матерії і вмщує її в собі, як не можу повірити і в те, що є абсолютний час, відмінний від речей, про тривалість яких ідеться...» Ідеї Толанда стимулювали розвиток багатьох фізичних ідей XVIII і XIX ст.

Привертає увагу й критика Ньютона австрійським фізиком і філософом **Ернстом Махом** (1838 – 1916). Ось, зокрема, його міркування про рух: «По-моєму, існує лише відносний рух... Коли тіло обертається відносно нерухомих зір, виникають відцентрові сили, якщо ж воно обертається відносно якогось іншого тіла, але не обертається відносно нерухомих зір, то відцентрові сили не з'являються». І далі: «Звичайно, однаково, чи вважати, що Земля обертається навколо своєї осі або ж що вона перебуває у спокої, а нерухомі зорі обертаються навколо неї. Геометрично обидва ці випадки є цілком однакові – відносно обертання Землі і нерухомих зір... Але якщо гадати, що Земля перебуває у спокої, а нерухомі зорі обертаються навколо неї, то звідки взялася б спілюснутість Землі, дослід **Фуко** і багато іншого, принаймні коли виходити з нашого звичайного тлумачення закону інерції? Або кожний рух треба визнати абсолютним, або ж прийняті нами закони інерції зформульовані неправильно. Мені більше імпонує другий шлях. Закони інерції мають бути зформульовані так, щоб як з першого, так і з другого припущення впливали одні і ті самі наслідки. Щоб це було так, необхідно врахувати маси, розподілені у Всесвіті».

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**».

Отже, відцентрові сили мали б виникати у випадку, коли тіло обертається відносно світових мас. Ось як про це писали **Л.Е.Гуревич** та **Е.Б.Гінер** (СРСР): «Якщо ж тіло обертається відносно тіла малої маси, але не обертається відносно основних мас Всесвіту, то відцентрові сили не спостерігаються просто тому, що в цьому випадку вони дуже малі. Зокрема, у досліді Ньютона обертання води відносно відра при її нерухомості відносно основних мас Всесвіту не створює в ній помітної відцентрової сили просто через те, що маса відра надто мала порівняно з масами галактик».

І далі: «Звернімо увагу на те, що ідея відносності простору приводить до висновку, який виглядає парадоксальним з погляду звичайних людських понять: з однаковим правом можна говорити як про обертання тіла відносно мас Всесвіту, так і про те, що Всесвіт обертається навколо тіла. У тілі виникнуть однакові відцентрові сили. Насправді нічого парадоксального в ідеї відносності руху немає. Бо ж реальними є лише відносне обертання і зміни стану, які проявляються у відцентрових силах. Світові маси створюють у тілі відцентрові сили, але тіло не створює відчутних сил у світових масах, котрі обертаються. Тому ніякої рівноправності між тілом і Всесвітом немає».

Забігаючи наперед, зазначимо, що ідеї Маха мали глибокий вплив на Ейнштейна. Зокрема, у листі до Маха (1913 р.) **Ейнштейн** писав: «У майбутньому році під час сонячного затемнення буде перевірено, чи загинаються світлові промені Сонця, або, інакше кажучи, чи правильні основне і фундаментальне припущення про еквівалентність прискореної системи і гравітаційного поля. Якщо це так, то Ваші надихаючі дослідження про основи механіки – всупереч несправедливій критиці Планка – блискуче підтвердяться». Згодом, проте, Ейнштейн дійшов висновку, що постулат Маха «не пов'язується з духом теорії». **Джон Уїлер** (США) зауважує: «Чи ж варто порушувати логічну красу теорії відносності, домішуючи до неї таку неозначену й математично неоформлену річ, як принцип Маха? До чого усі ці спроби висловити точною мовою ХХ ст. обтріпану ідею ХІХ ст., котру пора викинути раз і назавжди...» Не можна сказати, що інші фізики в цьому питанні висловилися так же категорично...

На довгі 200 років «повисло» над фізиками й астрономами питання про природу сили тяжіння. Як зауважив український астроном **О.Ф.Богородський**, були створені *гідростатична* та *пульсуюча моделі*: «Гідростатична модель тяжіння, ідея якої належить, очевидно, Ньютону, заснована на припущенні, що густина і тиск світового ефіру, котрий оточує матеріальне тіло, зменшуються з відстанню від його поверхні. Унаслідок цього дане тіло зазнає з боку іншого менший тиск ефіру, ніж з протилежного боку. Це і є причиною гравітаційних взаємодій: тяжіння зумовлене різницею тисків в ефірі та виражає прагнення тіл переміщуватися від густіших до менш щільних частин світового середовища».

У 1784 р. швейцарський фізик і математик **Жорж Лесаж** (1724 – 1803) робить спробу розглянути питання з погляду давньогрецької атоміс-



тики. За словами **П.С.Кудрявцева** (СРСР), «Лесажа виходить з уявлення про нескінченні потоки атомів особливої матерії, що перетинають увесь світовий простір у різних напрямках. Окреме тіло в такому просторі, зазнаючи ударів з усіх боків, лишалося б в індіферентній рівновазі. Коли ж є два тіла, то вони, так би мовити, закриватимуть звернені одна до одної сторони від зустрічних потоків і внаслідок незкомпенсованих ударів будуть взаємно притягуватися».

Довівши непридатність цієї теорії для пояснення руху конкретних тіл сонячної системи, **П.Лаплас** виснував, що, мовляв, немає жодних сподівань отримати відповідь на питання: чи початок тяжіння становить собою «первинний природний закон, чи він є лише загальною дією невідомої причини...».

З іншого ж боку, англійський фізик **Роберт Гук** (1635 – 1703) висловив здогад, нібито коливання атомів матеріального тіла передаються ефірові, поширюються в останньому і, досягаючи інших тіл, зпричиняють їх притягання до того тіла. Наприкінці ХІХ ст. на ґрунті поданих уявлень зформувалася так звана *пульсаційна гіпотеза* Б'єркнеса. Тут покладалося, що гравітуючі тіла перебувають у стані коливального руху. Коливання нібито поширюються через ефір до притягуваного тіла й зумовлюють його притягання. Було знайдено, що дві пульсуючі кулі, радіуси яких малі порівняно з їх взаємною відстанню, занурені у нестискувану рідину, притягуються із силою, прямо пропорційною добутковій амплітуд пульсацій і обернено пропорційною квадратів відстані між їх центрами, якщо лише частоти пульсацій і фази збігаються. Коли ж фази протилежні, то замість притягання діятиме відштовхування. Для застосування цієї теорії до пояснення гравітації необхідно було, щоб: 1) пульсації усіх матеріальних частинок відбувалися з однаковою частотою і фазою, 2) інтенсивність пульсацій була пропорційна масам тіл і 3) якщо ефір стискуваний, то відстань між двома тілами була менша від половини довжини хвилі коливання. А головне, треба було вказати джерело пульсацій та як вони виникають.

За іншими уявленнями, ефір мав би бути цілком заповнений хвильовими рухами, а тіла, мовляв, – стоячі хвилі, що виникають унаслідок інтерференції згаданих хвильових рухів. Взаємне тяжіння тіл є нібито наслідком своєрідного «пересування» отого гребеня – стоячої хвилі.

Спроби пояснити природу тяжіння дією механічних причин закінчилися невдачею. Зокрема, коли б була правильною теорія Ж.Лесажа,

то при зударянні частинок ефіру з тілами останні дуже швидко нагрівалися б до високих температур, чого насправді немає. Тому на зміну таким поглядам прийшли гіпотези про можливу роль електромагнітних взаємодій. Так з'явилася теорія, за якою між частинками тіла, як і між частинками ефіру, діють відштовхувальні сили. Проте, мовляв, між частинками тіла і ефіру діють сили притягання, які й перевищують відштовхування. Це мало б призводити до притягання тіл, занурених в ефір. Були також гіпотези, за якими гравітуючі атоми складаються з позитивно і негативно заряджених частинок.

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. Так, наприклад, французький математик і астроном **Алексіс Клеро** (1713 – 1765), досліджуючи рух перигею місячної орбіти, запропонував замінити закон (1.4) формулою

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \left( 1 + \frac{\alpha}{r^n} \right), \quad (1.5)$$

де  $\alpha$  – деяка стала, а показник степеня  $n = 1$  або  $n = 2$ . Проте згодом Клеро відмовився від тих ідей, оскільки спостереження Місяця, що були в його розпорядженні, виявилися неточними.

Рухаючись навколо Сонця, кожна з планет водночас притягається усіма іншими тілами Сонячної системи. Через те, зокрема, перигелій її орбіти змінює своє положення відносно зір. Можна твердити, що еліпс, який описує планета, повільно обертається у напрямі її руху. І ось 1859 р. французький астроном **Урбен Левер'є** (1811 – 1877), складаючи таблиці положень планет, виявив у русі перигелію Меркурія «зайве» зміщення величиною  $38",3$  за сто років. Спочатку він виснував, що рух Меркурія навколо Сонця збурюється невідомою планетою, яку він задалегідь назвав Вулканом. Проте, незважаючи на старанні пошуки, цю планету, що мала б перебувати ближче до Сонця, ніж Меркурій, так і не виявили.

Щоб теоретичні обрахунки краще збігалися зі спостереженнями, у 1894 р. американський астроном **Асаф Холл** (1829 – 1907) запропонував приймати закон всесвітнього тяжіння у вигляді

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^{2+\sigma}}, \quad (1.6)$$

де  $s$  – дуже мала поправка. При складанні таблиць руху планет на початку ХХ ст. було прийнято  $s = 0,0000001612$ . Виявилось, однак, що такий закон не суперечить теорії руху Місяця лише в тому випадку, якщо  $s < 0,0000004$ . Інакше кажучи, задовільно представити рух планет і Місяця за допомогою одної формули типу (1.6) не вдалося. Набагато раніше (1825 р.) **П.Лаплас** запропонував інакшу форму закону тяжіння, а саме:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} e^{-hr}, \quad (1.7)$$

де  $h$  – деяка додатня стала. Проте формула (1.7) виявилася цілком непридатною для опису руху перигеліїв планет і перигею Місяця за однакового значення параметра  $h$ . І вже зовсім недавно (1963 р.) **А.Фінзі** (Англія), розглядаючи проблему стійкості скупчень галактик (про пов'язаний з цим питанням *віріальний парадокс* ітиметься далі), висунув гіпотезу, за якою на міжгалактичних відстанях сила гравітаційної взаємодії змінюється з відстанню  $r$  за законом

$$F = \frac{Gm_1m_2}{\rho^2} \left( \frac{\rho}{r} \right)^{3/2}, \quad (1.8)$$

де  $r$  – характерна довжина, яку він прийняв:  $r \gg 1500$  світлових років.

Велику увагу в недалекому минулому було приділено питанню можливого поглинання гравітації середовищем, котре міститься між взаємодіючими тілами. З теоретичних міркувань випливало, що якби такий ефект мав місце, то повинні були б спостерігатися: 1) відхилення від третього закону Кеплера, 2) добові коливання прискорення сили тяжіння на поверхні Землі, внаслідок чого вага тіла опівдні мала б бути на 1/150 000 її величини більшою, ніж опівночі, 3) зміни сили тяжіння на поверхні Землі під час сонячних затемнень, 4) різка асиметрія припливів та відпливів. Жодного з цих ефектів не було виявлено.

Найслабкішим місцем механіки Ньютона є *принцип гравітаційної далекодії*. Як підкреслив **О.Ф.Богородський**, першу спробу відмовитися від такого принципу зробив П. Лаплас. Він «дійшов висновку, що доповнення теорії Ньютона постулатом скінченної швидкості передачі гравітації приводить до чималих труднощів у небесній механіці». **Лаплас** «вказав, що при відмові від принципу далекодії необхідно приймати надзвичайно велику швидкість передачі гравітації, яка в багато

разів перевищує швидкість світла. Аналогічних висновків дійшли й пізніші дослідники, наприклад Оппольцер, Леман та ін.»

Тому ще й тепер, доки ми залишаємося в рамках класичної фізики, «гравітації приписується нескінченно велика швидкість поширення. Це означає, зокрема, що небесна механіка допускає принципову можливість моментальної передачі сигналів, вступаючи тим самим у конфлікт із сучасною фізикою». А отже, «буквальне розуміння закону тяжіння Ньютона з сучасного погляду недопустиме, оскільки воно неминуче приводить до визнання гравітаційної дальності і, таким чином, надає небесній механіці містичного характеру...»

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

### **Космологічні парадокси**

*Парадоксом* зветься явище або погляд, думка, що різко розходяться з усталеними й загально визнаними уявленнями. Так звані *космологічні парадокси* виникли внаслідок екстраполяції (поширення) законів класичної фізики на увесь Всесвіт.

З цього приводу **Ю.Г.Перель** (СРСР) писав: «Для передових учених кінця XVII – початку XVIII ст. безконечність Всесвіту не викликала сумнівів. Але при безконечності Всесвіту й нескінченному числі зір у ньому зорі мають бути видними в усіх напрямках, заповнюючи собою небо, яке, здавалося, мусило б при цьому сліпуче сяяти. Насправді ж нічне небо – темне, і цей спостережуваний факт начебто суперечить припущенню про безконечність Всесвіту». Таку суперечність і було названо *фотометричним парадоксом*.

Спробу пояснити фотометричний парадокс здійснив швейцарський астроном **Жан Шезо** (1718 – 1751). У праці, яка до 1774 р. залишалася невідомою, Шезо висловив міркування: «Напевне, це пилові хмари затуляють від нас світло далеких зір. Земним спостерігачам доступні лише промені найближчих світил...» У 1823 р. тим самим питанням зацікавився німецький лікар і завзятий аматор астрономії (він, зокрема, відкрив малі планети Палладу і Весту) **Генріх Ольберс** (1758 – 1840). Висловивши ту саму гіпотезу про пилові хмари, Ольберс, проте, дійшов висновку, що такі хмари поступово нагрілися б далекими зорями й почали б ви-

промінювати стільки світла, скільки поглинають. Таким чином, 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** (1849 – 1924) детально проаналізував так званий *гравітаційний парадокс*, на який дещо раніше звернув увагу відомий математик **Карл Нейман** (1832 – 1925). Зелігер виявив, що уявлення про безконечний простір, заповнений речовиною при скінченній її густині, несумісний із законом тяжіння Ньютона. Інакше кажучи, якщо в безконечному просторі густина речовини не нескінченно мала, а кожні дві частинки притягуються взаємно за законом Ньютона, то сила тяжіння, котра 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 (1.4) 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** (1728 – 1777) 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** (1862 – 1934). 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 гравітаційний, так і фотометричний парадокси не матимуть місця, коли розподіл речовини у Всесвіті такий, що задовольняється нерівність

$$\frac{R_i}{R_{i-1}} > \sqrt{N_i}. \quad (1.9)$$

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. Зокрема, Зелігер приймав, що величина цієї сили описується формулою (1.7). Проте, як уже зазначалося, цю формулу 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. Зокрема, стосовно першого з них доречно подати слова **І.Д.Новикова**: «В теорії Ейнштейна немає абсолютноного простору і ніяких абсолютних сил тяжіння вона не обраховує. Рівняння тяжіння Ейнштейна зразу визначають відносні прискорення й відносні швидкості галактик і геометрію простору, тобто величини, які в принципі можна вимірювати й спостерігати. Умови однорідності та ізотропії дають змогу розв'язати рівняння Ейнштейна без парадоксів саме з тої причини».

І ще одна проблема знаходить логічне пояснення у сучасній релятивістській теорії Всесвіту – *проблема «теплової смерті»*. Вона постала перед ученими 1850 р., коли німецький фізик **Рудольф Клаузіус** (1822 – 1888) 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 (одна з термодинамічних функцій) зростає. Ті уявлення розвинув далі

англійський фізик **Уїльям 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 «теплової смерті» Всесвіту – рівномірного розподілу тепла між тілами Всесвіту, внаслідок чого будь-які процеси стають неможливими.

Якщо перші два парадокси вступали у суперечність із концепцією безконечності простору, то теорія «теплової смерті» заперечувала ідею вічності Всесвіту. Бо ж коли 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 цієї теплової смерті виявилися невдалими...» Проте саме Больцману належить спроба дати наукове розв'язання цієї проблеми. Через дев'ять років 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 тільки зрідка виникають острівці життя. Відстань до іншої такої самої флуктуації – іншої галактики – мала б становити  $10^{10^{10}}$  відстаней до зорі Сіріус...

Із аналізу теми «теплова смерть Всесвіту» випливає незаперечний висновок: Всесвіт (принаймні у «наявній формі») таки мав початок у часі. Але сьогодні 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 «щось» на ті відстані у просторі й часі, куди людський розум навіть думкою не в змозі сягнути.

## 2. СЮРПРИЗИ ЧОТИРИВИМІРНОГО СВІТУ

### Біля колиски «страховиська»

Спеціальна теорія відносності вже увійшла до програми середньої школи як важливий розділ сучасної фізики. Там саме ми і знайомимось із класичним експериментом американського фізика **Альберга Майкельсона** (1852 – 1931), негативний результат якого підтверджував цю теорію і сприяв її визнанню. Проте, як згодом пригадував А.Ейнштейн, А.Майкельсон «не раз говорив мені, що йому не подобаються теорії, які випливають з його роботи». Майкельсон був щиро засмучений, що його власна робота породила оте «страховисько»...

Чи не найліпшим доказом певної розгубленості й нерозуміння, з якими учені зустріли теорію відносності, є хоч би й такий факт. У документах з приводу присудження Нобелівських премій як А.Майкельсону (1907 р.), так і А.Ейнштейну (1921 р.) зовсім не згадується ні теорія відносності, ні сам експеримент Майкельсона...

Але й тут розмову нам доводиться розпочинати з ... ефіру. І не випадково. Бо ж, за висловом **Я.І.Френкеля** (СРСР), ефір для фізиків був тим, чим божество для віруючих. А річ у тім, що у XVIII ст. до питання «Як передається гравітаційна взаємодія?» долучилося ще одне: «Як поширюється світло (згодом – електромагнітні хвилі взагалі), скажімо, від далеких світил до нашої планети?» Саме пошуки відповідей на друге й привели до створення спеціальної теорії відносності.

Інтенсивне вивчення оптичних, електричних і магнітних явищ розпочалося з середини XVIII ст. Одним із піонерів таких досліджень був американський учений і політичний діяч **Бенджамін Франклін** (1706 – 1790), який дотримувався погляду, нібито в природі є особлива «електрична рідина», «здатна проникати у звичайну матерію, навіть у найщільніші метали, з великою легкістю й свободою, ніби не натрапляючи при цьому на який-небудь помітний опір».

Уточнюючи ті уявлення, **Леонард Ейлер** (1707 – 1783) твердив, що згадана тонка матерія і є ефір, а, мовляв, електричні (як і світлові) явища пов'язані з «порушенням рівноваги в ефірі», котра виникає, коли ефір видавлюється з пір речовини або туди втискується. За Ейлером, світло відносно ефіру є тим, чим звук відносно повітря. Отже, як оптичні, так і електричні явища мали б бути пов'язані саме з пружними деформаціями ефіру. За Ейлером також, всі атоми складаються з одного



виду «власної матерії тіла», а проміжки між ними заповнені однаковою «посторонньою тонкою матерією». Гіпотезу про ефір підтримував і російський учений **М.В.Ломоносов** (1711 – 1765), за яким обертальні рухи частинок ефіру передають тепло, а коливальні – світло.

Фізики ХІХ ст. настільки були переконані в існуванні ефіру, що російський хімік **Д.І.Менделєєв** (1834 – 1907) у своїй таблиці хімічних елементів виділив для елемента «ньютонія» – ефіру – «нульове місце»...

Розвиток фізики у другій половині ХІХ ст. буквально змушував учених максимально конкретизувати уявлення про ефір. Зокрема, які з деформацій – зсув, стиск чи обертання – відповідальні за оптичні явища? Адже коли ефір подібний до газу, то в ньому могли б поширюватися лише поздовжні (!) хвилі, тоді як електромагнітні є поперечними. Можна було б припустити, що його природа близька до твердих тіл. Але в таких тілах можливі не лише поперечні, а й поздовжні хвилі, хоча останніх у природі чомусь не виявлено. Крім того, було б незрозуміле, як у такому середовищі могли б рухатися небесні тіла, зокрема планети...

Що більше, невідомо було й те, як поводить себе ефір стосовно інших рухомих тіл. Рухається він разом із ними чи, навпаки, залишається нерухомим. Коли має місце друге, то, визначаючи швидкість, зокрема, «ефірного вітру» відносно Землі, можна було б знайти *абсолютну* швидкість її руху в просторі! Інакше кажучи, нерухомий ефір давав фізикам *привілейовану* систему відліку, відносно якої можна було б розглядати рух Землі, Сонця і галактик...

Та вже й тоді у деяких учених формувалися цілком нові уявлення... Так, наприклад, запровадивши поняття магнітного поля, англійський фізик **Майкл Фарадей** (1791 – 1867) висунув ідею *силових ліній*, в яких і відбуваються поперечні коливання. За висловом А.Ейнштейна, *ідея поля було найважливішим відкриттям від часу Ньютона*. Шотландський фізик **Джеймс Максвелл** (1831 – 1879), запроваджуючи поняття електромагнітного поля, висловив думку, що в просторі, котрий оточує електричні й магнітні поля, «є матерія, яка перебуває в русі і за допомогою якої й здійснюються спостережувані електромагнітні явища». Найрізноманітнішими дослідями німецький фізик **Генріх Герц** (1857–1894) 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 «еле-

ктричні 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. Його утвердження було б неможливе без здійснення та критичного аналізу декількох експериментів.

Ще 1725 р. англійський астроном **Джеймс Брадлей** (1693 – 1762) виявив періодичне (протягом року) зміщення зорі  $\alpha$  Дракона з амплітудою 20". Враховуючи положення зорі на небі та напрям руху Землі навколо Сонця, Брадлей виснував, що йдеться не про паралактичне зміщення, а про ефект, котрий є наслідком «поступового поширення світла та річного руху Землі на своїй орбіті». Справді, за час проходження світлового променя від об'єктива телескопа до окуляра сам телескоп унаслідок руху Землі зміщується. Тому його слід дещо нахилити у напрямі руху Землі, щоб обране світило залишалося у центрі поля зору. Таке явище назвали *аберацією* (від латинського **aberratio** – відхилення). Воно стало першим прямим доказом правильності теорії Коперника.

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 повторювався неодноразово за різного часу (1881, 1886 – 1887, 1929 рр.) за допомогою приладу, який набув згодом назву «інтерферометра Майкельсона». Оскільки про сам експеримент детально розповідається у шкільному підручнику з фізики, то обмежимося зауваженням, що його результат був негативний. Майкельсон сподівався виявити рух Землі відносно ефіру, а тим часом створювалося 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 Фіцджеральд** (1851 – 1901) і незалежно від нього нідерландський учений **Хендрік Лоренц** (1853 – 1928) висловили припущення, що всі тіла під час їх руху зі шви-

дкістю  $v$  (відносно нерухомого ефіру) скорочуються в  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  разів, де  $c$  – швидкість світла. Звідси впливало, зокрема, 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** (1857 – 1942), 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** (1856 – 1940) 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

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (2.1)$$

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

До речі, 1901 р. німецький фізик **Вальтер Кауфман** (1871–1947) довів, що якраз формулою (2.1) 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. на науковому конгресі французький математик **Анрі Пуанкаре** (1854 – 1912) виступив із твердженням, що швидкостей, більших від швидкості світла, у природі бути не може. Тоді саме Пуанкаре зформулював 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. Пуанкаре 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 Ейнштейн, створюючи спеціальну теорію відносності, ще не знав нічого. Щоправда, згодом Ейнштейн ска-

же: «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 Ейнштейна полягає у тому, що він першим висловив принцип відносності у вигляді всезагального, строго і точно діючого закону».

Тут залишається додати, що, кажучи про «теорію відносності», мають на увазі не відносність людських знань, а відносну *рівноцінність систем відліку*, які рухаються зі сталою швидкістю одна стосовно одної.

### Два постулати Ейнштейна

Упродовж багатьох століть ні в кого не викликала заперечень така «арифметика»: якщо пасажир іде по палубі корабля у напрямі його руху зі швидкістю  $v_1 = 5$  км/год, а сам пароплав рухається відносно берега зі швидкістю  $v_0 = 25$  км/год, то швидкість пасажирів відносно берега  $v_2$  становитиме  $v_2 = v_0 + v_1 = 30$  км/с (або  $v_2 = v_0 - v_1 = 20$  км/год, коли пасажир рухається у протилежний бік). Беручи до уваги, що швидкість є вектором, записуємо сказане у вигляді

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_0 + \vec{v}_1. \quad (2.2)$$

Для опису фізичних явищ ще **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 однукову форму, або, як кажуть, вони *інваріантні* (від латинського *invariantis* – незмінний) при переході від однієї системи координат до іншої.

За приклад можна взяти другий закон Ньютона (1.2). Маса  $m$  тут – величина стала, прискорення  $a$  і величина сили  $F$  при переході від однієї інерціальної системи координат до іншої не змінюються. Отже, закон (1.2) залишається таким самим у будь-якій інерціальній системі.

Зовсім інакше у «світі великих швидкостей». Тут формула складання швидкостей (2.2) непридатна. У протилежному випадку спостерігалися б

цікаві ефекти, як видно з подальшого прикладу. Розглянемо систему з двох зір, які обертаються навколо спільного центра мас (покладемо для спрощення, що маса зорі  $S_1$  набагато більша, ніж зорі  $S_2$ ). Нехай відстань від Землі до цієї системи становить  $l$ , період обертання зорі  $S_2$  навколо  $S_1$  –  $T$ . Якби формула (2.2) була правильною, що лежало в основі так званої балістичної гіпотези (1908 р.) швейцарського фізика і математика **Вальтера Рітца** (1878 – 1909), то в положенні (1) світло від зорі  $S_2$  досягло б спостерігача в момент часу  $t_1 = \frac{l}{c-v}$ , а в положенні (2) – в момент  $t_2 = \frac{1}{2}T + \frac{l}{c+v}$ .

Звідси вишивало б, що при деяких  $l$  і  $T$  спостерігач міг би одночасно бачити одну і ту саму зорю  $S_2$  у двох різних (при  $l \approx \frac{1}{4} \times \left(\frac{c}{v}\right) cT$  – у протилеж-

них!) положеннях відносно зорі  $S_1$  (рис 2.1). Проте нідерландський астроном **Віллем де Сіттер** (1872–1934), проаналізувавши спостереження великої кількості подвійних зір, переконливо довів (1913 р.), що такого явища насправді немає. Отже, там, де йдеться про швидкості руху, співмірні зі швидкістю світла, формула складання швидкостей (2.2) просто неправильна. Бо насправді світло поширюється зі швидкістю  $c$  незалежно від того, в який бік – до спостерігача чи від нього – рухається саме джерело світла.

У 1905 р. в німецькому журналі «Аннали фізики» з'явилася стаття тоді ще нікому не відомого співробітника патентного бюро в Берні **Альберта Ейнштейна** «Про електродинаміку рухомих тіл». Два постулати, що були зформульовані в ній, цілком змінили класичні уявлення про простір і час та привели до відкриття глибокого внутрішнього зв'язку маси й енергії. Ось вони: 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.

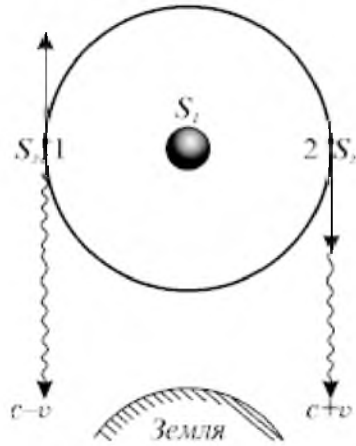


Рис. 2.1. Якби швидкості світлових променів і джерела світла склалися відповідно до уявлень класичної механіки, то зорю  $S_2$  – компонент подвійної системи можна було б бачити одночасно з двох боків відносно зорі  $S_1$ .

Для механічних рухів перший постулат був зформульований ще Галілеєм. З нього випливали й так звані *перетворення Галілея*, які тут доцільно подати. Розглянемо (рис 2.2), дві системи координат – систему  $K$  (в якій координати певної матеріальної точки позначимо через  $x$ ,  $y$  і  $z$ ) і систему  $K'$  (тут координати тої ж матеріальної точки мають значення  $x'$ ,  $y'$  та  $z$ ).

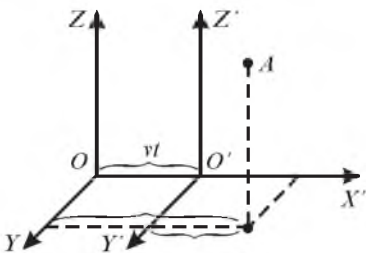


Рис. 2.2. Координата  $x'$  точки  $A$  в системі  $K'$ , яка рухається уздовж осі  $x$  зі швидкістю  $v$ , змінюється за законом  $x' = x - vt$

Нехай система  $K'$  рухається відносно системи  $K$  уздовж осі  $x$  зі сталою швидкістю  $v$ . З малюнка видно, що координати точки  $A$  в обох системах будуть зв'язані співвідношеннями

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z \quad (2.3)$$

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

$$t' = t. \quad (2.4)$$

Таке означає, що проміжки часу між одними й тими ж 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 (за приклад вище було взято другий закон Ньютона) інваріантні відносно перетворень Галілея.

Зовсім інакша ситуація в теорії відносності. Для ілюстрації візьмемо приклад, що його подають **А.Ейнштейн** та **Л.Інфельд** у книжці «Еволюція фізики», – приклад з 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 дру-

га наблизитися до нього. Тому ту стіну, яка віддаляється, сигнал досягне дещо пізніше, ніж ту, яка до нього наближається».

У зв'язку з цим в іншому місці **Ейнштейн** 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».

## Перетворення Лоренца

З постулатів Ейнштейна 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

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad (2.5)$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}.$$

І навпаки, координати й час у рухомій системі  $K'$  пов'язані з координатами і часом нерухомої системи  $K$  співвідношеннями

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad (2.6)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

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

Неважко переконатися, що за малих швидкостей  $v (v \ll c)$  такі співвідношення зводяться до рівнянь (2.3). Крім того, як це видно і з рівності

(2.1), 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.

А тепер поставимо таке запитання. Уявімо, що в нерухомій системі  $K$  у напрямі осі  $x$  зі швидкістю  $v$  рухається космічна ракета. У певний момент часу  $t=t=0$  від цієї ракети (системи  $K'$ ) зі швидкістю  $u$  у напрямі її руху відділяється менша ракета-2. Отже, з якою швидкістю остання буде рухатися відносно системи  $K$ ? Річ ясна, йдеться про швидкості  $v$  і  $u$ , співмірні зі швидкістю світла  $c$ , інакше ми просто скористалися б формулою (2.2).

Тут міркуємо так. У системі  $K$  за час  $t$  ракета-2 пройшла відстань  $x$ , у системі  $K'$  за час  $t'$  – відстань  $x'$ .

Відношення  $V = \frac{x}{t}$  буде швидкістю ракети-2 відносно нерухомої системи  $K$ , тоді як  $u = \frac{x'}{t'}$  – її швидкість відносно системи  $K'$ . Скориставшись співвідношеннями (2.5), знаходимо

$$V = \frac{x}{t} = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}. \quad (2.7)$$

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 (2.7) випливає закон складання швидкостей (2.2).

Швидкості, співмірні зі швидкістю світла, трапляються як при реєстрації елементарних частинок, так і під час вивчення просторого світу галактик. Як відомо, спостереження галактик показує, що лінії у їхніх спектрах зсунуті у червоний бік (ефект «червоного зміщення»), і то тим більше, чим далі від нас міститься джерело світла. На початок 2006 року вдалося отримати спектри галактик, для яких відносне зміщення  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx 6!$  Розглянемо випадок  $z=0,6$ .

Тоді лінію водню  $H_\delta$ , яка «у нормальному стані» в лабораторії спостерігається у фіолетовій частині спектра –  $\lambda_0 = 4102 \text{ \AA}$  – слід шукати у червоній ділянці спектра цієї галактики, бо тут  $\lambda = 1,6 \lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$ . У спектрах відомих квазарів червоне зміщення сягає таких же вели-



чин. Образно кажучи, спектральні лінії, які в лабораторних джерелах спостерігаються у видимій ділянці спектра, тут зсуваються у радіодіапазон...

У класичній фізиці відомий *ефект Доплера*: коли джерело світла рухається відносно спостерігача зі швидкістю  $v(v > 0$ , якщо внаслідок такого руху відстань між ними зростає), а  $\lambda_0$  – довжина хвилі, котру випромінює нерухоме джерело, то спостерігач насправді зареєструє довжину хвилі  $\lambda$ , так що

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}. \quad (2.8)$$

Проте ця формула правильна лише при  $v \ll c$  ( $v/c \ll 1$ ). І саме з постулатів спеціальної теорії відносності випливає формула так званого *релятивістського ефекту Доплера*

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} + 1 - \frac{v}{c}}}. \quad (2.9)$$

Далі ми побачимо, що 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 (2.9). Тут, як бачимо, при  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \rightarrow \infty$  маємо  $v \rightarrow c$ .

### За межі «здорового глузду»

«Здоровий глузд – ті забобони, які складаються у віці до вісімнадцяти років». Так висловився **Ейнштейн** не випадково, бо ж 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 впливають два важливі, але зовсім незвичні для нас висновки: 1) довжина якого-небудь 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 найменший у тій системі координат, відносно якої ці події перебували у стані спокою.

Справді, нехай у нерухомій системі  $K$  стрижень (для простоти розташуємо його уздовж осі  $x$ ) має довжину  $l$ , а координати його кінців будуть  $x_1$  та  $x_2$ . Очевидно, що  $l = x_2 - x_1$ .

Нехай тепер  $l' = x_2' - x_1'$  – довжина того самого стрижня у системі  $K'$ , яка рухається відносно системи  $K$  зі швидкістю  $v$  уздовж осі  $x$ . Довжина  $l'$  буде визначена правильно лише за умови, що координати кінців стрижня  $x_1'$  і  $x_2'$  будуть (у системі  $K'$ ) виміряні в один і той самий момент часу  $t'$ . Використовуючи перше із співвідношень (2.5), знаходимо такий зв'язок між  $l$  та  $l'$ :

$$l = x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{l'}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Таким чином, спостерігач, який рухається зі швидкістю  $v$  відносно системи  $K$ , зробить висновок, що довжина нерухомого стрижня

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2.10)$$

Зокрема, при  $v = 0,5c$  відносне скорочення становитиме 13%.

Таке саме явище скорочення довжини зареєструє спостерігач із системи  $K$ , коли він вимірюватиме довжину стрижня  $l'$ , нерухомого в системі  $K'$ . Він виявить, що

$$l = l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

тобто, як і раніше, що нерухомий стрижень  $l'$  довший від рухомого.

Така суперечливість зумовлена тим, що спостерігачі з систем  $K$  і  $K'$  не в змозі дійти згоди стосовно поняття «одночасності». Так, наприклад, спостерігач із системи  $K'$  вимірює довжину стрижня  $l$ , котрий рухається повз нього. Він бачить, що в момент  $t' = 0$  один кінець стрижня збігається з координатою  $x' = 0$ , другий –  $x' = l'$ . А тимчасом спостерігач із системи  $K$  висноує, що цей перший визначав положення кінців стрижня неодноразом, бо, мовляв, положення кінця  $x' = l'$  він визначив надто рано. Адже відповідно до останньої формули (2.6) виходить, що

при  $t = 0$ , коли один кінець стрижня в системі  $K$  перебуває у точці  $x=0$ , а другий – у точці  $x=l$ ,  $t'=0$  при  $x=0$ , але  $t' = -\frac{v}{c^2} \sqrt{1-\beta}$  (!) при  $x=l$ .

Не будуть рівними й тривалості певних подій, якщо розглядати їх з різних інерціальних систем, котрі рухаються одна відносно одної. Так, наприклад, нехай у точці  $x$  нерухомої системи  $K$  відбувається певна подія тривалістю  $t=t_2-t_1$ , де  $t_1$  і  $t_2$  – моменти її початку і кінця. Щоб знайти тривалість тієї самої події  $t'=t'_2-t'_1$  з погляду спостерігача із системи  $K'$  (який рухається відносно системи  $K$  уздовж осі  $x$  зі швидкістю  $v$ , використаємо останню формулу системи (2.6), записавши її для кінця (тобто виразивши  $t'_2$  через  $t_2$ ) і початку події (знайшовши  $t'_1$  через  $t_1$ ) та віднявши друге співвідношення від першого. Так отримуємо, що

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta}}. \quad (2.11)$$

Як і в випадку з вимірюванням довжини стрижня, можемо, перебуваючи в системі  $K'$ , розглянути тривалість події, котра відбувається в системі  $K$  (тоді  $x'_2=x'_1$ ). Висновок буде один: проміжок часу між двома якимись подіями завжди буде найменший у тій системі відліку, де ці події відбулися в одній точці.

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*.

Природа дає нам приклади реальності ефекту сповільнення часу. Так, скажімо, час життя елементарної частинки мю-мезона становить усього якихось  $2 \times 10^{-6}$  с. Коли б навіть така частинка рухалася зі швидкістю світла, то могла б пролетіти близько 600 м. Проте мю-мезони, утворювані при зіткненні космічних променів з атомами земної атмосфери на висоті декілька кілометрів, все-таки «встигають» пройти шлях аж до поверхні Землі. Отже, з погляду земного спостерігача час життя мезона  $t'$  в десятки разів перевищує його власний час  $t$  – тривалість життя мезона, який перебуває у спокої.

Важко примирити зі «здоровим глуздом» і відомий «парадокс близнят»: космонавт, котрий відвідав далекі зоряні світи та повернувся на Землю, виявить, що тут за «цей час» проминули ... сотні або навіть ти-

сячі років. Подамо формули, які дають змогу обраховувати найпростіший з варіантів такого перельоту, під час якого ракета, рухаючись зі сталим прискоренням  $a$  (скажімо,  $a = 10 \text{ м/с}^2$ ), половину шляху розгониться, а другу половину гальмується з тим самим прискоренням. Із теорії випливає, що з погляду земного спостерігача швидкість ракети  $u$  зростає (або потім зменшується) за законом

$$u = \frac{at}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{c^2} t^2}}, \quad (2.12)$$

що при  $t \ll \frac{c}{a}$  дає  $u \approx at$ . Відстань  $x$ , яку подолає ракета за час  $t$ , становить

$$x = \frac{c^2}{a} \left( \sqrt{1 + \frac{a^2}{c^2} t^2} - 1 \right). \quad (2.13)$$

Тут  $t$  – координатний час, що його вимірює спостерігач на поверхні Землі. Екіпаж зорельота реєструє власний час  $t$ . Коли в момент старту годинники на ракеті й на Землі було встановлено на «нуль», то в момент  $t$  координатного «земного» часу годинник у ракеті показуватиме час

$$\tau = \frac{c}{a} \ln \left( \sqrt{1 + \frac{a^2}{c^2} t^2} + \frac{a}{c} t \right). \quad (2.14)$$

Найближча до Землі зоря – Проксима Кентавра – міститься на відстані  $x = 4,28$  світлового року  $\gg 4 \cdot 10^{13}$  км (1 світловий рік =  $9,46 \cdot 10^{12}$  км). Приймаючи  $a = 10 \text{ м/с}^2$ , знаходимо, що з погляду земного спостерігача «фаза розгону» триває приблизно 2 роки 11 місяців, отож уся мандрівка буде продовжуватися 11 років 9 місяців. Мандрівники ж скажуть, що минуло усього близько 7 років, а отже, вони виявляться на 4 роки 9 місяців молодшими від своїх ровесників, які залишалися на Землі...

Мандрівка до галактики М31, що в сузір'ї Андромеди, при тому самому режимі польоту зайняла б усього близько 53 роки. На Землі «за той час» минуло б три мільйони років (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Повернувшись з мандрівки до далеких об'єктів, астронавт виявить, що на Землі за «цей час» проминули тисячі й мільйони років, а – прискорення, з яким відбувався політ.

## Про трансцендентні тахіони

І ще одне незвичне й парадоксальне. Останніми роками активно обговорюється питання про можливість існування *тахіонів* (від грецького «тахіс» – швидкий) – частинок з уявною масою, котрі рухаються зі швидкостями, більшими від швидкості світла. Але щоб суть цієї проблеми стала очевиднішою, треба звернути увагу ще на два важливі висновки спеціальної теорії відносності. Отож, передовсім із закону збереження кількості руху (добутку маси тіла на його швидкість) випливає, що маса тіла має неоднакові значення в різних інерціальних системах.

Коли  $m_0$  – маса тіла, виміряна у системі  $K$ , відносно якої така маса перебуває у спокої, то її величина в системі  $K'$ , що рухається відносно першої зі швидкістю  $v$ , визначається з формули, за виглядом (але не за змістом!) тотожної (2.1).

У сучасних прискорювачах (синхротронах) електрони розганяються до швидкостей 0,99999992  $c$ . За формулою (2.1) знаходимо, що маса електрона з погляду експериментатора зростає у 2500 разів.

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

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2.15)$$

Звідси випливає, що при  $v \rightarrow c$  енергія частинки  $E \rightarrow \infty$ , а випадок  $v > c$  був би взагалі неможливий. Жодна частинка, прискорюючись, не має змоги перебороти світловий бар'єр, бо для цього потрібно надати їй нескінченно велику енергію.

І все-таки фізики роблять висновок, що в принципі теорія відносності не заперечує надсвітлових рухів. Цьому питанню присвячена, зокрема, більша частина «Ейнштейновського сборника» за 1973 р. (М., «Наука», с. 84 і далі). Тут звертають увагу на такий факт: уже в «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 зму-

сити зникнути. А формула (2.15) 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. Тоді вираз для релятивістської маси матиме вигляд

$$m = \frac{m_*}{\sqrt{\left(\frac{v}{c}\right)^2 - 1}} \quad (2.16)$$

і, отже, релятивістська маса описувалася б дійсним числом.

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  $v=c$ , енергії *не має*. Для таких нескінченно швидких тахіонів запропоновано назву «трансцендентний тахіон». Зареєструвати такі частинки практично було б неможливо, бо в них немає ні енергії, ні імпульсу, які вони могли б віддати.

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

### Формула століття

Величезним досягненням спеціальної теорії відносності, як і фізики взагалі, було встановлення зв'язку між енергією і масою, що його вже записано раніше як формулу (2.15). 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, котре має масу  $m_0$  і рухається зі швидкістю  $v$ . А при  $v=0$  отримуємо співвідношення

$$E_0 = m_0 c^2, \quad (2.17)$$

так звану *енергію спокою* маси  $m_0$ .

Суть зв'язку маси й енергії з'ясував **Ейнштейн** у 1905 р. Він писав: «Коли тіло віддає енергію  $E$ , то його маса зменшується на  $E/c^2$ ...» І ще: «Не виключена можливість, що теорію вдасться перевірити для

речовин, енергія яких змінюється чималою мірою (наприклад, для солей радію)».

Сьогодні формула (2.17) лежить в основі усіх обрахунків, пов'язаних з будівництвом атомних електростанцій (йдеться про розпад ядер урану) і моделюванням процесів виділення енергії у надрах зір (синтез важких хімічних елементів, починаючи від ядер гелію). Саме спеціальна теорія відносності дала «ключ» і до розгадки питання про джерела енергії зір, питання, яке стояло перед астрономами близько 100 років.

Треба, проте, мати на увазі (як влучно висловився американський фізик **Джей Оріп**), що формула (2.17) зовсім не означає, нібито з одного кілограма піску можна отримати  $9 \cdot 10^{16}$  Дж енергії. Бо ж енергія спокую звільнюється лише *частково* під час взаємодії і об'єднування легких ядер (або, навпаки, а розпадом важких типу урану). Зокрема, об'єднання протонів і нейтронів у ядра гелію відбувається так, що загальна кількість важких частинок (баріонів) зберігається. Наприклад, 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 (2.17) знаходимо, що з утворенням одного ядра гелію виділяється енергія  $E = 4,3 \cdot 10^{12}$  Дж. Можна підрахувати, що при потужності (світності) Сонця  $L = 4 \cdot 10^{26}$  Вт. у його надрах щосекунди утворюється  $10^{38}$  ядер гелію. І ще: при «згорянні» маси водню, що дорівнює масі Сонця ( $2 \times 10^{33}$  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, котра міститься в центральних зонах Сонця, де температура достатньо висока для перебігу термоядерних реакцій.

Можна визначити також, на скільки зменшується маса Сонця за рахунок того, що воно щосекунди висвічує енергію  $L = 4 \cdot 10^{26}$  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.

Зауважимо: після встановлення взаємозв'язку (2.17) 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.

### Ілюзія «надсвітлових» рухів

У вільному просторі (вакуумі) швидкість світла є граничною швидкістю поширення будь-яких фізичних впливів. Однак у «звичайному», зокрема у міжзоряному 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 протигагу 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 цьому середовищі.

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. Ця остання обумовлена ефектами спеціальної теорії відносності.

На початку 60-х років був відкритий новий тип космічних об'єктів – квазари чи квазізоряні джерела – потужні позагалактичні джерела радіовипромінювання, що є, очевидно, ядрами молодих галактик, які формуються. Ці об'єкти на фотографічних пластинках мають вигляд звичайних зір, однак лінії в їх спектрах, як і в спектрах галактик, зміщені у червоний бік. У першого з відкритих квазарів 3С 273 (це позначення означає, що в Третньому Кембрідзькому каталозі радіоджерел цей об'єкт має номер 373) червоне зміщення  $z = \Delta\lambda/\lambda$  рівне усього 0,16, у найдальших (а всього цих об'єктів відомо понад 5000)  $z \approx 6$ .

Американський астроном **Т. Метьюз**, вивчаючи квазар 3С 286 (його червоне зміщення  $z \approx 0,85$ ), через 10 років після його відкриття знайшов, що навколо згаданого об'єкта утворилася туманність, якої на попередніх



фотографіях не було. З вимірів випливало, що ця туманність розширюється зі швидкістю, в декілька сотень разів більшою за швидкість світла.

Справді, нехай із точки А (від квазара) під кутом  $\alpha$  до променя зору зі швидкістю  $V$  летить хмара випромінюючих частинок (рис 2.4). За час  $Dt_2 = l/V$  ця хмара буде вже знаходитися в точці В, на відстані  $l$  від квазара. Нехай також  $t_0$  – момент часу, з якого почався розвиток явища. Очевидно, що видиме переміщення цього «світлового сигналу» у картинній площині починається на  $Dt_1 = l \cos \alpha / c$  пізніше, тобто в момент часу  $t_0 + Dt_1$ . Отже, відстань  $CB = l \sin \alpha$  «сигнал» проходить за час  $Dt = Dt_2 - Dt_1 = l/V - l \cos \alpha / c$ . Позначимо швидкість руху «сигналу» у картинній площині через  $v_{\perp}$ , так що  $CB = l \sin \alpha = v_{\perp} Dt$  і  $Dt = l \sin \alpha / v_{\perp}$  (рис. 2.4). Звідси знаходимо, що

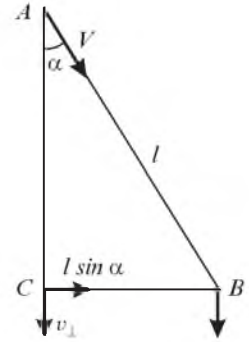


Рис. 2.4. До пояснення «надсвітлових» рухів поблизу квазарів і активних галактик.

$$v_{\perp} = \frac{V \sin \alpha}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha} \tag{2.18}$$

З цього співвідношення випливає, що при  $v \approx c$  швидкість  $v_{\perp}$  переміщення світлового сигналу в картинній площині справді може перевищувати швидкість світла  $c$ . Її залежність від кута  $\alpha$ , розрахована М.Райлом та М.Лонгейром (Англія), показана на рис 2.5.

Як курйоз слід згадати, що через якийсь час Т.Метьюз знайшов у своїх спостережних даних помилки. Проте описаний тут ефект справді спостерігається у декількох десятків квазарів при їхніх дослідженнях у радіодіапазоні.

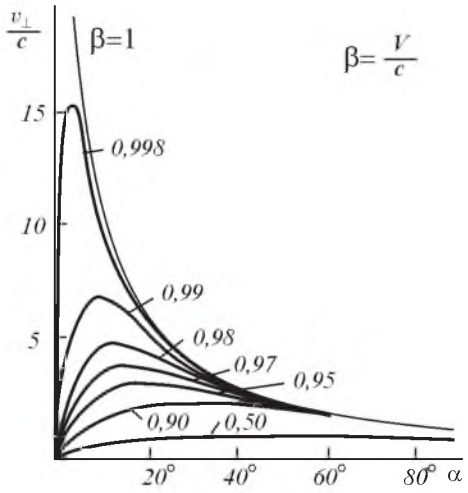


Рис. 2.5. Залежність швидкості «надсвітлового» руху в картинній площині  $v_{\perp}$  від кута  $\alpha$  між швидкістю речовини і напрямком «квазар-спостерігач»

### 3. «...БІЛЬШЕ МАТЕМАТИКИ»

Невеликий за обсягом твір Галілея «Пробірних справ майстер» прийнято називати маніфестом нового природознавства, який ставить докази, засновані на спостереженні, експерименті і точному математичному розрахунку, вище догми, авторитету і риторичних хитрувань. У цій книзі Галілей, обговорюючи проблему вибору системи світу, природу комет і особливості їх руху – на той час найактуальніші проблеми природознавства або, як тоді було прийнято говорити, *натуральної філософії* – 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 на мові 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».

Тут ми побачимо, що мова фізики як засіб опису законів природи безперервно удосконалюється й ускладнюється. А ще – обмежимося нагадуванням, що 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 зробимо невеличку екскурсію в царину елементарної геометрії. Накреслимо 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 *теорема Піфагора* знаходимо, що  $AB^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$  (рис. 3.1.).

Повернемо систему координат на довільний кут  $\varphi$ , тобто побудуємо ще одну прямокутну систему координат  $x'Oy'$  з тим самим 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.

Тепер повернемося до перетворень Лоренца (2.5) і (2.6) та складемо співвідношення  $S_{21}^2 = (x_2 - x_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$ . Підставляючи замість  $x$  і  $t$  їхні значення із системи (2.5), знаходимо після нескладних перетворень, що

$$S_{21}^2 = (x_2 - x_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 - c^2(t'_2 - t'_1)^2. \quad (3.1)$$

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:

$$S_{21}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 \quad (3.2).$$

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 чотирима числами –  $x, y, z$ . 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 (3.2) матимемо

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = \sum_{i=1}^4 dx_i^2. \quad (3.3)$$

Отже, величину  $ds$  (чи  $S_{21}$ ) 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 інак-

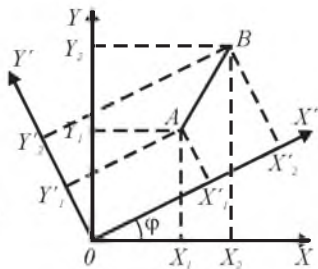


Рис. 3.1. При повертанні системи координат на довільний кут проєкції відрізка на координатні осі змінюються, проте сама величина відрізка залишається однаковою.

ше – послідовність подій, пов'язана з якимсь тілом), зветься *світовою лінією* цього тіла (рис. 3.2.).

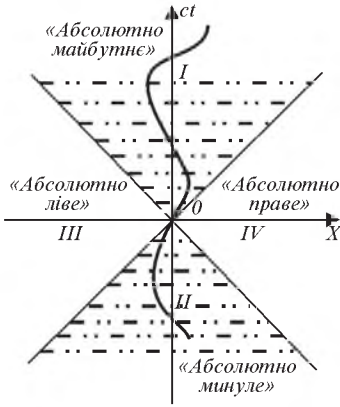


Рис. 3.2. Зображення світової лінії на площині Мінковського. Точка рухається уздовж осі  $X$  зі швидкістю, змінною як за величиною, так і за напрямком.

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

Як видно з виразу для інтервалу (3.2), тут може бути три випадки: 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  $t = t_2 - t_1$ . Тому подія 1 може бути причиною події 2, і цей порядок двох подій у часі в усіх інерціальних системах буде однаковий.

Коли  $|l| > ct$ , відстань між двома подіями перевищує відстань, яку може пройти промінь світла за час  $t$ . 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  $t$ . Це – *світлоподібний* інтервал.

На малюнку зображено світову лінію якогось тіла у випадку, коли його рух відбувається зі змінною швидкістю лише уздовж осі  $x$ . Зосередимо увагу на події  $O$ , яка відбулася в точці  $x=0$  та  $t=0$ . Відносно неї інші точки, що утворюють ділянку  $I$ , це події, які віддалені від події  $O$  («тут» і «тепер») часоподібними інтервалами, вони настануть *після* події  $O$  (і цей висновок не залежить від вибору системи координат). І

навпаки, в ділянці *II* знаходяться події «абсолютно минулі», коли порівнювати їх з подією *O*.

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 висловився **Ю.Й.Соколовський** (СРСР), тут розміщені події, про які ще рано знати, але на які вже пізно впливати. Вони не можуть бути ні причинами, ні наслідками події *O*.

Тут йшлося про «взаємні стосунки» спостерігачів, які перебувають у різних *інерціальних* системах. Інерціальною ж можна назвати лише систему, котра рухається рівномірно, прямолінійно і поступально (без обертання) відносно далеких зір, тобто фактично не зазнає щонайменшого впливу з боку інших тіл. Там, де йдеться про рухи зі швидкостями, близькими до швидкості світла (наприклад, коли обговорюється рух мезонів у земній атмосфері або рух частинок у сучасних прискорювачах), такими впливами й справді можна знехтувати. Проте загалом спеціальна теорія відносності мало придатна для опису реальних процесів, з якими стикаємося у щоденному житті – від падіння тіл на поверхню Землі до руху галактик у просторах Всесвіту. Ці реальні зв'язки матерії – простору – часу і становлять сутність *загальної* теорії відносності.

## Неевклідові геометрії

Упродовж тривалого часу здавалося абсолютно природним і логічним описувати геометричні властивості Всесвіту за допомогою геометрії, найважливіші елементи якої зформулював ще на початку *III* ст. до н.е. давньогрецький математик Евклід. В його геометрії, зокрема, сума кутів трикутника рівна  $180^\circ$ , а на площині через кожную точку, яка не знаходиться на заданій прямій, можна провести тільки одну паралельну їй пряму.

Геометрія Евкліда не викликала сумнівів протягом двох тисячоліть. І лише в 1826 р. **М. І. Лобачевський** (1792-1856), 1827 р. **Карл Гаус** (1777-1855) і в 1832 р. **Янош Больяй** (1802–1860) опублікували результати досліджень, з яких виходила можливість існування *неевклідової геометрії* – геометрії, де приведені вище положення (постулати) і впливаючі з них наслідки не виконуються.

Зараз важко уявити собі, наскільки драматичним був життєвий і творчий шлях згаданих вище учених. В передбаченні його Фаркаш Больяй писав своєму сину Яношу: «Благаю тебе, дай спокій вченню про паралельні лінії; ти повинен лякатися його, як плотських захоплень; воно позбавить тебе здоров'я, дозвілля, спокою, воно погубить щастя твого життя. Цей глибокий, бездонний морок може поглинути тисячу таких гігантів, як Ньютон; ніколи на землі не буде світла, і ніколи бідний рід людства не досягне досконалої істини, не досягне її і в геометрії; це жажлива вічна рана в моїй душі; хай береже тебе Бог від цього захоплення, яке так сильно оволоділо тобою. Воно позбавить тебе радості не тільки в геометрії, але і у всьому земному житті... Незбагненно, що в геометрії існує ця непереможена темнота, цей вічний морок, хмара, пляма на невинній, незайманій істині... Далі геркулесові стовпи; ні кроку вперед, або ти загинеш!»

Так воно і вийшло: лише три людини проводили останки Яноша Больяя до безіменної загальної могили. А в записі в реформаторській церкві хтось приписав: «Його життя минуло без жодної користі...». Піддався образам і Лобачевський, від нього відвернулися всі його учні. Побоявся опублікувати свої дослідження Гаусс: «Можливо, навіть, що я не зважуся на це упродовж свого життя, тому що боюся крику беотійців...», – писав він Бесселю в 1829 р. ...

Гаусс розробив метод, що дозволяє безпосередньо досліджувати викривлення тієї або іншої поверхні. Як відомо, уявлення про кулястість Землі склалося на підставі зміни висоти Полярної зорі при пересуванні мандрівника з півночі на південь і навпаки, а також унаслідок спостережень наближення корабля до берега, коли спочатку видна його щогла, а потім вже й корпус. А якби Земля постійно була закрита щільними низькими хмарами або з якихось причин далекі кругосвітні подорожі були б неможливими, що тоді? Невже ми так і не знали б, що живемо не на плоскій, а на кулястій планеті? Гаусс і показав, що таку задачу можна розв'язати за допомогою звичних землемірних інструментів. Він знайшов, що всі кількісні геометричні властивості поверхні («двовимірного простору») приховані в елементі відстані між двома його довільними точками.

Візьмемо якусь викривлену поверхню і перетнемо її площиною, що проходить через нормаль, проведenu до цієї поверхні в довільній точці *P*. Так ми одержуємо криву лінію, яку в околі точки *P* можна розгляда-

ти як дугу кола з деяким радіусом  $a$ . Як виявилось, для кожної точки на поверхні завжди можна знайти два взаємно перпендикулярних напрямки перетину так, що один із радіусів ( $a_1$ ) буде найменшим, інший ( $a_2$ ) – найбільшим. Величину  $k = \frac{1}{a_1 a_2}$  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

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2 \quad (3.4)$$

Відмітивши на поверхні три пари точок і визначивши відстані між ними ( $ds$ ) і проекції 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*.

У 1854 р. німецький математик **Бернгард Ріман** (1826–1866) узагальнив метод Гаусса на довільне число вимірювань. Він встановив, що і в цьому випадку можна побудувати внутрішню геометрію  $n$ -вимірному 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* (рис. 3.3.). У цьому випадку геодезичні лінії мають нескінченну протяжність.

Щоб зрозуміти суть загального методу Рімана, перепишемо останнє співвідношення в дещо іншому вигляді. З цією метою введемо для ко-

ординат  $u$  і  $v$  позначення  $x^1$  і  $x^2$ , а замість  $E$ ,  $F$  і  $G$  відповідно  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$ . Тоді отримаємо

$$ds^2 = g_{11}(dx_1)^2 + g_{12}dx_1dx_2 + g_{21}dx_2dx_1 + g_{22}(dx_2)^2$$

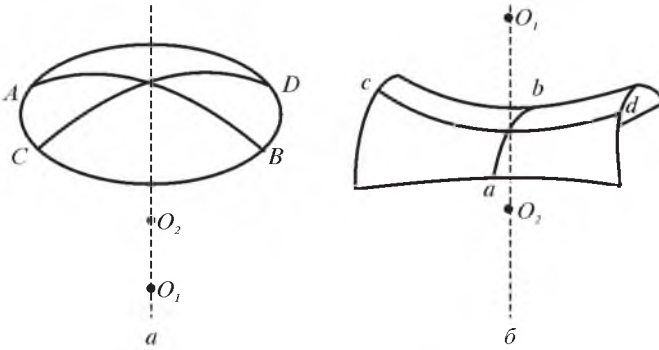


Рис. 3.3. Положення центрів кіл, радіуси яких визначають кривину і тим самим тип геометрії – Рімана (а) або Лобачевсько-го – Больяя (б)

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

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^4 g_{ik} dx^i dx^k. \quad (3.5)$$

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*.

Окремим випадком чотиривимірного ріманового простору є простір – час Мінковського спеціальної теорії відносності. У цій теорії величина  $ds$  – інтервал між двома світовими точками – визначається співвідношенням (3.3). Як бачимо, тут  $g_{11} = g_{22} = g_{33} = g_{44} = 1$ , а  $g_{ik} = 0$ , при  $i \neq k$ . Необхідно додати, оскільки це дуже важливо, що геометрія цього пус- того простору являється евклідовою, точніше, її називають *псевдо евклідовою*. Насправді, координата часу  $x_4 = i\mathbf{ct}$  на відміну від просторових координат була визначена уявним числом ( $i = \sqrt{-1}$ !). Якщо записати її у вигляді дійсного числа, а саме  $x_4 = \mathbf{ct}$ , то одержимо інший набір метричних коефіцієнтів:  $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$ , а  $g_{44} = -1$ . У зв'язку з важливою роллю часової координати геометрію чотиривимірного простору Мінковського і називають *псевдоевклідовою*.



## Елементи тензорного аналізу

Услід за **П. С. Кудрявцевим** (Історія фізики, 1971. – Т. III., с. 89) відзначимо, що «в історії теоретичної фізики кожний новий крок супроводжується новими вимогами до математичного апарату. Ньютон, закладаючи основи класичної механіки, був вимушений створити новий математичний апарат – диференціальне й інтегральне числення. І хоча він висловлював у своїй основоположній праці нові ідеї на мові старої геометрії, було ясно, що стара геометрія не могла відповідати новим задачам... Телер Ейнштейн, створюючи загальну теорію відносності, спирався на математичний апарат тензорного аналізу, основи якого були закладені ще в роботі Крістоффеля 1869 р. ... і розвинені Річчі – Льові в роботі 1901 р. ...»

Ймовірно, маючи у вигляді всю складність цієї нової «мови природи», Ейнштейн одного разу пожартував: «Математика – це єдиний досконалий метод водити самого себе за ніс...»

Загальна теорія відносності описує властивості чотиривимірного простору – часу з урахуванням конкретного розподілу матерії. Тут уже неможливо ввести декартову координатну систему, а роль прямих у ній, як згадувалося, грають геодезичні лінії. Все ж таки співвідношення і закони формулюються на мові тензорного числення, завдяки чому їх форма залишається незмінною при переході від однієї довільної системи координат до іншої. Деякі елементи цього складного математичного апарату ми все-таки вимушені тут привести. Перш за все, вибравши в  $N$ -вимірному просторі довільну систему координат, можемо характеризувати положення кожної його точки  $N$  координатами  $(x^1, x^2, x^3, \dots, x^N)$ . Очевидно, що при переході від системи координат  $X$  до системи  $Y$  кожна координата  $y^j$  буде функцією всіх координат  $x^k$ :  $y^j = f^j(x^1, x^2, \dots, x^N)$ . Формула, якою визначається перетворення диференціалів (малих приростів) при переході до системи координат  $Y$ , має вигляд

$$dy^j = \sum_{k=1}^N \frac{\partial f^j}{\partial x^k} dx^k = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^j}{\partial x^k} dx^k. \quad (3.6)$$

Розглянемо тепер 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 ці функції при переході від системи  $X$  до системи  $Y$  перетворюються за наведеним тут законом (як диференціали координат), то ці функ-

ції називаються компонентами контраваріантного *тензора* 1-го рангу. Тут маємо

$$V^i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^j}{\partial x^k} V^k, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3.7)$$

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

$$W_i' = \sum_{k=1}^N \frac{\partial x^k}{\partial y^j} W_k, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.8)$$

то їх сукупність називається *коваріантним* тензором 1-го рангу. Для скорочення запису знак суми прийнято не ставити, але слід пам'ятати, що коли 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:  $W_i' = \frac{\partial x^k}{\partial y^j} W_k$ .

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

$$T'^{ik} = \frac{\partial y^j}{\partial x^m} \frac{\partial y^k}{\partial x^n} T^{mn}, \quad (3.9)$$

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

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 *зміаного* тензора. У цьому випадку закон перетворення тензора 2-го рангу має вигляд

$$P_i'^k = \frac{\partial y^k}{\partial x^m} \frac{\partial x^n}{\partial y^j} P_n^m. \quad (3.10)$$

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

$$R_{\beta\gamma\delta}^{\alpha} = \frac{\partial y^\alpha}{\partial x^i} \frac{\partial x^k}{\partial y^\beta} \frac{\partial x^m}{\partial y^\gamma} \frac{\partial x^n}{\partial y^\delta} R_{kmn}^i. \quad (3.11)$$

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 ( $C_{mn}^{ik} = A_n^i B_m^k$ ). Важливу роль у тензорній алгебрі відіграє *операція згортання*, 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:

$$R_{m\alpha}^{j\alpha} = R_{m1}^{j1} + R_{m2}^{j2} + \dots + R_{mN}^{jN} = R_m^j \quad (3.12)$$

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 згортання:  $R^j = R_1^j + R_2^j + \dots + R_N^j = R$ , внаслідок якої одержимо скалярну величину  $R$  – *інваріант* даного 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 співвідношення (3.5), визначають відстань між двома близькими точками у просторі чотирьох вимірів. Метричні коефіцієнти в сукупності складають коваріантний тензор 2-го рангу. Нехай

$$g = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1N} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N1} & g_{N2} & \dots & g_{NN} \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

– *детермінант*, складений з компонентів фундаментального метричного тензора, величина якого не рівна 0. Якщо далі знайти алгебраїчне доповнення  $A_{ik}$  до кожного елемента  $g_{ik}$  цього детермінанта, то

можна знайти і контраваріантні метричні коефіцієнти  $g^{ik} = \frac{A^{ik}}{g}$ . З властивостей детермінантів випливає, що добуток  $g^{ik} g_{im} = \delta_m^k$ , де  $\delta_m^k$  – *символ Кронекера*:  $\delta_m^k = 1$  при  $k=m$  і при  $\delta_m^k = 0$  при  $k \neq m$ .

Помноживши довільний тензор на метричний тензор  $g_{ik}$  або  $g^{ik}$ , можна здійснювати «підймання» і «опускання» його індексів, тобто переводити коваріантний тензор в контраваріантний (або змішаний), і навпаки. Наприклад,  $V_k = g_{ik} V^i$ ,  $V^k = g^{ik} V_i$

$$T_i^k = g_{im} T^{nk}, \quad T_{mn} = g_{mi} T_n^i = g_{mi} g_{nk} T^{ik} \quad (3.14)$$

У випадку евклідової геометрії поняття контраваріантних і коваріантних величин співпадають за визначенням, оскільки компоненти метричного тензора відповідно рівні  $g^{ik} = g_{ik} = 1$  при  $i=k$  і  $g_{ik} = g^{ik} = 0$ , якщо  $i \neq k$ .

У тензорному аналізі велике значення має задача про порівняння двох тензорів, що знаходяться в різних точках  $N$ -вимірного простору. Адже при переході від якоїсь точки  $M_1$  (з координатами  $x$ ) у близьку до неї точку  $M_2$  (з координатами  $x + dx$ ) напрями координатних ліній змінюються. Якщо, наприклад,  $dV$  – повний приріст величини  $i$ -ї компоненти контраваріантного тензора  $V$  при переході від точки  $M_1$  до точки  $M_2$ , то в ньому «прихована» частина приросту  $dV$ , обумовлена тільки зміною напрямів координатних ліній. Про реальну ж зміну величини складових тензора на проміжках  $dx^k$  свідчить різниця  $DV = dV - dV$ . Поділивши її на величину  $dx^k$ , знаходять *коваріантну похідну* тензора

$$V^i_{/k} = \frac{\partial V^i}{\partial x^k} + \Gamma_{km}^i V^m, \quad (3.15)$$

де

$$\Gamma_{mk}^i = \Gamma_{km}^i = \frac{1}{2} g^{in} \left[ \frac{\partial g_{mm}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{kn}}{\partial x^m} - \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^n} \right] \quad (3.16)$$

– символ *Крістоффеля* другого роду. У випадку змішаного тензора другого рангу  $T_i^j$  маємо відповідно

$$T^i_{j/k} = \frac{\partial T^i_j}{\partial x^k} - \Gamma_{ik}^m T^j_m + \Gamma_{mk}^j T^i_m, \quad (3.17)$$

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

Складемо коваріантну похідну деякого тензора  $T_{i/k}^j$ , 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*:

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma^i_{km} \frac{dx^k}{ds} \frac{dx^m}{ds} = 0, \quad (3.18)$$

які в сукупності становлять складну систему диференціальних рівнянь другого порядку. Їх інтегрування проводиться з урахуванням певних початкових умов. До речі, геодезичну лінію отримуюмо наглядно із рівняння руху вільної частинки в криволінійній системі координат. Справді, повний приріст чотирирівимірної 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 вельми стислого викладу елементів тензорного аналізу повернемося до питання про кривину чотирирівимірного простору – часу. Саме при її визначенні використовується уявлення про паралельне перенесення вектора. Операція паралельного перенесення вектора  $V^i$  якраз і полягає у визначенні приросту  $dV^i$ , який виражено вище через символи Крістофеля. У плоскому просторі унаслідок паралельного перенесення вектора уздовж замкнутого контура одержуємо той же вектор. У викривленому ж просторі результат паралельного перенесення 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  $90^\circ$  (геодезичні лінії!). Розглянемо вектор  $V_i$ , який у точці  $A$  дотичний до екватора і спрямований до сходу. 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 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 спрямований по дотичній до дуги  $AC$ . При дальшому перенесенні його до точки  $A$  одержуємо вектор  $V_4$ , напрям якого складає з початковим вектором кут  $90^\circ$ . 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 (рис. 3.4).

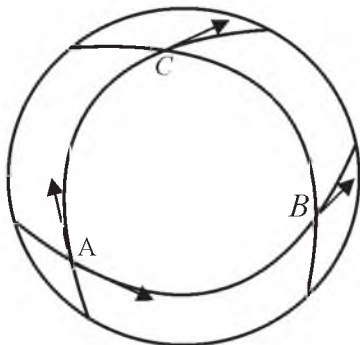


Рис. 3.4. При паралельному перенесенні вектора  $V_1$  уздовж контура  $ABCA$  одержуємо вектор  $V_4$ , напрям якого на  $90^\circ$  відрізняється від початкового; такий паралельний перенос вектора уздовж малого замкнутого контура дає можливість визначити міру викривлення поверхні.

Міру викривлення  $N$ -вимірному 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  $Ds$  – площа, обмежена цим контуром, уздовж якого здійснюється паралельне перенесення вектора, а кут  $Dj$  – кут між початковим і кінцевим напрямими ве-

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

$$\lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta\sigma} \sim R_{ikmn} \quad (3.19)$$

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

$$R_{ikmn} = g_{ij} R^i_{kmn} = g_{ij} \left[ \frac{\partial \Gamma^j_{kn}}{\partial x^m} - \frac{\partial \Gamma^j_{mn}}{\partial x^k} + \Gamma^s_{kn} \Gamma^j_{ms} - \Gamma^s_{mn} \Gamma^j_{ks} \right] \quad (3.20)$$

Загальне число компонент цього тензора  $4^4 = 256$ , але незалежними з них є лише 20, оскільки виконуються умови його симетрії, асиметрії і

циклічності, зокрема,  $R_{ikmn} = -R_{kimm}$ ,  $R_{ikmn} = R_{kinn}$ . Необхідною і достатньою умовою переходу від ріманової геометрії до плоскої евклідової є рівність тензора кривини нулю:  $R_{kmm}^i = 0$ . У загальній теорії відносності дуже важливу роль грає симетричний тензор другого рангу  $R_{mn} = R_{kmm}^k$  – тензор Річчі, який одержують внаслідок операції згортання тензора Рімана – Крістофеля. Тензор має такий вигляд:

$$R_{mn} = \frac{\partial^2 \ln \sqrt{g}}{\partial x^m \partial x^n} - \Gamma_{mn}^i \frac{\partial \ln \sqrt{g}}{\partial x^i} + \Gamma_{mi}^s \Gamma_{ns}^i - \frac{\partial \Gamma_{mn}^s}{\partial x^s}. \quad (3.21)$$

Помноживши компоненти тензора  $R_{mn}$  на  $g^{nk}$ , знаходимо змішану форму тензора Річчі:  $R_n^k = g^{mk} R_{mn}$ . Далі за допомогою операції згортання знаходимо інваріант кривини  $R = R_n^n$ .

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

$$g^{11} = \frac{1}{a^2}, g^{12} = g^{21} = 0, g^{22} = \frac{1}{a^2 \sin^2\varphi}. \quad \text{З усіх символів Крістоффеля не}$$

рівні нулю лише такі:  $\Gamma_{22}^1 = -\frac{1}{2} \sin 2\vartheta, \Gamma_{21}^2 = \Gamma_{12}^2 = \cot\vartheta$ . Із 16 компонентів

тензора Рімана – Крістофеля незалежна тільки одна:  $R_{1221} = -a^2 \sin^2\varphi$ . Своєю чергою тензор Річчі має два ненульові компоненти:  $R_{11} = -1$  і

$$R_{22} = -\sin^2\varphi. \quad \text{Інваріант кривини } R = g^{11} R_{11} + g^{22} R_{22} = -\frac{2}{a^2}. \quad \text{Таким чином,}$$

у двовимірному світі знайдений інваріант кривини з точністю до множника – 2 співпадає з кривиною Гаусса  $1/a^2$ .

## Якісна геометрія

Навоколишній світ постає перед дослідником за своєю геометрією не лише з кількісної, але і з якісної сторони. І вже в першій роботі А. Ейнштейна з космології йшлося не тільки про радіус тривимірної сфери Всесвіту (про її *кількісну*, метричну характеристику), але і про те, що

це саме замкнута сфера (характеристика *якісна*, топологічна). Розмову про складні проблеми *топології* і її відношення до космології краще всього почати з найпростіших прикладів.

...На аркуші паперу малюємо трикутник. При цьому приймаємо, що цей листок є невеликим «уламком» площини, на якій виконуються всі аксіоми евклідової геометрії, зокрема, сума кутів трикутника рівна  $180^\circ$ . За допомогою певного масштабу ми можемо виміряти відстані між вершинами трикутника, обчислити його площу. Відзначимо також, що гауссова кривина двовимірного простору – аркуша, на якому намальована згадана фігура, рівна нулю.

Зігнувши аркуш у трубку і склеївши його протилежні краї, одержуємо циліндр. Унаслідок такого перетворення жодна зі згаданих тут характеристик фігури і простору не змінилася: сума кутів трикутника і далі рівна  $180^\circ$ , такими ж залишилися відстані між його вершинами і площа, гауссова кривина циліндра, як і раніше, рівна нулю.

Довгу паперову стрічку (дуже витягнутий прямокутник) згинаємо, перекручуємо на півоберта і склеюємо протилежні вузькі краї. Звернемо увагу на те, що «в невеликих масштабах» геометрія на такій поверхні не відрізняється від евклідової. Проте жучок, який повзе на однаковій відстані від країв цього двовимірного простору, повернувшись в початкову точку, виявиться на протилежному боці аркуша. Не виходячи за край поверхні, можна одним рухом пензля пофарбувати їй «лице» і «вिवоріт» в один колір. Якщо ж уявити собі цю стрічку річкою, то один її берег буде продовженням іншого! Це – так звана *однобічна поверхня Мебіуса*, що є класичним прикладом «неорієнтованого» двовимірного простору, де після «кругосвітньої» подорожі виявляється, що «праве» стало «лівим», «верх» перетворився на «низ» і навпаки.

З тих двох прикладів напрашується висновок: для повної геометричної характеристики простору (скажемо конкретно – поверхні циліндра) недосить задати його кількісні характеристики (зокрема, кривину Гаусса), необхідно вказати ще і його певні якісні риси. В цьому і полягає задача *топології*, яку іноді також називають *якісною геометрією*. Відповідно розмежовують *метричні* (кількісні) і *топологічні* (якісні) властивості простору. Перші пов'язані з вимірюванням відстаней, кутів і площ. Метричним називаємо такий простір, в якому можна задати відстань між двома довільними точками. Як довів Гаусс (і про це вже йшлося), метрика простору визначає його кількісну або внутрішню геометрію, причому форма поверхні тут часто грає другорядну роль.



Поглянемо тепер, як топологія описує властивості окремих геометричних фігур. З точки зору цієї галузі науки піраміда, куб і куля (у двовимірному світі – трикутник, квадрат і коло!) належать до одного і того ж топологічного типу (кажуть: ці фігури *гомеоморфні*). Надуваючи еластичну гумову модель піраміди (кажуть: застосовуючи топологічне перетворення), можна надати їй форму кулі. І навпаки, деформуємо цю кулю, перетворимо її в куб. Однак ніякими зусиллями кулю не можна перетворити на тор – «бублик» (скажімо, камеру футбольного м'яча – на камеру велосипедної шини). Аналогічно у двовимірному світі трикутник можна деформувати в коло, еліпс або квадрат, але топологічні властивості всіх цих фігур будуть однаковими.

Топологія й вивчає властивості геометричних фігур, які зберігаються при розтягуваннях і стиску (аби лишень це не супроводжувалося розривами і склеюванням). Гомеоморфні фігури можна назвати різними метричними реалізаціями одного і того ж топологічного взірця.

Важливою топологічною характеристикою є *зв'язність*. Це, образно кажучи, властивість простору складатися з одної або з декількох частин. Для прикладу візьмемо дві плоскі фігури (точніше, тут – зони) *A* і *B* (рис. 3.5). Перша складається з усіх точок, що містяться всередині кола, друга – з усіх точок, розташованих між двома концентричними колами. Намалювавши в зоні *A* замкнуту криву, ми можемо «стягнути» її в одну точку. Саме це і є характеристикою однозв'язної зони. Замкнуту ж криву, яка охоплює внутрішнє концентричне коло зони *B*, стягнути в точку неможливо. І лише зробивши один розріз зони, можна перетворити її на однозв'язну.

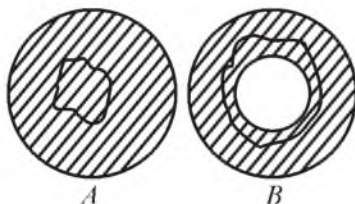


Рис. 3.5. Однозв'язна (*A*) і двозв'язна (*B*) зони

Зв'язність зони (або довільної фігури) вимірюється кількістю розрізів  $n$ , які переводять її у однозв'язну, збільшеним на одиницю:  $p=n+1$ . У свою чергу поверхня сфери однозв'язна. А от циліндр, який ми одержали згортанням і склеюванням протилежних країв листа, є за своїми топологічними властивостями зовсім інакшим двовимірним простором. Тут замкнений контур – «поясок», що утворився після співпадання двох точок, які раніше були на протилежних краях аркуша, стягнути в точку ніяк не вдасться. Тому кажемо, що метрика цього двовимірного простору при згинах не змінилася, але його топологія, його «глобальні власти-

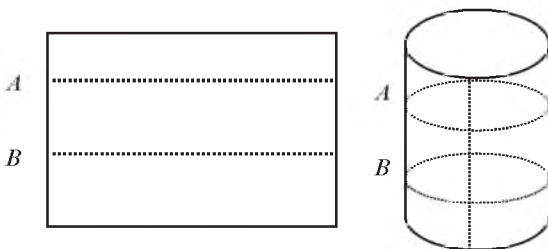


Рис. 3.6. Зігнувши аркуши паперу в трубку і склеївши протилежні сторони, одержуємо двовимірний простір, у якому діє геометрія Евкліда, але в одному напрямі – уздовж лінії  $AA$  – цей простір має скінченну протяжність.

вості» стали інакшими, зокрема, простір в одному напрямі став скінченним. Зв'язність поверхні циліндра  $\rho=2$ .

Зігнувши еластичну модель циліндра уздовж осі і склеївши ще раз краї, одержимо тор – «бублик». Геометрія цієї фігури взагалі дуже незвичайна: на її зовнішній стороні кривина додатня, на внутрішній – від'ємна, на двох кільцях «зверху» і «знизу» кри-

визна рівна нулю. «Уявні двовимірні мешканці тора, – пише **Г. І. Наан**, – могли б вести палкі нерозв'язні суперечки про скінченність – нескінченність свого «всесвіту». І лише у випадку, якщо б їм вдалося здійснити декілька «кругосвітніх подорожей», вони могли б дійти висновку, наскільки складні глобальні властивості їх «всесвіту»...».

Тор є прикладом тривзв'язної поверхні. Тут є два класи ліній («меридіани» і «паралелі»), які неможливо стягнути в одну точку. Перетворити цю поверхню на однозв'язну (на частину площини) можна лише за допомогою двох розрізів, що перетинаються.

Топологія якраз і характеризує такі особливості простору, як число його вимірів, зв'язність, неперервність, орієнтованість. Тепер з урахуванням всього тут сказаного ми можемо щодо евклідового простору зформулювати таке твердження: евклідовий тривимірний простір безмежний, а його протяжність – нескінченна. Перша з цих ознак відображає *топологічні* властивості: простір ні в якому напрямі не має межі, друга ознака має *метричний* характер, указуючи, що в будь-якому напрямі можна просуватися (і відкладати одиницю вимірювання) як завгодно далеко. В цілому ж для характеристики топологічних властивостей простору застосовують поняття «замкнений» (метрична риса – «скінченний») і «відкритий» (метричне – «безконечний») простір.

Одним з найактуальніших завдань космології і є якраз з'ясування зв'язності реального космічного простору (простору – часу). Грубо кажучи, питання полягає в тому, чи можна, накресливши уявну сферу певного радіуса і зменшуючи його величину, стягнути її в точку, не зустрів-

ши при цьому якись «аномалії», де «звичне» нам уявлення про простір – час зазнало б краху. Прикладами таких ділянок (і можна вважати, не єдиними!) є чорні діри (див. розділ 5). Адже, з погляду далекого спостерігача, мандрівник не може за скінчений час досягти сфери Шварцшільда, яка оточує чорну діру. А все те, що міститься всередині цієї сфери, взагалі «уникає» нашого опису просторово-часових відношень.

Детальний аналіз різноманітних топологічних моделей Всесвіту – справа майбутнього. Бо ж, як твердить Філософ у розмові з Фізиком у книзі **О. М. Мосгепаненка** «Простір і час у макро-, мега- і мікросвіті», «виходячи з положення про невичерпність матерії «у ширину», слід допустити невичерпну багатоманітність у світі не лише явищ, типів взаємозв'язків і закономірностей, але й просторово-часових форм і відносин... А якщо так, то немає підстав вважати універсальними, у широкому філософському значенні цього слова, не лише метричні, а й топологічні властивості простору – часу. У деяких ділянках світу, далеких від нашого макроскопічного досвіду, можуть реалізуватися і дискретні й багатомірні простори і ще безліч інших просторів набагато складнішої природи... ».

### **Відносність ... нескінченності**

Як ми вже бачили, в сучасній космології доводиться строго розрізнити поняття нескінченності і безмежності: простір Всесвіту може виявитися безмежним, але все таки мати скінченний об'єм. Однак довгий час між цими двома поняттями не бачили істотної різниці. Так, вже давньогрецьким філософам здавалося само собою очевидним, що в просторі немає такої точки (межі), за якою не було ще віддаленішої..., і так до нескінченності.

Правда, при уважнішому вивченні питання виявилось, що саме поняття нескінченного набагато глибше. Вже античні філософи і математики розуміли, що простір можна мислити нескінченим не тільки в ширину, за його протяжністю (так звана *екстенсивна безконечність*), але й у кожному даному місці « в глибину», в значенні нескінченної необмеженої подільності на все менші частини (*інтенсивна безконечність*). В останньому випадку вони і зіткнулися з суперечністю, що проявила себе у формі апорій Зенона.

Розглядаючи проблему нескінченного, Аристотель допускав, що простір подільний до безмежності, проте лише «у потенції», за можливістю («потенціальна безконечність»), але не актуально, не насправді. Актуальної ж безконечності, мовляв, не існує.

З свого боку, німецький математик **Давид Гільберт** (1862–1943) висловився так: «З'ясування сутності нескінченного виходить за межі вузьких інтересів спеціальних наук і... стало необхідним для честі самого людського розуму». Услід за ним філософ **Г.І.Наан** додав: «Проблема нескінченності належить до числа «вічних» проблем, які кидають виклик нашому духові».

Як підкреслив Г.І.Наан, сьогодні можна говорити про існування «нескінченно різних типів безконечності». Деякі з них мають безпосереднє відношення до космології. Серед них логічно найпростішою і найчастіше вживаною є *практична нескінченність*. Тут мається на увазі число дуже велике (або дуже мале) порівняно зі всіма іншими, з якими стикаємося при обговоренні тієї або іншої проблеми. Так, нескінченно великою буде величина 100 світлових років, якщо йдеться про відстань від Землі до Місяця (світло проходить його за 1,3 с.). Доречно тому навести тут і слова **Е.М.Чудинова** (СРСР): «Уявлення про нескінченність зформувалося в людини не в силу того, що вона колись там зуміла оглянути нескінченність, а як ідеалізація дуже великих, але скінченних величин і відстаней».

Ньютонівська космологія ґрунтувалася на припущенні, що простір є евклідовим. Тому тут і не було особливої необхідності розмежовувати поняття безконечності і безмежності. Оскільки ж конкретні космологічні міркування неминуче пов'язуються з визначенням відстаней між окремими об'єктами у Всесвіті, то тут можна було говорити про метричну нескінченність, тобто про ситуацію, за якої відстані між двома точками (наприклад, галактиками) можуть сягати нескінченно великих значень.

Після створення в ХІХ ст. неевклідової геометрії стало очевидним, що поняття *безконечність* і *безмежність* істотно відрізняються. Візьmemo як приклад двовимірного світу поверхню Землі. Рухаючись уздовж екватора, мандрівник, пройшовши скінченну відстань 40 000 км, повернеться до тої самої точки, не зустрівши ніякої *межі*. «Пряма» в такому двовимірному світі – це дуга великого кола, замкнута на себе. Аналогічно в тривимірному світі, якщо він замкнутий, уявний мандрівник, рухаючись «по прямій», може «обійти світ» і також, не зустрівши межі, повернутися до вихідної точки. В обох випадках йдеться про безмежний, але скінченний світ. Релятивістська космологія, що базується на теорії відносності Ейнштейна, дає деякі підстави припускати, що саме таким безмежним, але скінченним може бути наш Всесвіт.

Створюється враження, що висновок про скінченність або нескінченність Всесвіту можна одержати (принаймні теоретично) на основі астрономічних спостережень. Але ось як цю проблему розцінює Г.І.Наан: «...проблема нескінченності Всесвіту... це суміжна проблема математики, природознавства і філософії, і вона, мабуть, взагалі не може мати вичерпного розв'язку за скінченний час існування будь-якої цивілізації (у тому числі й земної), оскільки безконечність невичерпна і поняття нескінченності безперервно змінюється у міру розширення наших знань».

Детальний аналіз дав можливість дійти висновку, що поняття скінченого і безконечного є відносним! От як про це пише російський космолог **А.Л.Зельманов** (1913–1987): «В рамках загальної теорії відносності має місце відносність скінченності і безконечності простору і часу... Ця відносність, встановлена спочатку для порожнього простору, знайдена і для випадку світу, заповненого масами. В обох випадках в одних системах відліку простір нескінченний, в інших він завжди скінченний, але прямує до безконечності в нескінченно віддаленому майбутньому або в нескінченно віддаленому минулому».

Варті уваги і такі слова **Г.І.Наана**: «Друга обставина, яка не дозволяє нам бути тепер такими благодушними, як в недавньому минулому, пов'язана з топологією. Вся проблема перебуває фактично на початковій стадії вивчення, і тут дуже багато неясного... Наприклад, ми можемо дійти висновку про існування замкнутого простору, але зовсім не зможемо стверджувати на цій підставі, що це увесь простір, як передбачалося у минулому. Відкриття надджерел... змушують вводити уявлення про багатозв'язний простір, а тому стає все важче уникнути висновків про можливість патологічних зон простору – часу, де можуть порушуватися принаймні деякі «абсолютні» закони збереження... Можливо, що напівкласичний етап в розвитку релятивістської космології закінчився, ми вступили у справді некласичний етап. Розуміння розмаїття типів і аспектів нескінченності повинне сприяти більш холоднокровному сприйняттю сюрпризів, які нас очікують».

Отже, додатня кривина є необхідною, але не достатньою умовою скінченності простору. Як відзначав ще **О.О.Фрідман**, щоб простір такого типу можна було розглядати як скінченний, необхідно мати дані про його однозв'язність. Це одна з найважливіших топологічних характеристик простору.

У релятивістській космології вводиться поняття супутних координат, пов'язаних із матеріальним середовищем таким чином, що вона

щодо цих координат перебуває у спокої. Наявність такої привілейованої системи відліку і дає можливість ввести єдиний *космологічний час*. Як же у такому випадку можна говорити про відносність просторової і часової скінченності та безконечності?

Питання детально проаналізував **А. Л. Зельманов**. В найпростішому випадку можна розглянути порожній світ Мінковського, в якому з нерухомими пробними частинками пов'язана супутня («жорстка») система координат  $K$ . Нехай у такій системі відліку в деякий момент часу з якоїсь точки у всіх напрямках вилітає незліченна кількість частинок зі швидкостями від  $v=0$  до  $v=c$ . Очевидно, що ці частинки займатимуть об'єм сфери, радіус якої  $r=ct$ , де  $t$  – час, відлічуваний з моменту вильоту частинок. Для узагальнення картини можна прийняти, що згадані частинки спочатку зближувалися (від  $t=-\infty$  до  $t=0$ ). З такою кількістю рухомих частинок можна також пов'язати певну супутню систему координат  $K'$ , – так звану *систему Робертсона*. Простір цієї системи також буде нескінченним, гіперболічним. Частинки у цій супутній їм системі  $K'$  заповнюють весь нескінченний простір. При цьому в «жорсткій» системі  $K$  з евклідовим простором радіус сфери, зайнятої частинками, завжди залишається скінченним. У системі ж  $K'$ , супутній рухомих частинкам, радіус цієї сфери безконечний, а кривина простору від'ємна. **А. Л. Зельманов** відзначив: «Очевидно, що просторово-часова зона, яку займає більшість цих частинок за весь час їх існування, в обох випадках одна і та ж, і її чотирирівимірний об'єм нескінченний. Але просторова скінченність або нескінченність цієї зони в кожній системі відліку залежить від її руху. Фізична причина знайденої відносності просторової скінченності і нескінченності полягає в лоренцевім скороченні довжин».

Справді, довжина відрізка, який з'єднує дві частинки, що рухаються «услід» одна за одною, буде тим менша, чим ближче до поверхні сфери радіусом  $r = ct$  перебуває цей відрізок. Тому радіус і об'єм сфери рухомих частинок буде нескінченним у супутній їм системі відліку ( $K'$ ) і скінченним у жорсткій системі ( $K$ ). Розглядаючи аналогічне явище розльоту пробних частинок у замкненому світі де Сіттера, **А.Л.Зельманов** встановив, що «простори систем відліку з нескінченним власним об'ємом мають скінченний обмежений об'єм у просторі системи відліку, власний об'єм якої скінченний і замкнений». Причина та ж – лоренцеве скорочення. Такі висновки поширюються і на моделі, заповнені речовиною.

Внаслідок усіх своїх досліджень А.Л.Зельманов робить висновок: «...звичне зіставлення скінченності і нескінченності у просторі, скінченності і нескінченності в часі як можливостей, що взаємно виключають одна одну, і взагалі звична нам постановка питань про скінченність і нескінченність у просторі і в часі навряд чи можуть вважатися безумовно правильними у всіх випадках. Постановка цих питань, як і багатьох інших, що стосуються властивостей і поведінки Всесвіту як цілого... підлягає серйозному перегляду і уточненню».

Свого часу німецький філософ **Іммануїл Кант** (1724–1804) зформулював знамениті чотири антиномії – суперечності між двома твердженнями, які взаємно виключають одне одного, хоча однаково переконливо доводяться логічно. За Кантом, розум впадає в *антиномії*, як тільки він намагається пізнати світ у цілому. Перша з цих антиномій звучить так:

«*Теза*. Світ має початок у часі і обмежений у просторі. *Антитеза*. Світ не має початку в часі і меж у просторі; він нескінченний і в часі і в просторі»

Як відзначив **Дж. Уїтроу**, Кант «вважав, що є незаперечні аргументи проти обох альтернатив, і тому він поклав, що наша ідея часу незастосована до самого Всесвіту, але є лише частиною нашого психічного апарату для відображення і наочного уявлення світу».

Фактично ж Кант, протиставивши скінченне і нескінченне, не зміг зрозуміти їх єдність, а тим часом це питання ставиться сьогодні саме так:

«Розв'язок проблеми нескінченності полягає не в тому, що теза про існування нескінченності істинна, а теза про скінченний Всесвіт помилкова або навпаки. Цей розв'язок указує на те, що питання про нескінченність є відкритим.

Твердження про відкритий характер питання щодо безконечності Всесвіту у цьому випадку не є відображенням обмеженості сучасного рівня наших знань. Воно відображає саму суть проблеми, її реальний зміст... Встановлення незастосовності закону виключення третього до проблеми нескінченності не лише не еквівалентне кантівській антиномії, але, навпаки, саме цей результат указує на її безпідставність».

На це питання можна поглянути і під іншим кутом зору: «За часів Канта вважалося само собою зрозумілим, що в світі є один простір і один час з фіксованим набором геометричних характеристик і що для вирішення проблеми нескінченності достатньо зробити вибір між двома альтернативними можливостями: скінченна або нескінченна протяжність і тривалість. Але якщо світ не вичерпується однією просторово-часовою

структурою і містить безліч якісно різних просторово-часових форм, то поняття метричної скінченності і безконечності застосовні лише до окремих цих форм, а не до всього їх розмаїття, не до «світу як цілого».

Ще один аспект цієї проблеми – дискретність простору – часу. Як зауважив **А. Пуанкаре**, «неперервність була нав'язана нам зовнішнім світом. Вона, поза сумнівом, винайдена нами, але винайти її нас змусив зовнішній світ». Про це ж писав і **Д.Гільберт**: «Першим наївним враженням, яке створюють явища природи і матерія, є враження чогось неперервного, континуального. Якщо ми маємо перед собою шматок металу або певний об'єм рідини, то нам нав'язується уявлення про те, що вони необмежено подільні, що як завгодно малий шматок знову-таки має ті ж властивості».

Першу модель дискретного простору – часу, де просторові і часові координати приймали цілочисельні значення, запропонували **В.А.Амбарцумян** і **Д.Д.Іваненко** ще в 1930 р. В 1959-1960 рр. **Г.Коїп** (Угорщина) та **І.С.Шапіро** (СРСР) розглянули випадок, коли фізичний простір Всесвіту складається зі скінченного числа просторово-часових ланок (граток). Тим самим вдалося теоретично вивести ряд відомих емпіричних законів збереження, які діють у царині елементарних частинок і яких не вдавалося одержати з теорій, заснованих на моделях неперервного простору – часу.

Такі спроби, однак, стикаються з величезними труднощами. Доречно тому пригадати, що за деякими гіпотезами в мікросвіті простір і час можуть мати інше, ніж у макросвіті, число вимірів. Поза сумнівом, з кожним подальшим десятиріччям зв'язок мікро- і мегасвіту, фізики елементарних частинок і космології виявлятиметься все тісніше і в найнесподіваніших ракурсах...

Теорія відносності – найважливіший інструмент сучасної астрономії. Вона стала фундаментом релятивістської астрономії – тієї галузі науки, яка повинна дати нам відповіді на найпотемніші питання про закономірності будови і розвитку Всесвіту в масштабах, вимірюваних тисячами мегапарсек і мільярдами років.

## **Про розмірність світу**

Увесь наш щоденний досвід «доводить», що навколишній простір тривимірний: будь-яке тіло має протяжність у довжину, ширину і висоту. За допомогою усього трьох чисел ми визначаємо положення того або іншого тіла в просторі.



Але чому простір має саме три виміри? Адже, здавалося б, у природі з тим же успіхом міг реалізуватися і будь-який інший варіант, скажімо, чотири- або п'ятимірний простір. Це питання здавна хвилювало філософів, зокрема Аристотеля, Канта і Гегеля. На доказ тривимірності простору за різного часу наводили «математичні», «психологічні» і «фізичні» аргументи. За допомогою математичних аргументів, втім, нічого не вдалося довести, оскільки саме з погляду математики тривимірний простір не має ніяких переваг перед іншими. Французький математик **Анрі Пуанкаре** абсолютно безпідставно допускав, ніби тривимірний варіант допомагає живим істотам краще пристосуватися в боротьбі за існування. Проте строгий аналіз приводить до висновку, що, описуючи наш тривимірний світ за допомогою багатовимірної геометрії, ми зіткнулися б з такими явищами, як порушення закону близькодії, виявили б існування зон, які у принципі недосяжні для причинного зв'язку, і т.п.

Отже, проблема тривимірності простору повинна знайти пояснення саме з «фізичної» точки зору. Інакше кажучи, тривимірність простору – об'єктивний фізичний факт, і його походження слід пов'язувати не із законами логіки або психології, а з певними глибинними законами фізичного світу.

Саме так і підійшов до цієї проблеми **Кант**. Він пов'язав тривимірність простору з тим, що сили притягання між тілами змінюються обернено пропорційно квадратам відстаней між ними. У своїй праці «Думки про справжню оцінку живих сил» (1746 р.) Кант, підкресливши, що «засади тривимірного простору ще невідомі», далі пише: «Тривимірність походить, очевидно, від того, тому, що субстанції в існуючому світі діють одна на одну так, що сила дії обернено пропорційнальна *квадрату відстані*..., з іншого закону впливала б і протяжність з іншими властивостями і вимірами. Наука про всі ці можливі види простору, поза сумнівом, була б вищою геометрією, яку лише здатний побудувати обмежений розум». І далі: «Якщо можливо, щоб існували протяжності з іншими вимірами, то дуже імовірно, що Бог десь їх справді розмістив».

Подані міркування Канта можна переповісти так. Уявімо собі певне матеріальне тіло  $A$ , яке створює навколо себе центрально-симетричне силове поле. З боку цього тіла на іншу матеріальну точку  $B$ , яка міститься на відстані  $r$  від нього, діє сила, величина якої пропорційнальна кількості силових ліній, що припадають на одиницю площі сфери

радіуса  $r$ . А що їх кількість змінюється обернено пропорційно відстані  $r$ , то чим більшим буде радіус сфери, тим меншою буде сила, яка діє на точку  $B$ .

У тривимірному світі площа поверхні сфери прямо пропорційна квадрату її радіуса:  $S = 4\pi r^2$ , а сила гравітаційної взаємодії між тілами обернено пропорційна квадрату відстані  $r$   $\left( F \sim \frac{1}{r^2} \right)$ .

Загалом же в  $n$ -вимірному евклідовому просторі поверхня сфери пропорційна  $r^{n-1}$ , а відповідна сила  $F \sim \frac{1}{r^{n-1}}$ .

Тепер услід за **Паулем Еренфестом** (1880–1933) і **Дж. Уітроу** подивимося, як виглядав би світ, якби число його вимірів було більше або менше трьох. Це тим більше цікаво, що від числа вимірів залежить можливість існування планетних систем...

При  $n = 1$  (одновимірний світ) сила тяжіння від відстані не залежить. Тут матеріальна точка  $B$  (планета) може, подібно маятнику, здійснювати коливання «вправо» і «вліво» щодо центрального тіла, «проскакуючи» через нього. Відірвати точку  $B$  від притягаючого силового центра і відсунути її на нескінченність не вдасться ніякими зусиллями. Прикладена сила тільки збільшить амплітуду коливань планети. Те ж саме було б і при  $n = 2$  (двовимірний світ).

У «нашому» тривимірному світі, як відомо, рух тіла  $B$  відносно силового центра  $A$  може бути подвійним: воно може рухатися по еліптичній орбіті, тобто перебувати у «зв'язаному» стані (тут повна енергія системи – сума її кінетичної і потенційної енергії –  $E < 0$ ), або ж, «проскочивши» поблизу центра  $A$ , віддалятися від нього на нескінченність (якщо повна енергія  $E > 0$ ).

Якщо ж  $n \geq 4$  (світ чотирьох, п'яти і більше вимірів), то існування планетних систем (тобто періодичний рух матеріальної точки щодо силового центра) виявляється неможливим! Матеріальна точка  $B$  або падає на силовий центр  $A$  (наприклад, на Сонце), або ж віддаляється від нього на нескінченність.

Отже, тільки в тривимірному світі і можуть існувати стійкі планетні системи. У зв'язку з цим **О.М.** і **В.М.Мостепаненки** відзначають: «...Кант, звичайно, помилявся, коли вважав, що бог перед створенням нашого світу міг би вибрати будь-який закон залежності сили від від-

стані і відповідно довільну розмірність простору. Образно кажучи, кантівський бог повинен був би спочатку провести відповідні математичні розрахунки. Але чи дає нам знання подібних розрахунків шукане теоретичне обґрунтування тривимірності? Чи не несуть наші попередні міркування частково антропоморфний характер? Насправді, априорі абсолютно не ясно, чому світ повинен існувати саме в тому вигляді, в якому він дійсно існує, і чому в ньому обов'язково повинні бути стійкі планетні системи, включаючи нашу власну».

А ось приклад з царини квантової механіки. Йдеться про будову і властивості атома водню. Як показав аналіз, в одно- і двовимірному світі електрон був би «навіки прикований» до ядра. Ніякими зусиллями відірвати електрон, перевести його в «вільний стан» не вдалося б. У таких випадках не було б безперервного спектра... І навпаки, при  $n > 4$  (світ чотирьох і більше вимірів) атоми водню взагалі не могли б існувати, оскільки електрони неминуче падали б на ядра. Проблема тривимірності простору нашого світу тепер детально обговорюється не тільки філософами, але і фізиками.

На основі вже наявних експериментальних і спостережних (астрономічних) даних можна стверджувати, що в інтервалі відстаней від  $10^{-16}$  см до  $10^{28}$  см він тривимірний (число просторових вимірів  $N = 3$ ) і описується евклідовою геометрією (позначення:  $E^3$ , з урахуванням тимчасової, незалежної тут координати  $T$  говоримо: він  $3 + 1$ -мірний, його позначення –  $E^3 \cdot T$ ). Але вже ясно також, що багато фізичних властивостей навколишнього Всесвіту визначаються процесами, що відбувалися у минулому в просторових масштабах  $\leq 10^{-16}$  см і особливо при  $\leq 10^{-33}$  см. І тут, як виявилось, необхідні (і вже використовуються) уявлення про більше, ніж три ( $N > 3$ ) просторових вимірів.

Такий підхід здійснювано поступово і наче з двох боків. Так, вже у 1921 р. німецький фізик **Теодор Калуца** (1885–1954) побудував першу з «єдиних теорій» гравітації і електромагнетизму – п'ятивимірну теорію (в  $4+1$ -вимірному просторі). Цю роботу продовжив шведський фізик **Оскар Клейн** (1894–1977). Однак усі модифікації п'ятивимірної теорії зустрілися з серйозними труднощами. Зокрема, з неї не можна було отримати відомі значення мас реальних частинок. Як виявилось, це вдасться зробити у шестивимірній теорії, якщо тільки покласти в ній, що шостий вимір має часоподібний характер. Виявилось також, що шестивимірна теорія є 6-оптикою: всі матеріальні частинки в шестиви-

мірному різноманітті розповсюджуються як промені світла в нашому чотиривимірному світі. Дослідження у цьому напрямі продовжуються.

З іншого боку, вивчення розсіювання нуклонів на нуклонах показало, що властивості протонів ( $p$ ) і нейтронів ( $n$ ) відносно ядерної взаємодії тотожні, тому їх можна розглядати як два різні стани однієї і тієї ж частинки, один – заряджений ( $p$ ), інший – нейтральний ( $n$ ). Так протон і нейтрон були поєднані в ізотопічний дублет, в якому вони розрізняються проекцією  $I_3$  ізотопічного спіну  $I$  (виміряного в одиницях

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , де  $h$  – стала Планка) в деякому «внутрішньому» ізотопічному

просторі: для протона  $I_3 = +1/2$ , для нейтрона  $I_3 = -1/2$ . Аналогічно,  $p$ -мезони утворюють триплет: для  $p^+$ -мезона  $I_3 = +1$ , для  $p^0$ -мезона  $I_3 = 0$  і для  $p^-$ -мезона  $I_3 = -1$ . Відсилаючи читача за подробицями до книг із фізики елементарних частинок і гранично зпрощуючи, скажемо, що в цьому виявляється *внутрішня симетрія*: поворотом вектора  $I$  на  $180^\circ$  протон «переводиться» в нейтрон і навпаки. Тим самим ізотопічний простір можна розглядати як деякий виділений «додатковий» вимір. Інакше кажучи, події вже розглядаються в *розширеному просторі*, причому простір – час Мінковського ( $M^{3+1}$ ) залишається його базою, «над якою» існує шар –ізотопічний у загальному випадку  $N$ -вимірний простір  $S^{(N)}$ . Геометрію цього розширеного простору прийнято позначати символом  $M^{3+1} \times S^{(N)}$ . Чотиривимірне ж ріманове розмаїття загальної теорії відносності позначається  $R^{3+1}$ .

В останні роки розробляється теорія супергравітації з використанням *ідей суперсиметрії*, тобто симетрії частинок з різними спінами. Тут звичайному ферміону (в цю групу входять електрони, протони і ін. частинки, які мають спін  $\simeq 1/2$ ) відповідає в якості суперпартнера бозон (фотони,  $p$ -мезони,  $K$ -мезони та ін. частинки із спіном  $\simeq 0$  або  $\simeq 1$ ) і навпаки. Так, кожному лептону відповідає слептон, нейтрино – sneйтрино, партнером фотона є фотіно  $\simeq 1/2$  і т. д. Починаючи з 1984 р. на основі принципів суперсиметрії розробляється *теорія суперструн* – уявлення про частинки як протяжні об'єкти з характерним масштабом  $l_{pl} \gg 10^{-33}$  см). При цьому встановлено, що несуперечливу теорію, з якої випливали б усі спостережувані особливості будови мікро- і мегасвіту, можна побудувати тільки у припущенні, що в масштабах  $|\xi|_{pl}$  розмірність простору  $N = 10 + 1$ . Ми ж спостерігаємо простір з  $3+1$  вимірів тому, що при переході до більших, ніж  $l_{pl}$ , відстаней «надлишкові» виміри згортаються.

## 4. ДО ТЯЖІННЯ БЕЗ СИЛИ

### Принцип еквівалентності

«...Уявімо собі, що якийсь полярний дослідник розповів нам про загадкове море, котрого йому пощастило досягнути. Чудове видовище постало перед ним. Серед моря він побачив дві плаваючі крижані гори – більшу й меншу – на чималій віддалі одна від одної. З глибини великої гори пролунав голос, що наказав владним тоном «Наблизься на десять футів». І зразу ж менша гора, виконуючи наказ, наблизилася на десять футів до більшої. І знову велика командувала: «Ще на шість футів ближче!» І друга негайно виконала наказ. Так лунав наказ за наказом, і менша гора в неперервному русі старанно намагалася негайно й щонайточніше виконати кожен наказ...

Безперечно, ми віднесли б таку вістку в царину казок. Але не поспішаймо з глузуваннями! Уявлення, котре здається тут таким дивовижним, є тим самим, якому найвеличніший з природодослідників зобов'язаний славою свого імені.

Справді, у світовому просторі неперервно звучать такі накази, що йдуть від різних небесних тіл... Наша Земля мчала б по прямій лінії через світовий простір, якби її кожної миті не скеровував наказ, що звучить від Сонця... Звичайно, накази віддаються безмовно і так само безмовно вони виконуються. **І.Ньютон** назвав цю пару наказів та виконань іншим іменем. Він просто говорив про взаємне притягання, яке панує між тілами. Одначе суть від цього не змінюється, бо вказана взаємодія полягає в тому, що одне тіло віддає наказ, а друге підкоряється йому».

Так математик **К.Нейман** описав світ, де кожне окремо взяте тіло підлягає дії сили тяжіння...

Сила... Чималий шлях пройшло людство до сформулювання поняття сили як передовсім міри механічної взаємодії між тілами, котра проявляється у прискоренні руху взаємодіючих тіл. Виходячи з законів Кеплера, Ньютон зумів встановити математичний вираз, що давав змогу оцінити числове значення такої сили. Але в чому її природа? Що це за така властивість матерії, для якої не існує жодних перепон та, здається, неможливо придумати ніяких екранів? А, може, тут взагалі йдеться не про силу, а про щось інше, лише ми не зуміли глянути на питання з якоїсь нової точки зору?

У попередньому розділі записано декілька формул, за якими обраховується величина сили. І в той і в той вираз входить маса тіла, маса, яку фізик **Герберт Джексон** (США) порівняв з актором, котрий з'являється на сцені в різних масках, але ніколи – у своєму вигляді.

Зіставимо рівняння (1.2) і (1.3). У кожне з них входить маса  $m$ . Однак то не одна і та сама характеристика тіла! В (1.2), та й у рівнянні (1.1), маса постає перед нами як *міра інерції*. Вона характеризує опір, що його чинить тіло зміні свого руху. Зовсім про іншу масу мовиться у формулі (1.3). Тут маса – міра *важкості* тіла. Йдеться ж бо про взаємне притягання тіл відповідно до закону всесвітнього тяжіння (1.4). Тут говоримо про важку, або гравітаційну, масу, якою характеризується здатність тіла притягувати до себе інші тіла.

Отже, кожне тіло можна характеризувати певною *інертною* масою  $m_i$  і певною *важкоюю* масою  $m_g$ . Можна покласти, що ці параметри тіла пропорціональні один одному, тобто  $m_i = km_g$ . У тому зв'язку напрошується припущення (і його певним чином зробив ще Ньютон), що коефіцієнт пропорціональності  $k$  однаковий для всіх тіл. Але чи можна його якось перевірити?

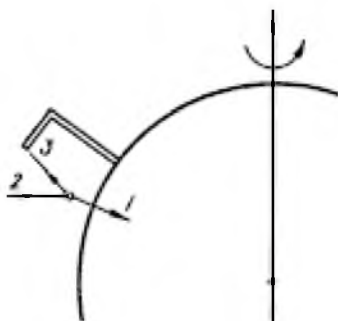


Рис. 4.1. Сили, що діють на маятник, підвішений на нитці завдовжки  $l$ .

Гляньмо на малюнок звичайного маятника (рис 4.1). На тіло діє три сили: сила тяжіння, спрямована до центра Землі, її величина визначається гравітаційною масою тіла (1); відцентрова сила направлена перпендикулярно до осі добового обертання Землі; вона визначається інертною масою тіла (2); сила реакції натягнутої нитки (3). Щоправда, навіть на екваторі відцентрова сила у 288 разів менша від сили тяжіння (3,5%). Проте завдяки їй прискорення сили тяжіння з переходом від екватора до полюса змінюється від 9,78 до 9,83 м/с<sup>2</sup>: відцентрова сила «полегшує» тіло, зменшуючи прискорення  $g$ .

Широта спостерігача й швидкість його руху навколо осі добового обертання Землі звичайно відомі. Це дає змогу знайти «ефективне» прискорення  $g$ , і тим самим — формулу, котра зв'язує між собою інертну і гравітаційну масу. Від величини ж прискорення  $g$ , залежить період  $T$  коливання маятника завдовжки  $l$ :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_*}} . \quad (4.1)$$

Отже, коли параметр  $k$  для різних тіл (скажімо, для дерева і золота) набуває різних значень, то при однаковій довжині маятника період його буде неоднаковий. Проте вже з дослідів, здійснених Ньютоном з маятниками-діжечками, випливало, що при заміні речовини в діжечці період коливання маятника залишався той самий. Так уже Ньютон встановив, що відношення  $k = m_1/m_2$  з точністю до 0,001 є однаковим.

Величезне значення в історії обґрунтування пропорціональності інертної і важкої маси мали досліди з крутильним маятником (1889 і 1908 рр.), здійснені угорським фізиком **Лорандом Етвешом** (1848 – 1919). Етвеш підтвердив рівність інертної і важкої маси з точністю  $5 \cdot 10^{-9}$ . Його досліди стали емпіричним підмурком загальної теорії відносності.

Ще більшої точності домоглися **В.Б.Брагінський** і **В.І.Панов** (СРСР). Вони сконструювали крутильний маятник з вісьмома тягарцями (чотири з платини і стільки ж з алюмінію, загальна маса 3,9 г), що попарно, «на коромислах» (платиновий навпроти алюмінієвого) підвішувалися на тонкій вольфрамовій нитці. На нитку спрямовувалися лазерні промені, які після відбивання від неї потрапляли на барабан з рухомою фотошлівкою. Маятник встановили в скляному вакуумному балоні. Головною «дійовою особою» тут є Сонце. Унаслідок добового обертання Землі маятник займає відносно нього різне положення. Так, якщо при сході Сонця усі чотири платинові тягарці були «зліва», а алюмінієві «справа», то при заході Сонця ситуація змінювалася. Отже, якби у згаданих матеріалів відношення  $k$  набувало різних значень, то протягом доби нитка ритмічно б закручувалася то в один, то в другий бік, чого не виявлено.

Але чим все-таки зумовлюється інерція тіла? У попередньому розділі вже згадувалося про «принцип Маха», за яким нібито вона спричиняється взаємним притяганням тіл, впливом, що його тіло зазнає з боку всіх навколишніх зір. **Мах** і сформулював завдання: виробити теорію, з якої «однаковим чином впливали б і прискорені рухи, і рухи за інерцією», що й вдалося здійснити А.Ейнштейну.

Згодом космолог **Денніс Шама** (Англія) підрахував, що нібито всі зорі нашої Галактики зумовлюють усього одну десятимільйонну частку сили інерції на Землі, а більшість її створюють інші галактики, при-

чому близько 80% – ті з них, яких ми навіть не бачимо у свої телескопи. Що більше, саме за рахунок отих далеких мас нібито виникають і відцентрові сили, котрі, зокрема, призвели до сплюснення нашої Галактики, надавши їй форму сочевиці. За відсутності ж далеких мас тіло рухалося б лише доти, доки на нього діяла певна сила (як тут знову не згадати погляди Аристотеля...).

І навпаки, раптовий рух навколишніх мас повинен спричиняти появу «прискорювальної сили», що діє на кожне тіло. Міркуючи масштабами лабораторного експерименту, можна уявити тіло всередині порожньої кулі. Якщо куля раптово починає рухатися з прискоренням, то на згадане тіло повинна діяти сила інерції, котра мала б його прискорювати у тому самому напрямі. Обертання ж кулі має призводити до появи всередині неї відцентрової сили. Такі ефекти завбачав Ейнштейн, виходячи з припущення, що принцип Маха правильний. Проте такі «тонкощі» сучасна техніка експерименту ще не в змозі «вловити». До того ж більшість фізиків тепер схильна вважати, що згадане пояснення Махом сутності інерції не відповідає дійсності.

Але з принципу Маха випливало, що важкість та інертність — одне і те саме, лише перша з них зумовлена дією близького тіла, тоді як друга – усіх далеких. Звідси логічно було допустити, що інертна маса тіла абсолютно рівна його гравітаційній масі, а далі зробити наступний крок: замінити поле тяжіння прискореним рухом системи відліку. У цьому й полягає суть *принципу еквівалентності*, сформульованого Ейнштейном ще 1907 г. Обґрунтувавши еквівалентність інерції й тяжіння в механіці, Ейнштейн прийняв її як загальний принцип, застосовний до всіх фізичних явищ: поле сил інерції проявляє на всі фізичні процеси таку саму дію, як і поле тяжіння подібної структури.

### У ліфті і поза ним

Як твердив ще Галілей, фізик, працюючи у своїй лабораторії, ніякими експериментами не може з'ясувати, перебуває його лабораторія у стані спокою чи рухається рівномірно й прямолінійно. У ХХ ст. прийшла пора поставити питання й так: а чи можна за допомогою якихось експериментів, здійснюваних всередині лабораторії, виявити її прискорений рух? Обговорюючи його, **Ейнштейн** розглядає події, які відбуваються у ліфті з погляду «пасажира» і «зовнішнього спостерігача». «Уявімо собі величезний ліфт на башті хмарочоса... Раптом лин-



ва, що підтримувала ліфт, обривається, і ліфт вільно падає до землі. Під час падіння спостерігачі в ліфті провадять досліди... Один зі спостерігачів витягає хустинку й годинник зі своєї кишені і випускає їх з рук. Що відбувається з цими предметами? Для зовнішнього спостерігача, який дивиться через вікно ліфта, і хустинка, і годинник падають у напрямі на землю з однаковим прискоренням... Але таке саме й прискорення ліфта, його стін, підлоги й стелі. Тому відстань між обома тілами й підлогою не зміниться. Для внутрішнього спостерігача обидва тіла залишаються там само, де були в момент, коли спостерігач випустив їх із рук. Внутрішній спостерігач... знаходить, що ніякі сили всередині ліфта не діють на обидва тіла і, таким чином, вони залишаються у спокої, так начебто перебували в інерціальній системі».

Щоправда, у своїй «Еволюції фізики» **А.Ейнштейн** та **Л.Інфельд** зауважили, що такий інерціальний характер системи обмежений у часі й просторі. У часі – бо, досягнувши земної поверхні, ліфт розіб'ється. У просторі – бо йдеться про ліфт малих розмірів: лише тоді прискорення усіх тіл у ньому за величиною (і напрямом!) з погляду зовнішнього спостерігача будуть однакові. Для цього ж останнього рух ліфта прискорений унаслідок дії земного тяжіння.

Звідси випливає висновок: «Поле тяжіння існує тільки для зовнішнього спостерігача, як і прискорений рух ліфта у полі тяжіння. Для внутрішнього ж спостерігача – спокій і відсутність поля тяжіння. Але «міст», тобто поле тяжіння, яке робить опис в обох системах координат можливим, ґрунтується на дуже важливій опорі: еквівалентності важкої та інертної маси».

Подані тут міркування доповнюються ще й іншим ідеалізованим експериментом, де розглядається рух ліфта в міжзоряному середовищі, далеко від гравітуючих мас (рис. 4.2): «Хтось зовні прив'язав до ліфта лину і «тягне його зі сталою силою...», так що «ліфт рухається зі сталим прискоренням у напрямі руху». Тоді зовнішній спостерігач скаже: «Ліфт рухається зі сталим прискоренням, бо підлягає дії сталої сили». Спостерігач всередині ліфта буде міркувати інакше: «Я не бачу ніяких підстав вважати, що мій ліфт перебуває в абсолютному русі... Мій годинник, хустинка і всі тіла падають тому, що ліфт у цілому міститься у полі тяжіння. Я зауважую рух цілком такого самого типу, як і людина на землі. Вона пояснює його дуже просто – дією поля тяжіння. Таке пояснення підходить і для мене».

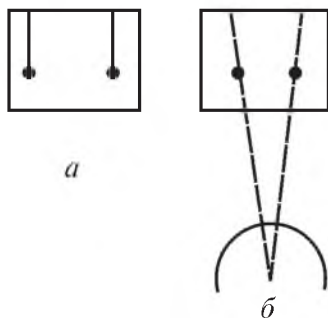


Рис 4.2. До принципу еквівалентності: а) якщо кабіна ліфта прискорюється у міжзоряному середовищі, то сили інерції натягують нитки маятників паралельно так, ніби кабіна перебуває в полі тяжіння, б) за розмірів кабіни, стіvmірних із розмірами Землі, нитки маятників не будуть паралельні: принцип еквівалентності прискорення і тяжіння має локальний характер

знаменитий принцип еквівалентності прискорення й тяжіння. Включити останнє в теорію — означає поширити теорію відносності на неінерціальні рухи. А далось це нелегко.

Відомо, зокрема, що справжнє гравітаційне поле, створюване будь-яким матеріальним тілом, неоднорідне: зі зростанням відстані до цього тіла сила тяжіння зменшується. Якщо ж таке поле «імітувати» прискореним рухом системи (ліфта), то «штучне тяжіння» буде у цій системі однаково незалежно від відстані до її початку координат. Крім того, «силові лінії» гравітаційного поля «розбігаються» радіально від центра гравітуючої маси. Тому й відстань між двома системами (наприклад двома ліфтами), які «вільно падають» у напрямі до цієї маси, зменшуватиметься, а швидкість зближення увесь час змінюватиметься. Бо ж при переході від точки до точки сила тяжіння (і відповідне їй прискорення) змінюється. Це означає, що принцип еквівалентності має тільки локальне значення, тобто він діє лише в безмежно малих масштабах.

Ще одним прикладом неінерціальних систем відліку, аналіз якого зіграв велику роль у становленні загальної теорії відносності, є диск, що стрімко обертається навколо своєї осі (рис 4.3.). Пов'яжемо з ним

Сказане тут Ейнштейн сформулював ще 1907 р. так: «Розглянемо дві системи відліку  $S_1$  і  $S_2$ . Хай  $S_2$  рухається з прискоренням у напрямі своєї осі  $x$  і хай її прискорення (стале в часі) рівне  $Y$ . Покладемо, що  $S_2$  перебуває у спокої, але міститься в однорідному гравітаційному полі, котре надає всім тілам прискорення  $-Y$  у напрямі осі  $x$ .

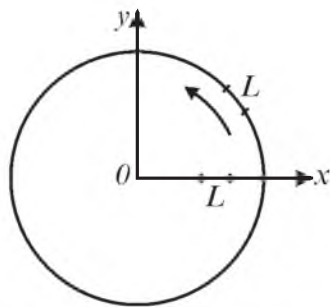
Як відомо, фізичні закони стосовно  $S_1$  не різняться від законів, що відносяться до  $S_2$ , бо в гравітаційному полі всі тіла прискорюються однаково. Тому за сучасного стану наших знань немає жодних підстав покладати, що системи відліку  $S_1$  і  $S_2$  у якому-небудь відношенні різняться одна від одної, і надалі ми будемо допускати повну рівноправність гравітаційного поля й відповідного прискорення системи відліку».

Так Ейнштейн уперше запровадив свій

систему відліку  $K'$ . Позначимо через  $K$  систему спостерігача, який перебуває поза диском. Ейнштейн пише так: «Спостерігач, який сидить, не в самому центрі диска  $K'$ , зазнає дії сили, спрямованої радіально від центра; спостерігач, котрий перебуває у спокої відносно тіла відліку  $K$ , буде вважати цю силу дією інерції (відцентровою силою). Нехай, одначе, спостерігач, який міститься на диску, розглядає диск як «нерухоме» тіло відліку... Силу, яка діє на нього..., він вважає дією гравітаційного поля. Щоправда, просторовий розподіл такого поля тяжіння не може бути погоджений із законом всесвітнього тяжіння (поле стає рівним нулеві в центрі диска і зростає до периферії пропорціонально відстані до центра). Але спостерігач ... слушно сподівається, що можна встановити такий загальний закон тяжіння, який правильно пояснить не лише рух сузір'їв, а й спостережуване ним силове поле».

Для здійснення експериментів спостерігач на диску  $K'$  «повинен розмістити два однакові годинники: один — у центрі диска, другий — на його периферії так, що і той і той нерухомі відносно диска. Спочатку ми запитаємо, чи однаково будуть йти ті два годинники з точки зору галілеєвого тіла відліку  $K$ , яке не обертається. Відносно того тіла годинник у центрі не рухається, тоді як годинник, розміщений на периферії, рухається внаслідок обертання відносно  $K$ . Тому... годинник на периферії, з точки зору тіла відліку  $K$ , йтиме повільніше, ніж годинник у центрі диска. Те саме, очевидно, мала б констатувати людина на диску, коли ми уявимо, що вона сидить майже в центрі диска, поблизу відповідного годинника. Отже, на такому диску і взагалі в усякому гравітаційному полі годинник йтиме швидше або повільніше залежно від того, де він розміщений (перебуває нерухомим). Таким чином, розумне визначення часу за допомогою годинника, нерухомого відносно тіла відліку, неможливе...

Але в цьому випадку й визначення просторових координат від самого початку натрапляє на непереборні труднощі. Коли спостерігач, рухаючись разом із диском, прикладе свій одиничний масштаб (лінійку, довжина якої дуже мала порівняно з радіусом диска) дотично до



*Рис. 4.3. З погляду зовнішнього Спостерігача довжина лінійки  $L$ , поставленої уздовж обводу диска, який швидко обертається навколо осі, буде менша, ніж у випадку, коли вона встановлена радіально*

зовнішнього краю диска, то цей масштаб з погляду галілеєвої системи координат буде коротший від одиниці довжини, бо... тіло, що рухається, зазнає скорочення у напрямі руху. Коли ж масштаб прикласти в напрямі радіуса диска, то він, з точки зору  $K$ , не скорочується. Отже, якщо спостерігач виміряє своїм масштабом спочатку довжину кола диска, а потім його діаметр і поділить перший результат на другий, то отримає для відношення не загальновідоме число  $p = 3,14\dots$ , а більше число (у всіх таких міркуваннях за тіло відліку слід приймати галілеєву систему  $K$ , оскільки висновки спеціальної теорії відносності справедливі лише відносно  $K$ , відносно ж  $K'$  існує гравітаційне поле); тим часом коли сам диск перебуває у спокої відносно  $K$ , ми повинні при тій самій операції отримати в точності число  $p$ . У такий спосіб доведено, що положення геометрії Евкліда не можуть точно виконуватися на диску, котрий обертається, і, таким чином, взагалі в гравітаційному полі... При цьому поняття прямої також втрачає свій смисл».

Справді, спостерігач у нерухомій системі  $K$  міг під тим самим диском намалювати такий же круг. Вимірявши довжину обводу  $l$  і діаметра  $d$ , він встановить, що  $l/d = p$ , а також зауважить, як такі самі виміри провадить і спостерігач у системі  $K'$ . Проте, за рахунок лоренцевого скорочення одиниці масштабу довжина обводу диска (з точки зору  $K$ ) становитиме

$$l = l' / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (4.2)$$

де  $v$  – швидкість краю диска, тоді як  $d' = d$ . Отже,  $l'/d' > p$ ! Крім того, чим більша лінійна швидкість обертання, тим, відповідно до формули (2.11), повільніше йде годинник. Ось чому на диску неоднаковим у різних точках буде й темп течії часу.

З усього цього впливало декілька важливих висновків.

1. При розгляді подій в інерціальних системах відстані між подіями і проміжки часу між ними самі по собі «звелися до ролі тіней». Незмінною величиною (інваріантом) тут став інтервал, певне послідовання просторово-часових характеристик. Положення певного тіла у тій або тій системі відліку задається світовою точкою – сукупністю чотирьох координат. Це повинно бути «вихідним пунктом» і при розгляді неінерціальних систем.

2. Спеціальна теорія відносності використовує уявлення про евклідовий тривимірний простір. При переході до неінерціальних систем

треба не задавати властивості простору наперед, а, як побачимо далі, встановлювати їх (точніше – властивості чотирирівмірного простору – часу) з певних даних про розподіл матеріальних тіл.

3. У спеціальній теорії відносності користуємося поняттям прямокутної системи координат. Проте вже експеримент із диском приводить до висновку, що для неінерціальних систем геометрію Евкліда застосовувати не можна. Отже, рівняння загальної теорії відносності слід записувати у довільній чотирирівмірній системі координат.

Але хід процесів у тій або тій матеріальній системі аж ніяк не залежить від вибору системи координат. Звідси випливає важливий висновок: «Загальні закони природи мають бути описані рівняннями, справедливими в усіх системах координат». У цьому й полягає так званий *принцип загальної коваріантності*. Рівняння (які відображають загальні закони природи) зветься коваріантними, коли вони не змінюють своєї форми з переходом від одної системи координат до іншої (зокрема, якщо остання рухається відносно першої з прискоренням).

Описуючи зусилля Ейнштейна у створенні загальної теорії відносності, **Макс Борн** писав: «Може здатися, що земля тікає з-під ніг. Все хитається, пряме виявляється викривленим, криве випрямляється. Проте труднощі цього заходу не збентежили Ейнштейна. Математики на той час уже здійснили важливу попередню роботу...».

### Фундаментальні рівняння Ейнштейна

Теорію, що лежить в основі сучасної картини світу, розробив **А.Ейнштейн** протягом 1905 – 1915 рр. У ній, як писав згодом (1936 р.) її творець, «вся механіка тяжіння зведена до розв'язку одної системи коваріантних рівнянь у частинних похідних. Ця теорія унікає всіх внутрішніх суперечностей, якими докоряли класичній механіці. Вона достатня, наскільки ми знаємо, для виразу 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)».

Подивимось тепер, як було зформульовано згадану систему рівнянь. Передовсім принцип пропорціональності інертної та важкої маси логічно приводить до твердження, що 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'єд-

нує фізику з геометрією. Свого часу Ньютон твердив, що вільний рух відбувається по прямій лінії. В теорії відносності місце останньої зайняла геодезична лінія у чотиривимірному просторі-часі.

Розглянемо такий приклад. Уявімо собі горизонтально натягнену гумову плівку (мембрану), на якій нанесено декартову сітку координат (рис. 4.4). Легка кулька, маючи початкову горизонтальну швидкість  $v$ , рухатиметься тут рівномірно й прямолінійно (якщо знехтувати тертям).

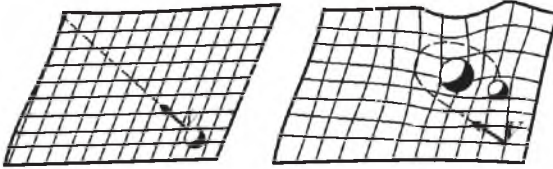


Рис. 4.4. Завдяки викривленню двовимірного простору гумової мембрани кулька, що рухається зі швидкістю  $v$ , «притягається» до важкої маси, яка зтричинила цей прогин

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, скочуватиметься («притягатиметься») до важкого тіла. Викривлення

тривимірного, а тим більше чотиривимірного 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, котрими 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

$$T_{ik} = (\varepsilon + p) \frac{dx^m dx^n}{ds ds} g_{mi} g_{nk} - p g_{ik}. \quad (4.3)$$

Тут  $\varepsilon = \rho c^2$  – 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 Ейнштейна, 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. Проте детальніший аналіз привів Ейнштейна до висновку, що сам тензор  $R_{\kappa\mu}$  в основне рівняння теорії входить не може, оскільки він має 20 незалежних компонент, тоді як незалежних компонент фундаментального метричного тензора  $g_{ik}$ , є всього 10. Виявилось, що властивості чотиривимірному простору – часу можна описати тензором 2-го рангу  $G_{ik}$ , який є комбінацією тензора Річчі  $R_{ik}$  з інваріантом кривини  $R$ :

$$G_{ik} = R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik}. \quad (4.4)$$

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

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} = \kappa T_{ik}, \quad (4.5)$$

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

Тензор  $G_{ik}$ , котрий становить ліву частину рівняння Ейнштейна, і є отим «крилом будинку», зробленого з «добірного мармуру». Своєю чергою, тензор  $T_{ik}$  стоїть у правій частині рівнянь Ейнштейна як крило «з кенського дерева», бо ж опис фізичних властивостей матерії формулою (4.3), за словами самого Ейнштейна, «лише дуже недосконало замінює таке представлення, котре відповідало б усім відомим властивостям матерії».

Запис тензора  $R_{ik}$  у явному вигляді зводить рівняння Ейнштейна 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 (4.3), а потім підбирають функції  $g_{ik}$  так, щоб задовольнити рівняння (4.5). Найчастіше таку задачу розв'язують, або дуже спрощуючи форму  $T_{ik}$ , та  $g_{ik}$ , або методом послідовних наближень.

Зразу ж після завершення загальної теорії відносності, 1916 р., німецький астроном і фізик **Карл Шварцшільд** (1873 – 1916) використав рівняння Ейнштейна (4.5) для дослідження властивостей простору — часу поблизу маси  $M$ . Задача зводилася до інтегрування рівнянь (4.5) 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 так званого *зовнішнього розв'язку Шварцшільда* було здійснено аналіз «задачі Кеплера», тобто досліджено рух матеріальної точки  $m$  поблизу центральної маси  $M$  (скажімо, планети навколо Сонця) та закономірностей поширення світлових променів поблизу й безпосередньо від маси  $M$ . Було підтверджено встановлене дещо раніше Ейнштейном існування *трьох ефектів* загальної теорії відносності: руху перигеліїв планет, відхилення світлових променів при проходженні їх поблизу гравітуючих мас та червоного зміщення ліній у спектрах небесних тіл. Про ці ефекти, щоправда без математичних викладок, йтиметься в наступному підрозділі. Зацікавленого такими питаннями читача відсилаємо до спеціальної літератури. Декілька слів про зовнішній розв'язок Шварцшільда буде сказано ще при обговоренні проблеми *чорних дір*, можливість існування яких саме й впливає з того розв'язку.

Загальна теорія відносності завдяки своїй складності й глибині продовжує розвиватися й тепер, її основні принципи постійно обговорюють, а методи узагальнюють. Постають нові варіанти теорії гравітації. Далі ми обмежимося питаннями про те, як ця теорія підтверджується астрономічними спостереженнями та застосовується для побудови космологічних моделей.

### **Експериментальна перевірка теорії**

Загальна теорія відносності – одна з найскладніших галузей сучасної фізики. Саме тому в науково-популярних книжках її математичні



основи найчастіше взагалі не розглядають, зокрема, як правило, не подається в них і рівняння Ейнштейна (4.5). Звичайно, рівняння має компактний (і навіть привабливий) вигляд. Але ж, річ ясна, у популярній книжці прямо-таки неможливо записати у розгорнутому вигляді, скажімо, вираз для тензора Річчі (бо має дуже громіздкий вигляд), та й саму суть тензора імпульсу – енергії (як і поняття тензора взагалі) доводиться залишати без детального обговорення, мовчазно відсилаючи допитливого читача до спеціальних підручників та монографій.

Не можна, щоправда, сказати, нібито класична теорія тяжіння Ньютона є елементарною, хоча формула (1.4), за якою знаходимо величину сили притягання двох тіл, і справді дуже проста. Адже як тільки мова заходить про рух одного тіла в полі тяжіння іншого, то задача зводиться до розв'язування системи диференціальних рівнянь. І все-таки теорія Ньютона набагато простіша...

І тут логічно постає питання: коли вже фізикам (а передовсім Ейнштейнові) довелося продиратися крізь хащі математичних труднощів, то чи виправдала себе така нелегка праця? Чи виявлено ефекти й явища, з якими була не в змозі впоратися класична механіка та пояснення котрим було дано лише в рамках загальної теорії відносності?

Отож, насамперед, теорія Ейнштейна стала тим підмурком, на якому будуються сучасні уявлення про найзагальніші властивості Всесвіту. І тут варта уваги та обставина, що на можливу нестационарність Всесвіту (його розширювання), виходячи з рівнянь цієї теорії, вказав російський геофізик **О.О.Фрідман** (1888 – 1925) ще 1922 р. Через сім років після того американський астроном **Едвін Габбл** (1889 – 1953) дійшов висновку, що червоне зміщення у спектрах галактик зумовлене розширенням усього навколишнього світу галактик. З теорії відносності логічно випливає й можливість існування «чорних дір». Про все це йтиметься далі.

Але чи немає поблизу нас, у масштабах нашої Сонячної системи і найближчих околицях Галактики таких ефектів, котрі беззаперечно б доводили правильність ідей загальної теорії відносності? Виявляється, що є, і на них вказав сам Ейнштейн. Це *рух перигелію* планети Меркурій, *відхилення променя світла гравітаційним полем* і *зміщення спектральних ліній у червоний бік спектра*.

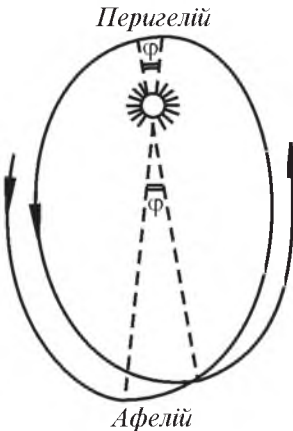
Проте які мізерні ті ефекти! Скільки зусиль докладають учені, щоб підвищити точність під час їх вимірювання! Що й казати, ця велика тео-

рія проявляє всю свою велич і міць лише у великих масштабах... Описуючи перший ефект, **Ейнштейн** зазначає, що «Сонце, або спільний центр тяжіння, міститься в одному з фокусів еліптичної орбіти, так що протягом планетного року відстань між Сонцем і планетою зростає від мінімуму до максимуму і потім знову зменшується до мінімуму. Якщо замість закону Ньютона ми приймемо інший... то знайдемо, що ... в цьому випадку кут, описуваний лінією, котра з'єднує Сонце й планету, за час такого періоду (від перигелію – найближчого положення відносно Сонця – до перигелію) відрізнявся б від кута  $360^\circ$ . Траєкторія не була б тоді замкнена...» Кут, описаний радіусом, який з'єднує планету з Сонцем, від одного перигелію до другого, повинен перевищувати кут, що відповідав повному обертові, на величину, яка визначається виразом

$$\phi = \frac{6\pi G M_\odot}{a(1-e^2)c^2} \text{ рад.} \quad (4.6)$$

Інакше кажучи, обертання великої осі орбіти планети відбувається у напрямі її руху навколо Сонця (рис 4.5).

Для встановлення такого 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  $\gg 88$  діб. За сто років планета здійснює навколо Сонця 415 обертів, а напрям її великої осі, відповідно до теорії Ейнштейна, повертається відносно зір на кут  $j \gg 43'',03$  (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  $532''$  (що в 12 разів перевищує релятивістський ефект!).



*Рис. 4.5. Усупереч класичній механіці велика вісь еліптичної орбіти повільно обертається у напрямі руху планети навіть тоді, коли на цю планету не діє ніяка збурювальна сила*

Не дивно, що знайдена зі спостережень величина кута  $j$  відома з певною похибкою. І все-таки цей додатковий ефект було виявлено ще в середині позаминулого століття, хоча тоді його намагалися пояснити (як зазначалося в попередньому розділі) наявністю поблизу Сонця ще одної планети.

Отже, цей релятивістський ефект якщо й помітний, то зовсім не головний... 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 із притяганням Місяця, сягає  $1153'',45$ . Проте астрономам вдалося встановити, що крім суто динамічної поправки в повному зміщенні перигелію нашої планети є ще «зайве» зміщення близько  $4'',6$  за сто років, яке й пояснюється у рамках теорії Ейнштейна. Тут, однак, точність зовсім невисока.

Можна б очікувати, що для перевірки теорії Ейнштейна за допомогою такого ефекту зручно використати штучний супутник Землі, запустивши його на орбіту з великим ексцентриситетом. Проте тут виникає низка ускладнень, бо дуже важко врахувати вплив земної атмосфери та сплюснутості Землі. Зокрема, через останню неможливо передбачити поворот перигею супутника, велика піввісь якого  $a = 20$  тис. км, ексцентриситет  $e = 0,5$  з точністю, більшою ніж  $3'$  за рік. А тимчасом релятивістський ефект становив би всього близько  $200''$  за сто років, тобто  $2''$  за рік... Тому цей метод перевірки теорії Ейнштейна, принаймні тепер, визнано малоперспективним.

Ще 1801 р. було зроблено висновок, що поблизу Сонця промінь далекої зорі повинен відхилитися на кут близько  $0'',85$ . Цей висновок випливає 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 самий результат випливає і зі спеціальної теорії відносності.

Проте насправді йдеться про вільний рух фотонів у викривленому просторі – часі. Виходячи з таких уявлень, Ейнштейн отримав, що світловий промінь, проходячи поблизу кулястого тіла з масою  $M$ , відхилиться від прямолінійного шляху на величину

$$\beta = \frac{4GM}{c^2 r} \quad (4.7)$$

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  $\beta$  удвічі перевищує ту, що випливає з теорії Ньютона.

Щоб виявити згаданий ефект, порівнюють фотографічні зображення певної ділянки неба, отримані під час сонячних затемнень і через декілька місяців. Йдеться про зміщення зображень зір на фотоплатівках, непомітні для неозброєного ока: соті частки міліметра, які виявляються лише за допомогою спеціальних координатно-вимірювальних машин.

Уперше такий ефект виявили під час спостережень повного сонячного затемнення 29 травня 1919 р. То був триумф ідей загальної теорії відносності. Відтоді сталося близько 50 затемнень, причому в десяти випадках астрономам вдалося здійснити заплановану програму спостережень. Загальний висновок такий: цим ефектом теорія Ейнштейна підтверджується з точністю до 15-20% (точність першого була 30%). Як зауважив **Денніс Шама**, «можна гадати, що якби астрономи не знали, яку величину вони «повинні» отримати, то опубліковані результати різнилися б набагато більше». І нічого дивного немає: ефект, про який йдеться, дуже-таки незначний, а фотографічний метод спостережень, та ще й крізь товщу повітряного океану, має багато вад...

Останніми роками виміряно відхилення радіопроменів, що, йдучи від квазарів (зокрема, 3С 273 і 3С 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 теорію Ейнштейна з точністю 0,1%!

До початку 2005 р. було відомо близько 50 позагалактичних гравітаційно-лінзових систем. Деякі з них описані у вже згаданій монографії **Я.С.Яцківа** та ін. (с. 137 і далі). Серед них – об'єкт Q2237+0305 «Хрест Ейнштейна», виявлений 1985 р.: чотири зображення (розхилом  $\sim 1''$  дуги) радіотихого квазара, червоне зміщення якого  $z = 1,695$ , лінзуючої галактики –  $z = 0,0394$ .

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

$$\Delta\lambda = \frac{GM}{c^2 R} \lambda. \quad (4.8)$$

Для Сонця при довжині хвилі  $\lambda=4000 \text{ \AA}$  це дає всього  $D\lambda=0,008 \text{ \AA}$  – величину, котру практично неможливо виділити на тлі інших ефектів.

У спектрах зір білих карликів, радіуси яких у 50–100 разів менші, ефект більш відчутний. І все-таки 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 у гравітаційному полі Землі використано метод ядерної спектроскопії (ефект Мьоссбауера). Так, наприклад, в одному з експериментів (Гарвардський університет) випромінювач встановлено у башті на висоті 22 м, приймач – біля основи башти. Під час руху гамма-квантів, випромінюваних ядрами заліза, вниз енергія квантів зростала на величину  $2,5 \cdot 10^{-15}$ . І цього досить, щоб ядра заліза в детекторі вже їх не поглинали. Зміщення частоти квантів компенсується рухом детектора. Такі виміри підтвердили формулу (4.7) з точністю до 1%. Проте сам ефект, по суті, – наслідок принципу еквівалентності та спеціальної теорії відносності, а тому його роль у підтвердженні теорії Ейнштейна не вважається вирішальною.

### Пошук гравітаційних хвиль

Правильність теорії Ейнштейна 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* – Ейнштейн зробив ще 1916 р. Та проблема виявилася дуже складною як у теоретичному, так і в експериментальному плані.

Розглядаючи злегка викривлений простір – час, Ейнштейн виявив, що 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.

Виявилось також, що 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 (рис 4.7). Проте між цими хвилями є й істотна відмінність. У плоскополяризованій електромагнітній хвилі протягом періоду  $T$  пробні заряди, розташовані по колу, зміщуються відносно нейтральних частинок, причому відстані між самими зарядами увесь

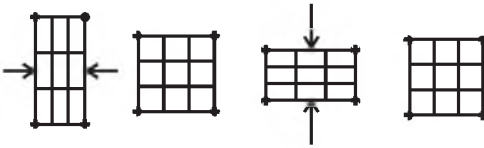


Рис. 4.7. Викривлення конфігурації системи мас під дією гравітаційної хвилі, що поширюється вертикально, упродовж періоду хвилі

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. І коли пробні заряди розташовані по колу, то під дією гравітаційної хвилі, яка падає на коло перпендикулярно до нього, воно періодично перетворюється на еліпс – розтягується й стискується відносно свого діаметра.

Отож найпростішим детектором гравітаційних хвиль могли б бути дві кулі, з'єднані пружиною. Якщо на такий прилад падає гравітаційна хвиля (перпендикулярно до осі, котра з'єднує центри куль), то відстань між кулями буде поперемінно збільшуватися й зменшуватися. Зауважмо й таке. Потрапляючи на п'єзокристал, гравітаційна хвиля створює у ньому пружні натяги. За рахунок деформації кристалічної ґратки тут виникає електрорушійна сила, яка може бути виміряна.

Шкалу частот гравітаційного випромінювання прийнято ділити на десять діапазонів від ультранизьких ( $n = 10^{-13} - 10^9$  Гц) до ультрависоких частот II ( $n = 10^{18}$  Гц). За аналогією до квантів електромагнітного випромінювання – фотонів тут прийнято говорити про *гравітони*. Ще 1947 р. український фізик **Д.Іваненко** висловив гіпотезу про можливість взаємних перетворень гравітонів і квантів відомих видів матерії. Ось два приклади таких перетворень, унаслідок яких випромінюються жорсткі гравітони (високочастотні гравітаційні хвилі). Відомо, що під час переходу атомного ядра зі збудженого в основний стан випромінюється гамма-квант. Є підстави покладати, що за деяких умов, типових для надр зір, збудження «гаситься» випромінюванням жорстких гравітонів. За обрахунками, в надрах Сонця збуджуються стани ядер ізотона заліза  $Fe^{57}$  з енергією збудження 14,4 кеВ. Унаслідок їх гасіння тут щосекунди утворюється близько 100 млрд. гравітонів, що відповідає потужності гравітаційного випромінювання Сонця близько  $10^4$  Вт (нагадаємо, що у формі електромагнітних хвиль Сонце випромінює  $4 \cdot 10^{26}$  Вт). При температурах, типових для надр наднових зір, збуджуються вищі ядерні рівні, зокрема рівень вуглецю  $C^{12}$  з енергією 16,1 МеВ. Гра-

вітаційне випромінювання наднової за рахунок цього ефекту оцінюють числом  $10^{18}$  Вт. Якби спалах наднової трапився на відстані 1000 світлових років, то від неї можна було б очікувати близько 10 гравітонів на  $1 \text{ км}^2$  за ... добу.

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  $n$ , удвічі більшій від частоти обертання системи  $\nu_0$ . При  $e = 0,5$  максимум випромінювання припадає на частоту  $n = 4 \nu_0$  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.

Одна з найближчих подвійних зір – *i* Волопаса. Відстань до неї становить 40 світлових років, період обертання системи  $T=0,27$  доби. Обрахунок показує, що у вигляді гравітаційних хвиль така система випромінює  $2 \cdot 10^{23}$  Вт. Проте очікуваний потік на Землі становить усього  $10^{-17}$  Вт/см<sup>2</sup>. До речі, за час близько 100 років унаслідок втрат енергії системи період її обертання зменшується на 0,0013 с, а велика піввісь – на 40 метрів. Це означає, що оптичні спостереження подвійних зір практично не можуть дати доказів того, що гравітаційні хвилі справді випромінюються ними.

Оцінки показують, що загальний потік гравітаційного випромінювання від усіх подвійних зір Галактики сягає величини  $10^{-14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Частота цього випромінювання – декілька десятків герц.

Величезна кількість високочастотного (1–10 кГц) гравітаційного випромінювання звільнюється за космічних катастроф, що можуть відбуватися в окремих закутках нашої та інших близьких галактик: за несиметричного гравітаційного колапсу (раптовий стиск зорі під дією власного гравітаційного поля, який закінчується утворенням чорної діри, про що йтиметься далі), під час зіткнення чорних дір, нейтронних зір і спалахів наднових. При таких процесах можна очікувати коротких сплесків гравітаційного випромінювання тривалістю 0,001–0,0001 с і повною енергією  $10^{45} - 10^{48}$  Дж. Зокрема, за підрахунками

**Я.Б.Зельдовича** та **І.Д.Новикова**, коли зоря масою  $m$ , рухаючись по спіралі, випадає на зколапсований об'єкт, маса якого  $M$ , то за один виток випромінюється енергія  $\Delta E \approx 0,1c^2 \frac{m^2}{M}$ .

У сфері радіусом 3 Мпк навколо нас налічують близько 300 галактик. Якщо в кожній з них колапс зорі трапляється один раз за 30–100 років, то на Землі щороку можна очікувати близько десяти сплесків гравітаційного випромінювання з потоком енергії до  $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Потужний сплеск гравітаційного випромінювання може бути наслідком несиметричного колапсу самого ядра галактики (існує гіпотеза, за якою така подія трапляється в кожній галактиці один раз на мільярд років, а в доступному для спостережень Всесвіті нараховується близько ста мільярдів галактик!). За іншою гіпотезою, такі сплески генеруються у центрі нашої Галактики, де існує скупчення (кластер) надзілльних зір, під час зближення останніх.

Перелік механізмів, якими можуть породжуватися сплески гравітаційного випромінювання, ми подаємо тут не випадково. Річ у тім, що з 1969 р. у пресі час від часу з'являлися повідомлення, нібито такі сплески вже вдалося зареєструвати **Джозефу Веберу** (США) за допомогою двох антен, розташованих на відстані 1000 км одна від одної. Кожен з детекторів Вебера – алюмінієвий циліндр завдовжки 1,5 м, діаметром 0,6 м і масою 1,5 т, який підвішується горизонтально на спеціальній 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 відповідає потоковій енергії  $10^{-1}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Протягом багатьох місяців детектори Вебера фіксували в середньому один імпульс за кожні п'ять діб, причому енергія імпульсу оцінювалася величиною  $1$  Вт/см<sup>2</sup>, а напрям на джерело імпульсів збігався з напрямом на центр Галактики. Звідси впливало, що центр Галактики



випромінює у вигляді гравітаційних хвиль близько  $10^{43}$  Вт – у мільйон разів більше, ніж у вигляді електромагнітного випромінювання. Це відповідає втратам маси близько  $1000 M_{\odot}$  за рік. Але якби було так, то вік ядра Галактики не міг би перевищувати усього декількох мільйонів років! Щоб «врятувати становище», було запропоновано гіпотезу синхротронного механізму гравітаційного випромінювання. Мовляв, у центрі нашої Галактики є чорна діра, на яку щоденно падає одна зоря. Падіння відбувається по спіральній траєкторії і внаслідок колового руху зорі виникає гравітаційне синхротронне випромінювання (у прискорювачах електронів – синхротронах – оптичне випромінювання також виникає внаслідок руху релятивістських електронів по колових орбітах). Таке випромінювання концентрується у невеликому куті в напрямі руху зорі. Тим самим оцінка втрати маси ядром Галактики зменшується у 1000–10 000 разів.

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

Почавши з 1991 р. у США розроблено ряд детекторів-інтерферометрів, здатних реєструвати амплітуди коливань порядку  $10^{-16}$  см (проект LIGO), італійсько-французький проект VIRGO, як також японський детектор із довжиною рукавів інтерферометра 300 м. У 2010 р. Європейське космічне агенство і NASA (США) готують запуск трьох космічних апаратів LISA (The Laser Interferometer Space Antena). Ці три апарати утворять рівносторонній трикутник зі стороною 5 млн. кілометрів, який, як, ціле, буде обертатися навколо Сонця. Завдяки взаємній реєстрації лазерного випромінювання відстані між апаратами будуть визначатися з похибкою усього 10 м.

Після 15-річних спостережень пульсара PSR 1913-16 можна 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 виявилося, 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 зближуються, рухаючись по спіралях. Інакше кажучи, пульсар проходить через периастр із випередженням (рис 4.8). Що цікаве: теорія передбачила тут зменшення орбі-

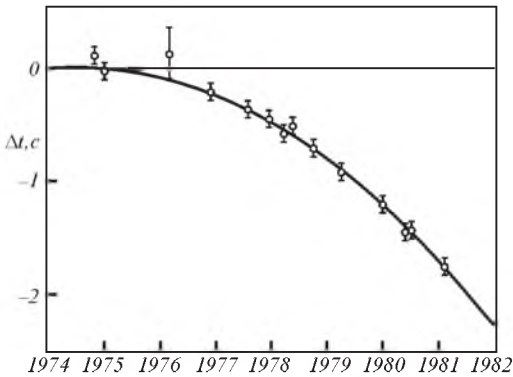


Рис. 4.8. Випередження в проходженні пульсара PSR 1913–16 через периастр порівняно з обчисленим, що відповідає сталому періоду обертання системи навколо центра мас

тального 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.

### Про альтернативні варіанти

Загальну теорію відносності Ейнштейна (ЗТВ) **Л.Д.Ландау** і **Є.М.Ліфшиц** назвали «найкрасивішою з усіх існуючих теорій». Для німецького фізика **Макса Борна** (1882 – 1970) вона – «витвір мистецтва».

Проте ледве чи не відразу після створення ЗТВ виникли сумніви в її повноті, з'явилися розробки інших, альтернативних теорій тяжіння. Ці зусилля продовжуються дотепер. Ось коротко основні проблеми ЗТВ і пропонувані деякі інші варіанти.

Нагадаємо передусім, що вже з кінця XIX ст. у фізиці прийнято розрізняти два види матерії – речовину і випромінювання (електромагнітне поле). Обоє вони в ЗТВ описуються тензорами імпульсу – енергії  $T_{ik}$ . І, скажемо, якщо тензор  $T_{ik}$  для електромагнітного поля в якійсь системі відліку відмінний від нуля ( $T_{ik} \neq 0$ ), те ніякими перетвореннями координат неможливо (!) домогтися його зникнення (тобто одержати рівність  $T_{ik} = 0$ ). Інакше кажучи, якщо електромагнітне поле є, те «воно є» і його не можна «знищити» вибором якоїсь «привілейованої» системи координат.

При розробці й осмисленні ЗТВ виникло питання про природу гравітаційного поля: чи є гравітація особливим (третім) видом матерії чи вона має чисто геометричну природу. На жаль, однозначної відповіді на це питання немає дотепер. Якщо гравітаційне поле є «самостійною

фізичною реальністю» і повинне розглядатися як особливий вид матерії, властивості якого виявляються в метриці простору – часу, то для нього належало знайти тензорну характеристику, що дозволила б визначити властивості поля, аналогічні властивостям інших видів матерії, зокрема, тензор енергії – імпульсу. Підсумком багаторічних зусиль дослідників було з'ясування того факту, що у ЗТВ кількість руху й енергії механічної системи визначають не лише тензором  $T_{jk}$ , що характеризує розподіл і рух тіл цієї системи, але і величинами  $t_{jk}$ , що відмінні від нуля також поза тілами і є деякою характеристикою створеного системою тіл поля гравітації. Ці поправки до тензора енергії – імпульсу повинні були б забезпечити збереження імпульсу й енергії системи гравітуючих мас. Однак виявилось, що сукупність величин  $t_{jk}$  не утворює тензора, тобто якщо  $t_{jk}$  визначені в системі координат  $X$ , то вони не будуть зв'язані з величинами  $t_{jk}$  системи  $X$  звичайними формулами перетворення тензора другого рангу, тобто вони є *псевдотензорами*. А оскільки фізичні величини у ЗТВ повинні мати тензорну природу, то величинам  $t_{jk}$  не можна приписувати безпосередній фізичний зміст.

Скажемо інакше: на відміну від електромагнітного поле тяжіння допускає своє знищення, як, наприклад, у вільно падаючому ліфті. Далі, на основі ЗТВ можна для тої чи іншої маси провести розрахунок повної енергії її гравітаційного поля у всьому просторі, однак у ЗТВ нема поняття густини гравітаційної енергії в конкретній точці простору і, що особливо важливо, немає законів збереження енергії – імпульсу. На це вперше звернув увагу вже в 1917 р. **Д.Гільберт**. Він сказав: «Я навіть міг би відзначити цю обставину як типову рису загальної теорії відносності».

З чим тут пов'язані труднощі в математичному плані, видно з наступного тексту «Всесвітнього тяжіння» **О.Ф.Богородського**: «Грунтуючись на принципі еквівалентності, можна припустити, що визначення правильного тензора енергії – імпульсу поля у ЗТВ узагалі неможливе, тому що в нескінченно малій околиці кожної точки часо-просторового континууму існує система відліку, у якій поля гравітації немає. Однак це припущення виявляється правильним лише в тому випадку, якщо шуканий тензор енергії – імпульсу містить тільки перші похідні від компонентів метричного тензора. Справді, введення системи координат, яка дозволяє усунути поле гравітації в околиці даної точки, з математичної точки зору є введенням дотичного простору Евкліда, що апроксимує простір Рімана в другому наближенні. Це значить, що в даній точці для обох просторів збігаються

компоненти метричного тензора і їхні перші похідні по координатах, тоді як похідні вищих порядків залишаються різними. Тому з компонентів метричного тензора і їх похідних різних порядків можна скласти такі вирази, які не можна привести до нуля одним лише перетворенням координат. Звідси випливає, що з математичної точки зору можливість утворити правильний тензор енергії – імпульсу поля аргіогі заперечувати не можна, хоча усі дотеперішні спроби, як уже сказано, до успіху не привели».

Огляд різних варіантів теорій гравітації читач може знайти, зокрема, у вже згадуваній монографії **О.Ф.Богородського**, а також у книзі **Ю.С.Владимирова, Н.В.Міцкевича і Я.Хорски** «Простір, час, гравітація» (М.: Наука, 1984). Серед цих варіантів найбільшою популярністю користується скалярно-тензорна теорія гравітації, що розвивалася з 1948 р. **П.Йорданом** і пізніше, з 1961 р., **К.Брансом** і **Р.Дікке**. У ній використана гіпотеза П.Дірака про зміну з часом гравітаційної сталої. Тут рівняння Ейнштейна (4.4) узагальнюються так, що замість гравітаційної сталої  $G$  уводиться деяка скалярна функція часо-просторових координат  $j$ , зв'язана з  $G$  безрозмірним параметром, що задається довільно. Теорія начебто підтвердила принцип Маха, оскільки маси частинок у ній визначаються величиною скалярного поля:  $m = m_0 j^{-1/2}$ , де  $m_0$  – стала величина. У ній, нарешті, крім десяти рівнянь Ейнштейна є одинадцять хвильових рівнянь для згаданого додаткового фундаментального скалярного поля (з масою спокою рівною нулю). Тому можна порушувати питання про спостереження проявів цього поля і робити конкретні передбачення.

Зокрема, з теорії Бранса-Дікке випливало, що зсув перигелію Меркурія менший, ніж у ЗТВ: 39" за сто років замість 43". Залишок 4" мав би виникати через сплюснутість Сонця. У 1974 р. Дікке вимірював цей ефект і одержав результат, що ніби-то узгоджувався з теоретичним передбаченням (різниця екваторіального і полярного діаметрів Сонця усього в 35 м). Однак інші дослідники висновків Дікке не підтвердили, і це питання залишається ще не з'ясованим до кінця.

Повертаючись до проблем ЗТВ, відзначимо, що у фізиці закони збереження мають надзвичайно глибокий зміст, оскільки вони відбивають часо-просторову симетрію нашого світу. Розуміння цього почалося з робіт **Лагранжа**, який, зформулювавши 1760 р. у загальному виді рівняння руху механічних систем, установив: 1) якщо до координат тіл системи додати довільне збільшення (тобто змістити всі точки системи на той самий відрізок), то за відсутності зовнішніх сил імпульс тіла залишається незмінним;

2) якщо зробити поворот системи як цілого в просторі, то її момент імпульсу залишається сталим, і 3) якщо зробити зсув події у часі, то повна енергія системи залишається незмінною. Першим твердженням констатується однорідність простору, другим – його ізотропність, третім – однорідність часу. Сказане було узагальнено в 1918 р. німецьким математиком **Еммою Нетер** (1882 – 1935) у двох теоремах.

Варто згадати й релятивістську теорію гравітації (РТГ), яку розробляв у 80-х роках **А.О.Логунов** і його співробітники. У її основу саме і покладені наступні вимоги: 1) у теорії повинні строго виконуватися закони збереження енергії-імпульсу і моменту кількості руху для речовини (сюди включається й електромагнітне поле) і гравітаційного поля разом узятих; це значить, що теорія будується в просторі Мінковського; 2) гравітаційне поле описується симетричним тензором і є реальним фізичним полем, що володіє густиною енергії й імпульсу. Отже, існує і квант гравітаційного поля – гравітон, який переносить гравітаційну взаємодію. У РТГ гравітаційне поле не можна навіть локально знищити вибором системи відліку, тому в ній немає ніякої еквівалентності між гравітаційним полем і силами інерції.

А.О.Логунов вводить у теорію принцип геометризації, відповідно до якого «рух речовини під дією гравітаційного поля в просторі Мінковського тотожний його руху в ефективному рімановому просторі». Система ж основних рівнянь РТГ отримана так: повна система рівнянь релятивістської теорії гравітації може бути формально отримана з рівняння Максвелла для електродинаміки, якщо замість векторного електромагнітного поля у лівій частині рівнянь поставити тензорне гравітаційне поле, а електромагнітний струм, що зберігається, замінити тензором енергії-імпульсу усієї матерії. Так отримано систему з 14 гравітаційних рівнянь. Десять з них за формою збігаються з рівняннями ЗТВ з тією різницею, однак, що всі польові змінні тут залежать від єдиних координат простору Мінковського. Інші чотири рівняння визначають особливу структуру гравітаційного поля.

З РТГ випливають два суттєвих висновки. По-перше, наш Всесвіт, що розширюється, є плоским, тобто його тривимірна геометрія евклідова. По-друге, у РТГ немає чорних дір, що утворюються внаслідок стиску речовини (гравітаційного колапсу) і її «самозамикання». Аналіз «міцності» ЗТВ відображено, зокрема, у вже згаданій монографії Я.С.Яцківа і ін. (2005 р.). У випадку слабких гравітаційних полів ця теорія приводить до тих же (згаданих вище) трьох спостережних ефектів, що й у ЗТВ.

## 5. ЧОРНІ 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, котру 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 таких екзотичних об'єктів впливає з загальної теорії відносності. Зі свого боку, теорія еволюції зір говорить, що чорні діри мали б бути, зокрема, логічним завершенням розвитку тих зір, маси яких у декілька разів перевищують масу Сонця. Припущення про наявність чорних дір збагачує наші уявлення про джерела енергії, які, можливо, існують у космічних глибинах. При цьому також постає низка питань стосовно найфундаментальніших властивостей простору-часу. Ось чому проблема чорних дір чи не найпопулярніша серед астрономів...

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  $r, \varphi, \psi$  з її центром. Очевидно, що в околі маси  $M$ , котру розглядатимемо як матеріальну точку, «реалізується» *статичний* центральносиметричний простір – час. Це означає, що компоненти  $g_{jk}$  можуть бути функціями лише відстані від центра маси  $r$  і не залежать від часу  $t$ . Далі, на чималій відстані від маси  $M$  отриманий розв'язок повинен давати той самий 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

$$ds^2 = -[dr^2 + r^2(d\varphi^2 + \sin^2\varphi d\psi^2)] + c^2 dt^2. \quad (5.1)$$

Зауважимо, що тут у квадратних дужках стоїть квадрат відстані між двома близькими точками тривимірного простору.

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

$$ds^2 = -[e^a dr^2 + r^2(d\varphi^2 + \sin^2\varphi dj^2)] + e^b c^2 dt^2 \quad (5.2)$$

де  $a$  і  $b$  – певні функції  $r$ . Тим самим компонентам фундаментального метричного тензора було надано значень  $g_{11} = -e^a$ ,  $g_{22} = -r^2$ ,  $g_{33} = -r^2 \sin^2\varphi$ ,  $g_{44} = e^b$  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  $a$  і  $b$ , так що

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

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

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1 - \frac{R_g}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta + \left(1 - \frac{R_g}{r}\right) dt^2. \quad (5.2')$$

Величину

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (5.3)$$

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 «зовні» (при  $r \rightarrow R_g$ ), зокрема,  $g_{44} \rightarrow 0$ . Все це й зумовлює існування *чорних дір* як справді екзотичних об'єктів. Зараз ми переконаємося, що свою назву вони набули не випадково.

Нехай з двох спостерігачів один перебуває недалеко від сфери Шварцшільда ( $r_1 \approx R_g$ ), другий – на чималій відстані від неї ( $r_2 \gg R_g$ ). Перший з них описуватиме події, користуючись метрикою у формі (5.2), другий – метрикою (5.1). Позначимо через  $dt$  інтервал часу між двома подіями, що трапилися на відстані  $r_1$  від центра сфери Шварцшільда. Нехай, для конкретності, то буде проміжок часу між двома сигналами, які спостерігач 1 передає спостерігачеві 2. Останній встановить, що сигнали розділені інтервалом часу  $dt$ . Як і за випадку з двома спостері-

гачами під час обговорення ефектів спеціальної теорії відносності, час  $t$  будемо називати *власним часом*, час  $t$  – *координатним*.

Оскільки геометричні координати обох спостерігачів (за припущенням) залишаються незмінними ( $dr, dj, dq = 0$ ), то з (5.1) та (5.2) маємо таке співвідношення:  $dt = \sqrt{g_{44}} dt$ , або ж

$$dt = \frac{dt}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}}. \quad (5.4)$$

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

Під інтервалом часу  $dt$  можна розуміти і період електромагнітної хвилі  $T=1/\nu$ . У цьому випадку з (5.4) випливає, що довжина хвилі  $\lambda$ , реєстрована спостерігачем «на нескінченності», буде більша довжини хвилі  $\lambda_0$ , яку випромінює атом на відстані  $r$  від центра маси  $M$ , так що

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}} \quad (5.5)$$

і при  $r \approx R_g$  маємо  $\lambda \gg \lambda_0$ . 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 (5.5) 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, коли якась частинка речовини або кванти світла, рухаючись до цього об'єкта, перети-



нають його сферу Шварцшільда, то наче провалюються у безодню, звідки вже немає вороття...

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

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

Для маси, рівної масі Сонця, гравітаційний радіус  $R_g \gg 3$  км і середня густина  $\rho \gg 2 \cdot 10^{16}$  г/см<sup>3</sup>, що істотно перевищує густину атомного ядра ( $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>). 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 у цілому немає ніяких підстав думати, що в природі такі об'єкти утворюватися не можуть.

Цікаво, що існування чорних дір можна було б завбачувати, й 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 відста-

ні  $r$  від її центра, описується потенціалом  $\phi = \frac{GM}{r}$ . В величиною ж

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

визначається робота, яку необхідно затратити, щоб перенести частинку маси  $m$  з відстані  $r$  на нескінченність. Величину  $W_p$  прийнято називати *потенціальною енергією* «пробної» частинки з масою  $m$ .

Отож ще 1798 р. **П.Лаплас** висловив таке міркування. Будь-яка пробна маса  $m$  залишить поверхню тіла масою  $M$  та радіусом  $R$ , якщо її кинути радіально вгору з такою швидкістю  $v$ , при якій її кінетична енер-

гія  $W_k = \frac{mv^2}{2}$  стане рівною потенціальній  $W_p$  або перевищить її, тоб-

то при  $\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{R}$ . Видно, що чим менше  $R$ , тим більшою мала б бути

швидкість пробної маси. При  $R = R_g$  швидкість  $v$  повинна досягти швидкості світла. З цього Лаплас і виснував, що коли в природі і є тіла,

радіуси яких  $R \notin R_g$ , то світло не може залишити їхніх поверхонь. Лаплас писав, що «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».

І ще одне зауваження. 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 випливає, що насправді величину сили взаємодії між центральним тілом  $M$  та пробною частинкою  $m$  треба визначати не за формулою (1.4), а зі співвідношення

$$F = \frac{GMm}{r^2 \sqrt{1 - R_g/r}}. \quad (5.6)$$

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

### Релятивістський гравітаційний колапс

«Історія існування будь-якої зорі – це справді титанічна боротьба між силою гравітації, яка намагається її необмежено стиснути, і силою газового тиску, котра прагне її «розпорошити», 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». Так **Й.С.Шкловський** (1916–1985) 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  $M \approx 10 M_{\odot}$ , друге – з масою  $M \gg 1 M_{\odot}$ ) 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 перебудови зорі триває неперервно.

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 вигорання 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  $3He^4 \rightarrow C^{12} + \alpha$ . 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  $C^{12} + He^4 \rightarrow O^{16} + \alpha$ ,  $O^{16} + He^4 \rightarrow Ne^{20} + \alpha$ ,  $O^{16} + O^{16} \rightarrow S^{32} + \alpha$  і т. д.) аж до заліза включно.

Важливо при цьому ось що. Доти, 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 це певним чином забезпечує рівновагу зорі. Проте зі зростанням температури дедалі більшу роль у підтримуванні рівноваги зорі (точніше, в порушенні цієї рівноваги) відіграють нейтрино ( $n$ ) і антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ).

У надрах Сонця температура не перевищує 14 млн. градусів. І, як показують обрахунки, близько 5% енергії, звільнюваної тут під час перетворення водню на гелій, виноситься в безмежність саме нейтрино! Ті 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  $e^- + \gamma \rightarrow e^- + n + \bar{\nu}$ ), далі – при вільних переходах електронів  $e^-$  у полі (тобто поблизу) атомних ядер  $Z: Z + e^- \rightarrow Z + e^- + n + \bar{\nu}$  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  $15,6 M_{\odot}$  «згоряє» 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 легні. 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  $10 M_{\odot}$ , 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.

Тепер усе залежить від величини маси зорі. При  $M < 3 M_{\odot}$  в її центрі утворюється ядро, котре складається в основному з нейтронів, їхній

тиск у даному випадку достатній для того, щоб припинити спадання зовнішніх шарів. Через те рівновага відновлюється й утворюється *нейтронна зоря* – об'єкт з поперечником 20-25 км. Оболонка ж зорі розлітається зі швидкістю 10-15 тис. км/с. Усе це в цілому створює ефект *спалаху наднової зорі*.

Існування нейтронних зір було передбачене теоретично ще 1932 р. Відкрито їх у формі *пульсарів* (об'єктів, що ритмічно посилають у простір потужні імпульси радіовипромінювання) тільки 1967 р.

Коли ж маса зорі більша  $3M_{\odot}$ , то тиск нейтронного газу не в змозі зупинити рух зовнішніх шарів до центра. Явище колапсу триває аж до спадання речовини за сферу Шварцшільда, причому для зовнішнього спостерігача воно не супроводжується спалахом у видимому світлі. Так утворюється *чорна діра*.

Цікаво, що 1939 р. А.Ейнштейн опублікував статтю, в якій доводив, нібито речовина не може сконденсуватися, втиснутися всередину сфери Шварцшільда. Проте у тому самому році **Роберт Опенгеймер** (1904 – 1967) разом зі своїми співробітниками дійшов протилежного висновку, встановивши, що йдеться про *колапс* – катастрофічне й необмежене спадання речовини до центра зорі.

Дотепер ми говорили лише 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 газо-пилової хмари більша і коли така хмара почала стискуватися як єдине ціле, то замість стійкої зорі тут зразу мусила б утворитися чорна діра. При тому час стиску хмари за сферу Шварцшільда оцінюємо за формулою

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

де  $\rho$  – початкова густина хмари. Зокрема, при  $\rho \gg 10^{-18}$  г/см<sup>3</sup> (а така густина є типовою для газо-пилових хмар у Галактиці) знаходимо  $t_{ep} \gg 10^{12}$  с  $\gg 30$  тис. років. У зв'язку з відкриттям квазарів в останні десять років багато уваги надано колапсові мас порядку  $10^9 M_{\odot}$ .

### З двох різних поглядів

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

ся низка ефектів, які виходять за межі звичних для нас уявлень. Подив, зокрема, викликає вже сам характер спадання верхніх шарів зорі під час її гравітаційного колапсу або, що фактично те саме, вільне падіння «пробної частинки» з нескінченності ( $r \gg R_g$ ) до сфери Шварцшільда ( $r = R_g$ ).

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

$$v_M \approx c \sqrt{\frac{R_g}{r}}, \quad (5.7)$$

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

$$\Delta\tau = \frac{2R_g}{3c} \left[ \sqrt{\left(\frac{r_0}{R_g}\right)^3} - 1 \right]. \quad (5.8)$$

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

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

$$v_C = c \sqrt{\frac{R_g}{r} \left(1 - \frac{R_g}{r}\right)}. \quad (5.9)$$

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  $t \rightarrow \infty$ ) мовляв, його відстань  $r$  від центра чорної діри на останньому етапі руху змінюється з часом  $t$  за законом

$$r = R_g + (r_0 - R_g) e^{-\frac{c(t-t_0)}{2R_g}}. \quad (5.10)$$

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

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{r_0 - r}{c} + \frac{R_g}{c} \ln \frac{r_0 - R_g}{r - R_g}, \quad (5.11)$$

при  $r \in R_g$  стає рівним нескінченності:  $Dt \in \mathbb{Y}$  при  $r \in R_g$ .

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  $t$  – часовою координатою. Прийнято говорити, що на межі сфери Шварцшільда  $r$  і  $t$  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*.

Отож, як ми вже бачили, процес падіння Мандрівника, з точки зору Спостерігача, розтягується до нескінченності ( $t \in \mathbb{Y}$ ) і припиняється (бо ж  $u \in 0$ ), 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  $t \in \mathbb{Y}$ ».

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 5.1). На діаграмі Крускала дві прямі, проведені навхрест під кутом  $45^\circ$  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 зконцентрована речовина, що створює поле тяжіння. Центри зон  $T_-$  і  $T_+$  тут у зв'язку зі спотворенням, зумовленим змін-

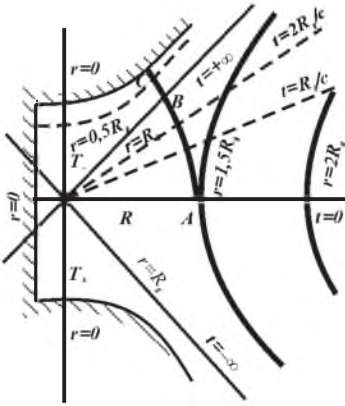


Рис. 5.1. Зображення руху (надіння) пробної частинки з відстані  $r = 1,5 R_g$  (точка  $A$ , момент часу  $t = 0$ ) до центра сфери Шварцшільда (точка  $C$ ) на діаграмі Крускала; точка  $B$  відповідає переходові пробної частинки через сферу Шварцшільда ( $r = R_g, t = +\infty$ )

ністю 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), розмішуються на кривих, що мають форму гіпербол. Точки, що відповідають одному й тому самому часові  $t$ , лежать на прямих, які виходять радіально від центра діаграми. Моментів  $t = 0$  відповідає горизонтальна пряма. Пряма ж, що проходить під кутом  $45^\circ$  до вертикалі праворуч угору, зображає собою радіус сфери Шварцшільда ( $r = R_g$ ) і відповідає моментові часу  $t = \infty$ .

На рис. 5.1. показано світову лінію Мандрівника, що розпочав рух від точки  $A$  зі стану спокою в момент  $t = 0$  з відстані  $r = 1,5R_g$  від центра сфери Шварцшільда. За інтервал власного часу  $\tau = 1,98 \frac{R_g}{c}$ . Мандрівник дося-

гне 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  $\lambda_0$ . Далекий Спостерігач виявить, що довжина хвилі сигналу змінюється з часом  $t$  за законом

$$\lambda = \lambda_0 e^{\frac{c}{2R_g}}. \quad (5.12)$$

Як бачимо, при  $t \rightarrow \infty$  буде  $\lambda \rightarrow 0$ : довжина хвилі зростає до нескінченності, тоді як частота сигналу  $\nu = c/\lambda$  зменшується до нуля.



А ось як, з погляду далекого Спостерігача, змінюється світність зорі  $L$  (повна кількість енергії, випромінювана зорею за одиницю часу) у процесі її стискування за сферу Шварцшільда. З теорії випливає, що

$$L = L_0 e^{-\frac{2c}{3\sqrt{3}} \frac{t-t_0}{R_g}} \quad (5.13)$$

де  $L_0$  – світність на момент часу  $t_0$ .

Як бачимо, тут  $L \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Тому іноді кажуть, що зоря «застигає». Насправді ж характерний інтервал часу, за який її світність

зменшується в  $e = 2,72$  рази, становить усього  $\Delta t = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{R_g}{c}$ , що зокре-

ма, при  $M = 10M_\odot$  дає усього  $2.5 \cdot 10^{-4}$  с. За час  $7\Delta t$  світність зорі зменшується у 1000 разів. Заслугує на увагу і характер поширення світлових променів з наближенням джерела світла до чорної діри (рис 5.2). Адже гравітуюча маса здатна відхилити промінь від прямолінійного шляху! Промені світла, випромінювані всередині деякого конуса (на малюнку він заштрихований), захоплюються нею. Зокрема, при  $r = 1,5R_g$  чорною дірою захоплюються навіть ті промені, що рухаються під кутом  $90^\circ$  до радіального напрямку! В момент перетину джерелом світла сфери Шварцшільда на нескінченність виходить лише той промінь, який рухався радіально вгору.

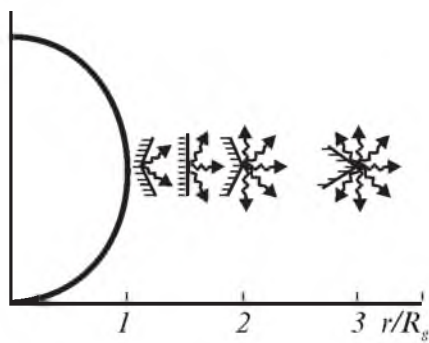


Рис. 5.2. Гравітаційне захоплення квантів світла чорною дірою: фотони, що випромінюються всередині заштрихованого конуса, захоплюються чорною дірою, а тому зовнішній Спостерігач побачити їх не може.

Після того як поверхневі шари зорі перетнуть сферу Шварцшільда і потраплять у Т-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 Т-зоні. З тієї причини сфера Шварцшільда має також назву *горизонту подій*. Сам же стиск зорі за сферу Шварцшільда часто звать *гравітаційним самозамиканням*.

Перетявши сферу Шварцшільда, Мандрівник уже ніяким чином не зможе нав'язати контактів з далеким Спостерігачем. Щоправда, на його думку, сигнали, які він висилає, поширюються нормально. Проте сама R-зона буде віддалятися від нього зі швидкістю світла, тому й світлові сигнали Мандрівника так і не досягнуть межі T- і R-зон...

### «Чорні діри не мають волосся»

Цей афоризм належить американському фізику Дж. Уїлерові. Він означає, що на відміну від зір чорні діри не мають ніяких індивідуальних характеристик.

Справді, кожна конкретна зоря різниться від своїх «сестер» кольором, особливостями спектра, часто певними коливаннями блиску (зміннами світності) тощо. У процесі ж гравітаційного колапсу всі індивідуальні риси зорі «стираються», Чорні діри однакові, як голови рекрутів, котрі щойно позбулися своїх буйних чубів...

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.

Аналіз спектрів зір приводить до висновку, що всі вони обертаються навколо своїх осей. Так, наприклад, Сонце здійснює повний оберт протягом періоду  $P = 25$  діб. Цей обертальний рух можна характеризувати моментом кількості руху  $K$ . У найпростішому випадку однорідної кулі, що має масу  $M$  і радіус  $R$ ,

$$K = 0,4MRv = 0,4MR^2\omega,$$

де  $v = \omega R$  – лінійна швидкість на екваторі,  $\omega = \frac{2\pi}{P}$  – кутова швидкість обертання кулі. Для Сонця знаходимо, що  $K_{\odot} = 5,9 \cdot 10^{41}$  Дж·с. З урахуванням зростання густини у напрямі до центра величина  $K$  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  $R_g$ :  $\omega_{\max} \approx \frac{c}{R_g}$ . При  $M=M_\odot$  маємо  $\omega_{\max} \gg 10^5$  рад/с.

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

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

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

$$R_{\text{гор}} = \frac{1}{2} R_g \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{K}{K_*} \right)^2} \right]. \quad (5.14)$$

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. 5.3.). Якщо  $K = 0$ , то ця поверхня збігається з горизонтом. Загалом же її відстань до центра чорної діри визначається рівнянням

$$R(\psi) = \frac{1}{2} R_g \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{K}{K_*} \right)^2 \cos^2 \psi} \right], \quad (5.15)$$

де  $\psi$  – кут між радіусом-вектором заданої точки на згаданій поверхні і віссю обертання.

Нехай  $K = K_*$ . Тоді при  $\psi = 0^\circ$  маємо

$$R(0^\circ) = \frac{1}{2} R_g. \text{ Якщо ж } \psi = 90^\circ, \text{ то } R(90^\circ) = R_g:$$

поверхня нескінченного червоного зміщення має форму еліпсоїда, мала вісь якого збігається з віссю обертання. Ті

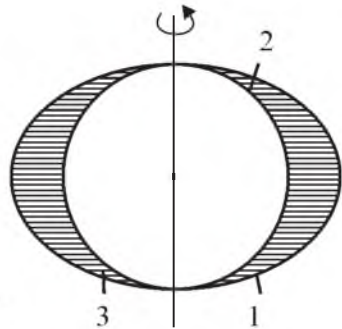


Рис. 5.3. Осьовий переріз чорної діри, яка обертається: 1 – поверхня нескінченного червоного зміщення, 2 – горизонт подій, 3 – ергосфера

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 подавати 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. Щоб більше, розділившись в ергосфері на декілька уламків, вона може вийти з неї з енергією, набагато більшою від тої, яку мала раніше!

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, боцїмто обертання може призвести до руйнування чорної діри. Нещодавно 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.

І тут постає таке питання. Навіть для Сонця (а воно, як і зорі пізніх спектральних класів, обертається навколо своєї осі дуже повільно) момент кількості руху більший від критичного значення  $K$ . Що ж до зір ранніх спектральних класів (а саме вони є кандидатами в чорні діри!), то їх моменти в тисячі й навіть у сотні тисяч разів перевищують  $K$ , оскільки тут

$$K \approx 10^{44} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\frac{7}{4}} \text{ Дзе с. Як же формується чорна діра у таких випадках?}$$

Дотепер важко сказати, чи зберігається момент кількості руху незмінним у процесі еволюції зорі. Зокрема, його величина може істотно зменшуватися під час витікання речовини з екватора зорі. Так, за обрахунками, зменшення маси зорі удвічі призводить до зменшення моменту кількості руху в 1000 разів! А що з атмосфер червоних гігантів речовина неперервно «витікає» у міжзоряний простір, сумніватися не доводиться. Крім того, коли зоря має помітне магнітне поле, то втрати її моменту можуть зумовлюватися гальмуванням її обертального руху внаслідок «намотування» магнітних силових ліній, які простягаються від зорі в навколишню плазму.

Коли ж зорі, маси яких набагато більші від маси Сонця, закінчують свою еволюцію, зберігаючи великий момент кількості руху, то далі може реалізуватися одна з таких можливостей: 1) первісна зоря розпадається спочатку на декілька нейтронних зір або чорних дір, 2) унаслідок колапсу утворюється тор («бублик»), який швидко обертається, і 3) наприкінці колапсу утворюється зовсім несиметричне тіло. У першому випадку (до нього зводиться також третій, бо несиметричне тіло неминуче розпадається на окремі фрагменти) за рахунок потужного випромінювання гравітаційних хвиль момент кількості руху досить швидко видалятиметься на нескінченність. Так, коли маси двох тіл  $M_1 = M_2 = M_{\odot}$ , а початкова відстань між ними  $r = 10^5 R_{\odot}$ , то й характерний час становить декілька мільйонів років. Як тільки загальний момент кількості руху системи зрівняється з величиною  $K_*$ , система з декількох тіл (нейтронних зір або чорних дір) зіллється в одну чорну діру. Щодо тора, то за рахунок певних неоднорідностей, котрі існували б у ньому, він також мав би розпадатися на окремі згустки, які згодом утворювали б чорну діру. Проте можуть утворюватися й кільцеподібні чорні діри. Але теоретичні дослідження таких об'єктів лише розпочинаються.

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.

Сама проблема «поглинання» чорною дірою матеріальних частинок, які наближаються до неї, набагато ширша. Тут, зокрема, цікавим є питання про характер орбіт таких частинок. Бо ж далеко не завжди

вони падають на чорну діру радіально – «зверху вниз». Отож у класичній теорії тяжіння частинка може рухатися по коловій орбіті на будь-якій довільній відстані  $r$  від центра маси  $M$ , коли тільки їй надано коло-

ву («першу космічну») швидкість  $v = \frac{GM}{r}$ . В теорії А.Ейнштейна це не

так. Як встановив ще 1949 р. радянський астрофізик **С.А.Каплан** (1921–1978), відстань найближчої стійкої орбіти від чорної діри, коли її обер-

танням нехтуємо, становить  $3R_g$ . Колова швидкість руху тут  $v = \frac{1}{2}c$ .

Ближче до чорної діри в інтервалі відстаней  $3/2 \leq r/R_g \leq 3$  містяться нестійкі колові орбіти. Колова швидкість при  $r = 1,5R_g$  сягає швидкості світла ( $v \gg c$ ). При  $r < 1,5R_g$  колових орбіт взагалі не існує.

Ситуація істотно змінюється, коли прийняти до уваги обертання чорної діри. У цьому випадку а) стійка орбіта частинки, яка рухається у напрямі цього обертання, може пролягати безпосередньо поблизу поверхні горизонту подій (в ергосфері), б) якщо частинка рухається у протилежному до обертання чорної діри напрямі, то її стійка орбіта пролягає на відстані, більшій від  $r > 3 R_g$ . Усе, що потрапляє ближче, захоплюється!

А ось як виглядає зближення пробної частинки і чорної діри. Нехай перша з них «на нескінченності» має відносну швидкість  $v_\infty$ , а напрям її руху такий, що вона, якби не було сили тяжіння, проходила б на відстані  $r_0$  від центра чорної діри (так звана прицільна відстань). У теорії Ньютона така частинка рухається по гіперболі, досягає найменшої відстані від маси  $M$  і знову відходить на нескінченність (якщо лише вона не зударилася з поверхнею тіла  $M$ ): у випадку двох тіл гравітаційне захоплення неможливе. В теорії ж Ейнштейна це станеться лише тоді, коли момент імпульсу частинки  $K = r_0 v_\infty m$  на нескінченності більший від значення  $K_0 = 2cmR_g$ . При  $K = K_0$  частинка виходить на колову орбіту навколо чорної діри, а при  $K < K_0$  підходить до сфери Шварцшільда по спіральній траєкторії, випромінюючи при цьому гравітаційні хвилі. Здійснивши  $(M/m)^{1/3}$  обертів, частинка «провалюється» за сферу Шварцшільда. З погляду далекого Спостерігача, рух частинки буде при цьому асимптотично сповільнюватися.

Теоретичний аналіз привів **В.Л.Гінзбурга** до висновку: навіть коли зоря до колапсу мала певне магнітне поле, то при її самозамиканні (при  $R \approx R_g$ ) те поле «відклеюється» від неї (ще добрячий «жмут волосся»). Однак електричне поле в чорній дірі може бути. Виникає воно за рахунок акреції на чорну діру заряджених частинок. Річ у тім, що важкі протони притягаються чорною дірою сильніше, ніж легкі електрони, які до того ж відштовхуються від чорної діри електромагнітним випромінюванням.

### Коли ж чорні діри світяться?

Перш ніж давати відповідь на таке питання, доцільно з'ясувати інше: скільки чорних дір може існувати в нашій Галактиці? Оскільки ж чорні діри є кінцевим продуктом еволюції звичайних зір, то передовсім треба обчислити, скільки зір, що мали масу більшу  $2-3 M_\odot$ , вже закінчили свій розвиток у формі «звичайних» зір.

Отож число зір з даною масою  $M$  в одиниці об'єму (скажімо, в кубі зі стороною у 100 світлових років) визначається функцією маси  $F(M)$ . Як впливає зі спостережень, її можна записати у вигляді

$$F(M) = \frac{C}{M^{2,35}},$$

де  $C$  – стала величина. Звідси знаходимо, що зір з масою  $10 M_\odot$  у 200 разів менше, а з масою  $0,1 M_\odot$  – у 200 разів більше, ніж зір з масою, рівною масі Сонця.

Далі, час, протягом якого водень у надрах зорі перетворюється на гелій (фактично ним і визначається тривалість «життя» зорі, якщо

$M > 10 M_\odot$  наближено можна оцінити за формулою  $t \approx 10^{10} \left( \frac{M_\odot}{M} \right)^2$  років.

Узявши те до уваги, **Я.Б.Зельдович** та **І.Д.Новиков** обрахували, що в нашій Галактиці щороку закінчує свою еволюцію близько 0,5 зорі, тобто п'ять зір за кожні десять років, маси яких більші від  $2 M_\odot$ . Тим часом спалахи наднових зір трапляються тут один раз на 100–300 років. Згадані автори висновують: «отже, спостереження говорять швидше проти припущення, що наприкінці еволюції вибух чи яка-небудь інша катастрофа, котра руйнує зорю й дає потужні спостережувальні ефекти, перешкоджає перетворенню масивної зорі на застиглу». Створюється вра-

ження, що перехід зорі з «нормального» стану у (куди ж ще?) чорну діру відбувається «беззвучно», без будь-яких світлових ефектів.

За обрахунками, число зір у нашій Галактиці сягає 100 млрд. Приймаючи її вік рівним 10 млрд. років, знаходимо, що число чорних дір у ній мало б сягати 2 млрд.: на кожні 50 «звичайних» зір повинна б припадати одна чорна діра. Отже, коли всі сучасні уявлення про еволюцію зір правильні, то відстань до найближчої чорної діри мала б вимірюватися якимись 15 – 20 світловими роками...

Та коли це й так, то, здавалося б, у нас немає жодних надій виявити такі об'єкти. Адже їх названо чорними дірами саме тому, що від них у навколишній простір не виходять ніякі світлові сигнали! А прецінь ми вивчаємо близькі й далекі зорі (і цілі галактики!), лише вловлюючи слабкі світлові потоки (ще – радіохвилі й рентгенівські промені), що їх ті об'єкти *випромінюють*. Як же виявити об'єкт діаметром 6 – 10 км на відстані декілька десятків (чи, може, й сотень) світлових років?

І все-таки, як показав теоретичний аналіз, чорна діра *може* світитися! Може за рахунок випадання на неї речовини або з міжзоряного середовища, або від зорі-сусіда, коли чорна діра є компонентом подвійної системи. Адже в процесі падіння на чорну діру речовина стискується, розігрівається й висвічує чимало своєї енергії.

У першому випадку йдеться про рух «самітньої» чорної діри зі швидкістю  $v \gg 10$  км/с через заповнене газом міжзоряне середовище, де число частинок в одиниці об'єму  $n \gg 1 \text{ см}^{-3}$ . З теорії випливає, що чорна діра захо-

плює увесь газ, який міститься в циліндрі з поперечником  $S = \frac{c}{v} R_g$ . Падаючи на чорну діру, газ нагрівається до температури близько десятків

мільярдів градусів. Нехай  $\frac{dM}{dt} = S^2 v n m_p$  – величина маси, що випадає на чорну діру за одиницю часу. Через те чорна діра висвічує у широкому діапазоні довжин хвиль від радіо- до рентгенівського діапазону енергію

$$L \approx 0,1 c^2 \frac{dM}{dt} \approx 10^{23} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^2 \text{ Вт.} \quad (5.16)$$

Оскільки в міжзоряному середовищі є магнітні поля, які захоплюються чорною дірою разом з газом, то згадане висвічування енергії



виникатиме здебільшого під час гальмування релятивістських електронів у цих магнітних полях (так зване синхротронне випромінювання). У спектрі такого об'єкта не було б будь-яких спектральних ліній, а його яскравість мала б зазнавати нерегулярних коливань з характерним часом  $0,000001 - 0,01$  с. Дотепер, проте, пошуки об'єктів, що мали б неперервний спектр і потужне радіовипромінювання з різкими коливаннями його інтенсивності, не були успішними.

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 в ту безодню (Й.С.Шкловський, 1967 р.).

### Кандидати у чорні діри

Упродовж останніх років переглянуто списки подвійних зір у пошуках об'єктів, де один з компонентів, маючи масу  $M > 2M_{\odot}$ , був би невидний. Загальний висновок такий: і нейтронні зорі, і чорні діри уникають «близького сусідства» інших, «нормальних» зір, тобто якщо вони і входять у подвійні системи, то дуже рідко.

Головну увагу астрономи зосередили на пошуках подвійних систем, в яких відбувається перетікання речовини з атмосфери нормальної зорі до чорної діри. І тут дуже важливо, що газ, який перетікає у напрямі до чорної діри, намагається водночас зберегти свій обертальний рух навколо центра мас обох об'єктів. Завдяки цьому у площині орбіти подвійної системи навколо чорної діри утворюється газовий диск, товщина якого у 10–30 разів менша його радіуса. Зударяючись між собою, частинки втрачають момент кількості руху і, намотуючись по спіралі, падають на чорну діру. Температура газу в різних частинах диска неоднакова — від десятків тисяч градусів зовні до декількох мільярдів у його внутрішніх зонах. Тому зовнішні шари диска висвічують видиме випромінювання, тоді як внутрішні – рентгенівське. Якраз останнє й визначає характер джерела: чорна діра – компонент подвійної системи за наявності потоку речовини близько  $(10^9 - 10^8) M_{\odot}$  за рік була б потужним джерелом рентгенівського випромінювання. Світність такого об'єкта мала б становити  $L \gg 10^{31}$  Вт, що в 25 тис. разів перевищує

світність Сонця. І тут теоретичний аналіз підтверджує виникнення швидких (тривалістю менше 0,01 с) коливань яскравості об'єкта, зумовлених неоднорідністю потоку речовини.

У 1972 р. детектори, встановлені на штучному супутнику Землі «Ухуру» (США), зареєстрували рентгенівське випромінювання якраз з такими коливаннями потоків енергії від близько десяти джерел. «Найпопулярнішим» серед них – джерело Лебідь X–1. Воно виявилось подвійною зорею, причому період обертання системи навколо центра має 5,6 доби. За оцінками видима зоря має масу  $20M_{\odot}$ , невидима (а саме вона і є джерелом рентгенівського випромінювання) близько  $10M_{\odot}$  (у всякому разі не менше  $6M_{\odot}$ ). Як показує аналіз, основна частина рентгенівського випромінювання генерується у внутрішній частині диска, радіус якого не перевищує 200 км (радіус чорної діри близько 30 км). У цілковитій відповідності з теоретичними передбаченнями інтенсивність згаданого випромінювання змінюється з типовим масштабом у тисячні частинки секунди. Відстань до об'єкта Лебідь X–1 становить близько 6 тис. світлових років.

Другим і найбільш надійним кандидатом у чорні діри є невидимий компонент тісної подвійної зорі A0620-00 в Одроззі. Її орбітальний період усього лише 0,32 доби, а маса видимої зорі – червоного карлика –  $0,54 M_{\odot}$ . Маса «кандидата» оцінюється в  $9M_{\odot}$ , причому, як звичайно, цю масу визначено в припущенні, що кут між площиною подвійної системи і площиною проєкції рівний  $45^{\circ}$  (середній ймовірній величині). Можна оцінити масу «кандидата», виходячи із даних про систему Сонце–Земля і 3-м законом Кеплера. Справді, шукана маса (вона набагато більша за масу видимої зорі)  $M \sim v^3 P$ , де  $v$  – максимальна швидкість орбітального руху червоного карлика, у напрямі променя зорі,  $v \gg 460$  км/с,  $P$  – період орбітального руху:  $P=0,32$  дня. Узявши відповідні величини для Землі,  $v=30$  км/с і  $P \sim 365$  діб, одержимо  $M \gg 3,2M_{\odot}$ . Але це буде мінімальною масою «кандидата», оскільки за кут орбітальної площини A0620-00 прийнято  $90^{\circ}$ . У випадку середнього імовірного кута  $45^{\circ}$  знайдемо  $M \gg 9M_{\odot}$ , як було зазначено вище.

Третім лідируючим кандидатом вважається тісна подвійна система LMCX-3, у Великій Магеллановій Хмарі. Тут видима зоря має масу  $6M_{\odot}$ , орбітальний період дорівнює 1,7 доби, а маса «кандидата» оцінюється так же, як у попередньому випадку, величиною  $9M_{\odot}$ .

Відзначимо, що навіть відносно цих виділених кандидатів є сумніви, адже найбільш уразливим місцем в оцінках маси «кандидата» є прийнята

маса видимої зорі, яку визначають на підставі спектроскопічних даних, і діаграми Герцшпрунга-Рессела і теорії внутрішньої будови зір. А цей середньостатистичний метод «зважування» зір, звичайно, у конкретних випадках може бути дуже неточним. Однак ясно, що для такої маломасивної зорі, як червоний карлик у подвійній системі Однорога, це несуттєво за аналогією із системою Сонце–Земля: адже масу Сонця ми визначаємо за законом Кеплера-Ньютона практично незалежно від маси Землі.

Можлива наявність чорної діри у рентгенівському джерелі SS433 – змінній зорі V 1343 Орла. У 1978 р. було встановлено, що цей об'єкт, відстань до якого оцінюється в 5,5 кпк, є змінним точковим радіоджерелом, що розташоване усередині протяжної зони радіовипромінювання W 50. Із досліджень спектра SS 433 встановлено, що мова йде про спектрально-подвійну зорю з періодом обертання 13,1 доби. Один з компонентів – масивна гаряча зоря-надгігант, її маса близько  $18M_{\odot}$ , другим компонентом і є, можливо, чорна діра з масою близько  $6M_{\odot}$ . Вона, очевидно, оточена щільним гарячим газовим диском. У напрямку, перпендикулярному площині обертання компонентів (і диска) від неї у формі двох тонких потоків зі швидкістю 80 000 км/с викидається речовина. При цьому вісь потоку і диск здійснюють прецесійний рух з періодом 164 доби. Вісь прецесії нахилена до променя зору під кутом близько  $80^{\circ}$ , кут прецесії дорівнює  $20^{\circ}$ . Механізм прискорення речовини в системі SS 433 залишається неясним.

Імовірно, чорна діра (одинокка чи подвійна) з масою близько  $10^6 M_{\odot}$ , оточена газовими конденсаціями, є і в динамічному центрі нашої Галактики. Нею, очевидно, є потужне радіоджерело Стрілець А західний (Sgr A West) розміром близько 10 пк. Радіовипромінювання цього об'єкта нетеплове, імовірно – сиикротронного походження.

За останні 15 років підтверджено наявність у ядрах декількох десятків галактик і в квазарах як одинарних, так і подвійних надмасивних чорних дір. Це – і «спостережно розділені», і «спостережно нерозділені» системи. Зокрема, «подвійні надмасивні чорні діри, які зливаються». Конкретні дані є у згаданій монографії Я.С.Яцківа та ін.

### **Термодинаміка чорних дір.**

Термодинаміка вивчає процеси перетворення теплової енергії в механічну роботу в тих чи інших макросистемах. І першим тут є закон збереження енергії, другим – закон необоротності макропроцесів в ізо-

льованих системах, що виявляється в рості ентропії. Як з'ясовано, багато важливих висновків та ідеї термодинаміки цілком застосовні до теорії чорних дір.

Очевидно, проникнення ідей термодинаміки у фізику чорних дір почалося з того, що в 1971 р. **Стівен Хокінг** (Англія) сформулював *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  $R_g \sim M$ ):

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

У свою чергу, з факту прикінцевого значення ентропії чорної діри випливало, що її можна описати повною температурою і, далі, – що чорна діра повинна випромінювати! Сказане стає зрозумілим, якщо взяти до уваги сучасні уявлення про фізичний вакуум як стан, в якому відсутні реальні частинки, але в якому відбувається безупинне виникнення, взаємодія і знищення *віртуальних* (від латинського *vires* – можливість) *частинок*.

Те, що *фізичний вакуум* – не «абсолютна порожнеча», у якій нічого немає, а «безкрайній океан» віртуальних елементарних частинок, стало ясным у 1928 р. після передбачення **П.Діраком** позитрона. Докази існування цих «неіснуючих» частинок загальновідомі. Досить згадати знамените лембівське зміщення енергетичних рівнів в атомі водню через взаємодію електрона з фізичним вакуумом. У цей ефект великий внесок дає віртуальне народження й анігіляція електрон-позитронних пар – поляризація вакууму. Зрозуміло, чому в околицях чорної діри також відбувається «народження» пар частинка-античастинка з вакууму. Адже відповідно до *принципу невизначеностей Гайзенберга*, енергію частинки  $E$  можна вимірити з точністю, що не перевищує  $h/Dt$ , де  $Dt$  – тривалість процесу виміру. І якщо  $Dt$  – невизначеність величини енергії, то завжди  $DE \sim h/Dt$ . Тому у вакуумі на дуже короткий проміжок часу  $Dt$  можуть з'являтися пари «частинка–античастинка» з масами, рівними  $m$ , так що  $2mc^2 \gg DE \gg h/Dt$ . За час  $Dt$  частинки анігілюють і зникнуть. За наявності ж зовнішнього поля, взаємодіючи з ним, віртуальні частинки встигають одержати енергію, достатню для того, щоб стати реальними частинками. Інакше кажучи, зовнішнє поле, витрачаючи

свою енергію на відділення частинки від античастинки, створює ефект квантового народження частинок з вакууму.

Уявлення про роль квантових процесів у фізиці чорних дір істотно змінилися після того, як **С.Хокінг** установив, що чорна діра «народжує» і випромінює частинки: при  $M > 10^{17} \text{Г}$  – тільки безмасові, тобто фотони, нейтрино і гравітони, при  $5 \cdot 10^{14} \text{Г} < M < 10^{17} \text{Г}$  – додатково також електрони і позитрони, а при  $M < 10^{14} \text{Г}$  і більш важкі частинки – так же, як чорне тіло, нагріте до температури

$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 GkM} \approx 10^{-7} \left( \frac{M_\odot}{M} \right) \text{К}. \quad (5.26)$$

Звідси випливає, що якби маса чорної діри не поповнювалася за рахунок захоплення міжзоряного газу і випромінювання інших зір, то вона випарувалася б за час  $10^{66} (M/M_\odot)^3$  років. Зі зменшенням маси чорної діри процес її випаровування прискорюється. Останні  $3 \cdot 10^8 \text{Г}$  чорна діра випарує за  $0,1 \text{с}$ . При цьому випромінюється енергія  $10^{23} \text{Дж}$ , 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, то тепер їх уже немає.

Тісне переплетення фізики чорних дір і термодинаміки привело до формулювання «чотирьох законів фізики чорних дір». *Перший* з них зв'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. Докладне їхнє обґрунтування є у книгах **В.П.Фролова** та **І.Д.Новикова**.

Ще декілька слів про найелементарнішу проблему фізики чорних дір – про рух матеріальної частинки усередину чорної діри.

Після перетину сфери Шварцшільда, потрапивши в чорну діру, усі матеріальні частинки рухаються строго в напрямку до її центра. Яка ж подальша доля цієї речовини? Чи стискається вона до нескінченно великої щільності чи, на певному етапі руху стиск змінюється розширенням? І якщо це так, то куди потрапить пробна частинка (скажімо – зонд із Мандрівником), знову вийшовши за сферу Шварцшільда? Не може

ж вона потрапити в R-область того ж Спостерігача, що усе ще бачить (!) як зонд Мандрівника наближається до сфери Шварцшільда...

Сьогодні це питання ще належно не вивчене. Деякі фізики дотримуються думки, що в процесі руху пробної маси усередині сфери Шварцшільда до точки  $r = 0$  швидкість світлового сигналу, яку позначимо

$c_T$ , зменшується за законом  $c_T = c \sqrt{\frac{r}{R_g}}$ , так що при  $r \rightarrow 0$   $c_T \rightarrow 0$ , тому

будь-яка взаємодія частинки із сусідніми тілами сповільнюється, а в точці  $r = 0$  вона взагалі стає неможливою. То ж як тільки певна частинка досягає точки  $r = 0$ , вона виключається зі всіх причинних зв'язків із навколишнім світом, а її «історія» на цьому обривається.

Сказане було зформульоване **Роджером Пенроузом** (Англія) у 1965 р. у виді *теорема*: у випадку, якщо тільки 1) виконуються рівняння Ейнштейна, 2) густина енергії додатна і 3) початкові дані цілком визначають розв'язки у майбутньому, то всередині чорної діри обов'язково є особливі точки, в яких світові лінії частинок обриваються.

Як відзначив **В.П.Фролов**, поява сингулярності у теорії свідчить про те, що ця теорія є неточною чи неповною, а тому «вже сам факт існування сингулярностей кидає виклик теоретикам». Але у випадку чорних дір сингулярність утвориться під горизонтом подій і, отже, для зовнішнього спостерігача вона ніяк себе не виявляє. Було поставлено питання: а чи не можуть утворюватися сингулярності поза горизонтом подій (такі сингулярності названо «голими»). Це дозволило б довідатися, чим закінчиться історія кожної частинки при її падінні в сингулярність. Виявляється, ні, цього бути не може; у фізично прийнятних ситуаціях голі сингулярності не утворюються. Цей *принцип космічної цензури* зформулював **Р.Пенроуз** у 1969 р. Відповідно до цього принципу раніше, ніж у процесі гравітаційного колапсу необмежено зростає кривина і розвивється сингулярність, гравітаційне поле досягає такої сили, що перестає випускати інформацію назовні, тобто виникає горизонт подій, що оточує сингулярність. Інакше кажучи, сингулярність завжди утвориться тільки усередині горизонту подій. Та це й добре: у протилежному випадку, як виявилось, було б неможливо передбачати розвиток подій у Всесвіті (як кажуть математики, неможливо зформулювати *задачу Коші* для визначення еволюції Всесвіту за його минулим станом).

## 6. РЕЛЯТИВІСТСЬКІ МОДЕЛІ ВСЕСВІТУ

### Моделі статичного світу

Упродовж декількох століть після Ньютона астрономи мали найневиразніше уявлення про будову Всесвіту у великих масштабах. Де-хто з них навіть на початку ХХ ст. був переконаний, що за межами нашої Галактики ніяких подібних зоряних систем взагалі не існує. І вже зовсім ніхто не сумнівався, що весь навколишній Всесвіт перебуває у статичному стані (тобто, що його розміри з часом не змінюються).

У полоні таких уявлень перебував і А.Ейнштейн, коли, завершивши свою теорію, узявся на її підставі творити загальну картину світу. Праця **Ейнштейна** «Космологічні міркування до загальної теорії відносності» вийшла 1917 р. і стала першою ластівкою в зусиллях учених 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.

Від Ейнштейна астрономи вивчають загальні закони будови й розвитку Всесвіту шляхом побудови *космологічних моделей*. Вихідним тут є уявлення, за яким властивості Всесвіту для кожного заданого моменту часу однакові у всіх точках і в усіх напрямках. Перше говорить про відсутність якогось «центра світу» (всі точки тут рівноправні), друге – про неможливість існування в ньому якихось привілейованих напрямків. У цьому й полягає суть так званого *космологічного принципу*. Він дає змогу розглядати такі характеристики моделі Всесвіту, як тиск  $p$  та густина  $\rho$ , лише як функції *світового – космічного або космологічного – часу*: скрізь  $\rho = \rho(t)$  і  $\rho = \rho(t)$ .

Тут доречно пригадати й найосновніші етапи того шляху, яким доводиться йти до побудови космологічних моделей. Спочатку прийма-

ється певна найзагальніша форма інтервалу  $ds^2$ , зокрема типу (5.2), якщо йдеться про статичну модель. Після того за даними компонентами фундаментального метричного тензора  $g_{jk}$  знаходять компоненти тензора Річчі  $R_{jk}$  та інваріант кривини  $R$ . Певні припущення щодо стану речовини дають змогу розписати у явному вигляді і тензор імпульсу – енергії. Тим самим тензорні рівняння Ейнштейна (4.5) зводяться до системи декількох звичайних диференціальних рівнянь. Розв'язавши їх, отримують певні вирази для компонентів тензора  $g_{jk}$  і, як наслідок, – конкретну форму для інтервалу  $ds^2$ , що відповідає заданим умовам розподілу речовини. Компонентами тензора  $g_{jk}$  і визначається геометрія простору – часу.

Задавши інтервал  $ds^2$  у формі (5.2), Ейнштейн 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  $\rho_0$ . Виявилось, однак, що при будь-яких  $p_0 > 0$  і  $\rho_0 > 0$  рівняння (4.5) несумісні з уявленням про статичний Всесвіт. І лише у випадку  $p_0 = 0$ ,  $\rho_0 = 0$  розв'язки зводилися до порожнього простору – часу Мінковського.

Тоді в Ейнштейна виникло питання: а чи не допускають рівняння (4.5) якогось узагальнення. З'ясувалося, що й справді так, бо ж ліву частину рівняння можна доповнити доданком  $Lg_{jk}$  (коваріантна похідна такого доданку також дорівнює нулеві!). Так у загальну теорію відносності увійшов параметр  $L$  – стала величина, що набула назви *космологічної сталої* (її розмірність  $cm^2$ ). Після цього рівняння Ейнштейна набули вигляду

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

Тепер неважко було знайти і їх розв'язки за тих самих умов однорідності й статичності Всесвіту. Всесвіт 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 до уваги, що речовина, яка заповнює Всесвіт, складається з вільних частинок (зір), котрі мають незначні відносні рухи, а отже, їхнім тиском можна знехтувати. Поклавши  $p_0=0$ , Ейнштейн отримав такі вирази для оцінки найголовніших параметрів своєї моделі – радіуса кривини  $R$ , космологічної сталої  $L$  та повної маси речовини у Всесвіті  $M$  як функції середньої густини речовини  $\rho$ :

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

У той час на підставі астрономічних спостережень було висунувано, що середня густина речовини у Всесвіті  $\rho = 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Це приводило до таких значень інших параметрів моделі:  $R \gg 10^{28}$  см,  $L \gg 10^{-56}$  см<sup>-2</sup>,  $M \gg 2 \cdot 10^{56}$  г  $\gg 10^{23} M_\odot$ . Отже, у сферичному світі Ейнштейна налічувалося б близько 1000 млрд. галактик. «Кругосвітню мандрівку» у такій моделі світловий промінь здійснив би за час близько 70 млрд. років.

На думку Ейнштейна, саме така модель мала б цілковито узгоджуватися з принципом Маха, за яким інерція тіла нібито зумовлюється дією усієї речовини Всесвіту.

Буквально через два місяці після публікації статті Ейнштейна в іншому науковому журналі з'явилася праця нідерландського астронома **Віллама де Сіттера** (1872 – 1934), в якій було показано, що рівняння (6.1) з  $L$ -членом і тою самою формою для інтервалу  $ds^2$  допускає ще один розв'язок, а саме  $p = 0$  і  $r = 0$ . 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:

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

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*.

Далі виявилось також, що довжина хвилі  $\lambda$ , яку реєструє Спостерігач у точці  $r = 0$ , відрізняється від довжини хвилі  $\lambda_0$ , 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  $r \ll R \ll \lambda_0$ .

І нарешті, коли 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** (1885 – 1955) виявив 1923 р., що з погляду спостерігача довжина хвилі, випроміненої згаданою пробною частинкою, зміщується у червоний бік спектра на величину  $D\lambda$ , так що

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

Тут  $r$ -відстань від спостерігача до джерела світла,  $k$  – деяка стала величина. То була одна з багатьох спроб зіставити виявлене саме тоді червоне зміщення у спектрах галактик з теоретичними космологічними моделями. Тут пригадаємо, що дослідження спектрів інших галактик (тривалий час їх звали «позагалактичними туманностями») розпочав ще 1912 р. американський астроном **Вестон Слайфер** (1875 – 1969). До 1923 р. вже було відомо, що у 36-ти з 41-го об'єкта лінії у спектрах зміщені у червоний бік ( $D\lambda > 0$ ), що 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  $v = cz$ .

У той саме час **Едвін Габбл**, провадячи спостереження на найбільшому тоді 250-сантиметровому рефлекторі обсерваторії Маунт Вілсон (США), переконливо довів, що згадані туманності є насправді велетенськими зоряними системами – іншими *галактиками*. Габбл розробив методи визначення відстаней до тих 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  $u$  (в км/с) та її відстанню  $r$  (в парсеках) від спостерігача у вигляді

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

тобто швидкість зростає прямо пропорціонально відстані до галактики. Коефіцієнт пропорціональності  $H$  згодом було названо *сталю Габбла*. Сам Габбл 1929 р. оцінив її числове значення в 500 км/с/Мпк.

Загалом у 30-х роках пропонували різні значення сталої  $H$  – від 500 до 560 км/с/Мпк. За сучасними ж даними (і про це ще буде мова далі),  $H \approx 70$  км/с/Мпк. Варте уваги й те, що Габбл спостерігав галактики, для яких червоне зміщення  $z \ll 0,003$ . У наш же час найдаліші з уже відомих галактик мають червоне зміщення  $z = 6$ !

З часом астрономи дійшли висновку, що в цілому статичні моделі Ейнштейна й де Сіттера зіграли позитивну роль у розвитку науки. Проте обидві вони виявилися 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 логічно пояснила б «розбігання» галактик, щодо якого після фундаментальних досліджень Габбла не могло бути жодних сумнівів.

### Динамічні рівняння Фрідмана

Двома своїми статтями – «Про кривину простору» (1922 р.) і «Про можливість світу зі сталою від'ємною кривиною» (1924 р.), опублікованими в берлінському фізичному журналі, **О.О.Фрідман** започаткував дослідження *нестатичних моделей* Всесвіту. Праці О.О.Фрідмана були важливим етапом у розвитку релятивістської космології. Тому цілком закономірне те, що релятивістська теорія однорідного ізотропного Всесвіту, про властивості якої будемо говорити тут і в наступному підрозділі, має назву *теорії Фрідмана*.

Познайомившись з першою статтею О.О.Фрідмана, А.Ейнштейн зажив, нібито викладені у ній результати сумнівні. Ще б пак, адже

О.О.Фрідман доводив, що рівняння (4.5) допускають існування нестатичного світу – світу, в якому відстані між двома довільно обраними точками з часом змінюються. А це так суперечило недавнім зусиллям Ейнштейна при побудові статичної моделі... Проте отримавши листа від О.О.Фрідмана і переглянувши результати своїх обчислень, Ейнштейн у другій замітці (1923 р.) визнав: «Я вважаю результати пана Фрідмана правильними й вичерпними. Як виявляється, рівняння поля допускають для структури простору поруч зі статичними розв'язками й динамічні (тобто такі, що змінюються з часом) центрально-симетричні розв'язки». У 1931 р., коли теорія динамічного Всесвіту набувала дедалі більшого визнання, Ейнштейн сказав і так: «Першим... на цей шлях ступив Фрідман».

Другим був бельгійський астроном **Жорж Леметр** (1894 – 1966). Немає навіть упевненості в тому, чи був він знайомий з працями О.О.Фрідмана. Протягом декількох років Леметр займався аналізом моделі де Сіттера, зокрема проблемою червоного зміщення. У своїй статті (1927 р.) Леметр пише так: «Бажання відшукати розв'язки, які мали б одночасно позитивні риси світів Ейнштейна і де Сіттера, doprowadило нас до аналізу світу Ейнштейна зі змінним радіусом простору». Сама стаття мала характерну 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 почали набувати значення».

Питання про вихід Всесвіту з *сингулярного* стану (стану надвисоких густин речовини) буде обговорене окремо. А поки що зосередимо увагу на окремих рівняннях, якими описуються нестатичні космологічні моделі. Важливим моментом у релятивістській теорії нестатичного Всесвіту є запровадження так званих *супутніх координат*: просторові координати представляються у вигляді сітки, вузли якої пов'язані з частинками речовини (наприклад із галактиками), і рухаються разом з

ними. Тим самим, зокрема, 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  $x$ ,  $\varrho$  і  $j$  інтервал записують так

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

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:  $R=R(t)$ ! Проте в 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  $x$  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  $dx$ , то це значення зберігатиметься і за довільних значень  $t$ . Увівши систему координат з центром в одній із цих точок (тоді  $x=0!$ ), знаходимо з (6.10), що відстань між двома близькими точками змінюється з часом за законом

$$dr=R(t)dx \quad (6.11)$$

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 при заданих умовах – тиску  $p$ , густині  $\rho$  і значенні параметра  $L$  – 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 часу вона, очевидно, буде

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

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

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

Як бачимо, з точністю до позначень цей вираз збігається з поданим раніше співвідношенням Габбла (6.9), причому стала Габбла

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

де задля простоти 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

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

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 Ейнштейна (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 так звані *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:

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

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

Останнє рівняння й дає змогу дослідити зміну радіуса кривини тої або тої моделі з часом. Щоправда, в рівняння входять параметри  $L$  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  $r$ ,  $L$  і  $k$  з параметрами  $H$  і  $q_0$ , які (принаймні теоретично) впливають зі спостережень. Виключаючи послідовно  $q_0$ , потім  $r$ , знаходимо у випадку  $\rho = 0$  такі співвідношення:

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

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

Розглянемо детальніше випадок  $L = 0$ . З рівняння (6.18a) 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  $r = r_{кр}$  маємо  $k = 0$  – евклідовий простір, якщо ж  $r < r_{кр}$ , то  $k < 0$  – відкритий простір Лобачевського. При величині сталої Габбла

$H = 70$  км/с/Мпк  $r_{кр} = 7 \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>. Як побачимо далі, середнє значення густини  $r$  у Всесвіті на сучасний момент перебуває у межах  $10^{-32}$  г/см<sup>3</sup> <  $r < 4,5 \cdot 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Очевидно, «реалізується» саме випадок  $r = r_{кр}$  і в цьому проявляється певна закономірність розвитку Всесвіту.

Цікаві висновки випливають і з рівняння (6.18б). Виявляється, що в закритому Всесвіті можливі лише значення параметра прискорення  $q_0 > 1/2$ , відкритому евклідовому простору відповідає значення цього параметра  $q = 1/2$ , якщо ж простір відкритий гіперболічний, то  $q_0 < 1/2$ . Далі, прирівнюючи праві частини рівнянь системи (6.18), знаходимо, що

$$q_0 = \frac{1}{2} \Omega, \quad (6.20)$$

де введено позначення  $W = r/r_{кр}$ . Для випадку, коли  $L \neq 0$ , вираз для визначення цього параметра знаходимо з тих самих двох рівнянь системи (6.18):

$$\Lambda = \frac{4\pi G}{c^2} \rho - \frac{3q_0}{c^2} H^2, \quad (6.21)$$

тоді як радіус кривини моделі  $R$  знаходиться зі співвідношення (6.18а):

$$R = \frac{c}{H \sqrt{\Omega - 1}}. \quad (6.22)$$

Важливою рисою динамічних моделей є те, що тут неминуче існує ефект червоного зміщення у спектрах далеких небесних об'єктів. Бо ж світловий промінь випромінюється у момент часу  $t_1$ , коли кривина простору була рівною  $R_1$ , а до спостерігача сигнал приходить у момент часу  $t_0$  при кривині  $R_0$ . З теорії випливає, що випромінена довжина хвилі  $\lambda$  і прийнята спостерігачем  $\lambda_0$  пов'язані між собою співвідношенням

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{R(t_1)}{R(t_0)} \quad (6.23)$$

або

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\dot{R}}{R} r$$

у повній відповідності зі спостереженнями.



## У рамках класичної теорії

Як виявилось, рівняння типу (6.17) можна отримати й шляхом елементарних міркувань у рамках класичної теорії. Робиться це так.

Розглянемо велетенську однорідну хмару, що має густину  $\rho$ . 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, котра міститься всередині сфери радіуса  $R$ :

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho. \quad (6.24)$$

Сила тяжіння діє так, ніби вся та маса зконцентрована 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 потенціальної  $W_p = \frac{Mm}{R}$ , зберігається. По-

значимо далі через  $\varepsilon$  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  $\rho$  співвідношенням (6.24), знаходимо таке рівняння:

$$\left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} R^2 \rho + 2\varepsilon, \quad (6.25)$$

або в дещо іншій формі

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2GM}{R} + v_0^2 - \frac{2GM}{R_0}. \quad (6.25a)$$

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

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

швидкість частинки стає рівна нулеві. Неважко зорієнтуватися, що рівняння (6.25) 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 (6.25), знаходимо

$$\frac{8\pi G}{3} \left( \frac{3H^2}{8\pi G} - \rho \right) R^2 = 2\varepsilon. \quad (6.26)$$

Тут  $\rho$  – 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:

$$\frac{8\pi G}{3} (\rho_{кр} - \rho) R^2 = 2\varepsilon. \quad (6.27)$$

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

Тепер звернімо увагу на рівняння (6.25a). Конкретне значення швидкості  $v_0$  відповідає певній відстані  $R$ :  $v_0 = HR_0$ . Тому це співвідношення переписуємо ще й так:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{GR_0^3 \rho_0}{R} - \frac{8\pi}{3} GR^2 \left(\rho - \frac{3H^2}{8\pi G}\right). \quad (6.28)$$

Це рівняння, залежно від величини  $r$ , і визначає тип космологічної моделі, якщо тільки  $L = 0$ . 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 (6.28) роль першого доданка. Це означає також, що в минулому (при

$R \gg 0$ ) 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. Тому тут доречно зацитувати **Я.Б.Зельдовича** та **І.Д.Новикова** («Строение и эволюция Вселенной». – М.: Наука, 1975, с. 38): «Чи можна говорити про те, що високий тиск є причиною розширення Всесвіту, що дуже стиснена речовина розширюється з тої самої причини, з якої розлітаються гази високого тиску, котрі утворюються під час детонації заряду вибухової речовини? Ні, такий погляд зовсім неправильний. Якісна відмінність полягає в тому, що заряд вибухової речовини оточений повітрям

при атмосферному тиску. Розширення обумовлене різницею між колосальним тиском газів (продуктів вибуху) і порівняно слабким тиском навколишнього повітря. Але коли ми розглядаємо тиск в однорідному Всесвіті, то припускається, що тиск розподілений строго однорідно! Отже, між різними частинками в один і той самий момент немає різниці тиску, відтак немає й сили, котра могла б вплинути на розширення і тим більше бути причиною розширення. Сам факт розширення в наявній теорії — наслідок початкового розподілу швидкостей. Причина цього початкового розподілу поки що невідома».

А от те, як змінюється відстань до тої або тої галактики в майбутньому, визначається другим доданком правої частини рівняння (6.28). Так, коли  $r > r_{кр}$ , то при деякому  $R = R_m$  права частина рівняння стане рівна нулеві, так що матимемо  $\frac{dR}{dt} = 0$ . Отже, в деякий час  $t = t_0$  відстань до галактики досягне найбільшого значення. Далі вирішальну роль грає другий доданок, а оскільки він входить у рівняння з від'ємним знаком, то буде  $\frac{dR}{dt} < 0$ .

З подальшим зростанням часу  $t$  відстань до галактики буде зменшуватися, і врешті-решт матимемо  $R = 0$ ! Маємо випадок закритого «пульсуючого» Всесвіту.

Коли ж  $r > r_{кр}$ , то обидва доданки входять у праву частину рівняння (6.28) з додатнім знаком. При  $R \in \mathbb{R}$   $\forall$  матимемо  $\frac{dR}{dt} = const$  — розширення відбуватиметься необмежено і до того ж зі сталою швидкістю.

Тут напрошуються ще декілька висновків. Коли швидкість розширення Всесвіту стала, то, знаючи швидкість руху  $v_0$  конкретної галактики та її відстань від спостерігача  $r_0$ , неважко знайти і час  $t_0$ , що пройшов від початку розширення  $t_0 = \frac{r_0}{v_0}$ . А що відповідно до закону Хаббла  $v_0 = Hr_0$ , то маємо таке співвідношення:

$$t_0 = t_n = \frac{1}{H}. \quad (6.29)$$

За сучасними даними  $H \gg 70 \text{ км/с/Мпк} = 2,33 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$  і, отже,  $t_n = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ с} \gg 14$  млрд. років.

Проте, як ми вже бачили, в минулому розширення відбувалося у швидшому темпі. Тому справжня тривалість розширення буде менша  $t_n$ . Про це йтиметься в наступному підрозділі.

Таким чином, уже з основних співвідношень класичної фізики випливають 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.

### Декілька нестатичних моделей

Теоретично на підставі системи рівнянь (6.16) можна побудувати близько двох десятків космологічних моделей. Насправді в природі «реалізувалася» лише одна. Але котра з них?

Як побачимо далі, чіткої відповіді на таке питання ще немає. Тому доцільно приглянутися уважніше до декількох найхарактерніших моделей і систематизувати сказане про них раніше. Але спочатку необхідно хоча б у декількох словах з'ясувати суть космологічної сталої  $L$ .

Після фундаментальних досліджень Габбла **А.Ейнштейн**, переконавшись у тому, що Всесвіт справді розширюється, а отже, що його властивості слід описувати нестатичною моделлю, запровадження сталої  $L$  до рівнянь (6.1) назвав «найбільшою помилкою свого життя». Насправді ж, як показав подальший строгий аналіз, параметр  $L$  входить до рівняння (6.1) *на правах сталої інтегрування*, тому рівність  $L = 0$  сама ще потребує доведення на підставі даних спостережень.

Адже  $L$  – член у рівняннях Ейнштейна (6.1) можна розглядати як засіб врахувати можливу наявність у Всесвіті деякої *додаткової сили* – сили відштовхування (при  $L > 0$ ) або притягання ( $L < 0$ ). Така сила мала б зростати зі збільшенням відстані між точками і не залежати від маси тіл. Очевидно, що вона пришвидшувала б або сповільнювала б розширення чи стискування Всесвіту.

Космологічні моделі «будують» інтегруванням системи рівнянь (6.16) або (6.17), коли тиском можна знехтувати. При цьому формально задають певне значення густини речовини у Всесвіті  $r$  на теперішній момент часу  $t_0$ , як також певне значення  $L$ . Параметр  $k$  визначається зі співвідношення між заданим значенням  $r$  і теоретично обрахованим  $r_{кр}$ .

Майже у всіх динамічних моделях, які ми тут розглядаємо, йдеться про розширення Всесвіту з деякого надщільного стану, коли радіус

кривини (відстані між фіксованими матеріальними точками) формально дорівнював нулеві. Як зазначалося, той стан приймають за початок відліку часу ( $t = 0$  при  $R = 0$ ). Час, що проминув від моменту, коли  $t = 0$ , прийнято називати «віком» моделі. Було з'ясовано: цей вік істотно залежить від того, була речовина в момент надвисокого стиску в холодному (наприклад, у вигляді пилинок) чи в гарячому стані. Як побачимо далі, у Всесвіті реалізувалася друга можливість. Тому (там, де це грає роль) будемо подавати часові характеристики моделей, виходячи з уявлень про «гарячий» Всесвіт.

Хоча нестатичні моделі мають спільну назву «моделей Фрідмана», та все-таки кожна з них має й свою назву. Ось декілька найосновніших (рис 6.1).

**1. Пульсуюча модель.** «Реалізується» вона, коли середня густина речовини у Всесвіті  $\rho$  більша від критичної  $\rho_{кр}$ , а космологічна стала  $0 \leq L < L_E$ , де  $L_E$  визначається співвідношенням (6.3). Пульсуючим буде і Всесвіт відкритий ( $k \leq 0$ ), коли  $L < 0$ . У такій моделі масштабний фактор  $R$  (радіус кривини) зростає від нуля, досягає максимального значення і знову зменшується до нуля. Тут крива  $R(t)$  є циклоїдою.

Ось декілька співвідношень, які характеризують часові масштаби пульсуючої моделі у випадку, коли  $\bar{W} = r/r_{кр} > 1$  і  $L = 0$ . Вік моделі становить

$$t_0 = \frac{1}{H} \frac{1}{\sqrt{\Omega + 1}}. \quad (6.30)$$

При розгляді подальшого розширення від моменту  $t_0$  тиском уже можна знехтувати. Тоді тривалість розширення від сучасного стану до найбільшого  $t_m$  визначається за формулою

$$t_m - t_0 = \frac{1}{H} \frac{\Omega}{(\Omega - 1)^{3/2}} \left[ \frac{\sqrt{\Omega - 1}}{\Omega} + \frac{\pi}{2} - \arcsin \sqrt{\frac{\Omega - 1}{\Omega}} \right]. \quad (6.31)$$

Зокрема, при  $\bar{W} = 2$  маємо  $t_m - t_0 \approx 3t_0$ , коли ж  $\bar{W} = 3, 5$ , то  $t_m - t_0 \approx t_H$ . Очевидно, що тривалість повного циклу (проміжок часу між двома моментами нескінченно високого стиску)

$$P \approx 2[t_0 - (t_m - t_0)],$$

що при  $\bar{W} = 2$  дає  $P \approx 7t_0$ . І якщо  $t_H \approx 14$  млрд. років, то повний період пульсації моделі становить близько 98 млрд. років.

Радіус кривини моделі на момент спостереження визначається співвідношенням

$$R = \frac{c}{H} \frac{1}{\sqrt{\Omega - 1}}. \quad (6.32)$$

Тут слід було б усі параметри позначити індексом «0», аби підкреслити, що вони беруться на сучасний момент. При  $\bar{W} = 2$  знаходимо  $R = ct_H \gg 2 \cdot 10^{28}$  см. Об'єм моделі в кожен момент часу становить  $V = 2p^2 R^3$ . Максимальний радіус кривини можна виразити через його теперішнє значення  $R_0$ , прирівнявши праву частину (6.28) до нуля, оскільки при

$$R = R_m \text{ матимемо } \frac{dR}{dt} = 0:$$

$$R_m = \frac{\Omega}{\Omega - 1} R_0. \quad (6.33)$$

При  $\bar{W} = 2$  знаходимо  $R_m = 2R_0$ , де  $R_0$  визначається зі співвідношення (6.32).

**2. Модель Леметра.** Характерною її особливістю в те, що масштабний фактор  $R(t)$  зростає від нуля нескінченно, але протягом деякого часу  $D t_0$  його значення змінюється неістотно: Всесвіт на певний проміжок часу  $D t_0$  наче «застигає». У такій моделі космологічна стала  $L$  дещо більша її значення  $L_E$ , яке визначається формулою (6.3) і відповідає *статичній моделі Ейнштейна*, інакше кажучи,

$$\Lambda > \Lambda_E = \frac{c^4}{(4\pi G \rho R^3)^2}. \quad (6.34)$$

Тривалість фази «статичності» моделі

тим більша, чим менша різниця  $L - L_E$  ( $> 0!$ ). Коли  $\frac{\Lambda - \Lambda_E}{\Lambda_E} = 2 \cdot 10^{-5}$ , то тривалість «затримки» у розширенні Всесвіту  $D t_0$  становить близько 50 млрд. років (взагалі  $\Delta t_0 \approx \ln \frac{\Lambda}{\Lambda_E - \Lambda}$ ), а його вік від початку розширення до наших днів мав би сягати 60 млрд. років. Мовою класичної

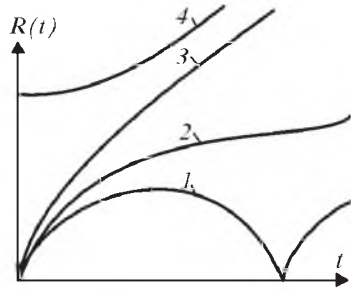


Рис. 6.1. Найтипівіші космологічні моделі: 1) пульсуюча модель, 2) модель Леметра, 3) модель Ейнштейна-Сінтера, 4) модель Еддінгтона-Леметра.

теорії поведінку масштабного фактора можна пояснити так: на декілька десятків мільярдів років сили притягання у Всесвіті зрівноважуються силами відштовхування. І лише згодом останні все-таки беруть гору. У момент «затримки» розширення радіус кривини Всесвіту якраз і дорівнює радіусові статичної моделі Ейнштейна, що визначається співвідношенням (6.3). Ця модель була особливо приваблива тоді, коли здавалося, що «вік Всесвіту»  $t_0 \sim 2$  млрд. років (за старим значенням сталої Габбла) суперечить вікові Сонячної системи...

Модель Леметра з тривалою затримкою розширення мав цікаву рису: за час, що відповідає затримці, світловий сигнал встигає декілька разів обійти Всесвіт.

**3. Модель Ейнштейна–де Сіттера.** Таку назву має модель, для якої  $r=r_{кр}$  ( $k=0$ ) і також  $L=0$ . У цьому випадку існує точний розв'язок рівняння (6.17):

$$R(t) = \sqrt[3]{6\pi G\rho(t_0)} t^{2/3}. \quad (6.35)$$

Розширення, яке розпочалося в момент  $t=0$ , тут продовжується необмежено. При цьому стала Габбла зменшується обернено пропорційно до космологічного часу:

$$H = \frac{\dot{R}}{R} = \frac{2}{3t}$$

і вік Всесвіту

$$t_0 = \frac{2}{3H} = \frac{2}{3} t_H. \quad (6.36)$$

Зокрема, при  $t_H \gg 14$  млрд. років тут маємо  $t_0 \gg 9$  млрд. років.

Параметр прискорення  $q$  у цій моделі в будь-який момент часу має одне й те саме значення  $q = 1/2$ . Оскільки ж  $q > 0$ , то це означає, що розширення відбувається уповільнено. Тут також густина зменшується з часом за законом

$$\rho = \frac{1}{6\pi G t^2} = \frac{8 \cdot 10^5}{t^2} \text{ г/см}^3. \quad (6.37)$$

Тепер декілька слів про менш популярні сьогодні моделі. Елементарним є розв'язок для випадку, коли середня густина речовини  $r$  у Всесвіті набагато менша критичної ( $r < r_{кр}$ ). За дуже малих  $R$  з (6.28) маємо  $R \sim t^{2/3}$ . Для опису подальших стадій розширення у рівнянні (6.28) можна знехтувати доданками з  $r$ . Так отримуємо, що



$$R = H_0 R_0 t$$

– масштабний фактор зростає з часом за лінійним законом.

Описана на початку розділу модель Ейнштейна виявилася нестійкою: будь-яке невелике збурення густини призводить до її розширення. Крім того, при  $r > r_{кр}$  і  $L = L_E$  виявилися можливими й такі варіанти: масштабний фактор має значення  $R = R_E$ , у нескінченно далекому минулому (при  $t = -\infty$ ) і необмежено зростає в майбутньому. Це – **модель Еддінгтона–Леметра**. За тих самих значень  $r$  і  $L$  можливе ще й таке: в момент часу  $t = 0$   $R(0) = 0$ , далі масштабний фактор зростає і в нескінченно далекому майбутньому ( $t = +\infty$ ) досягає значення  $R = R_E$ . За наявності сил відштовхування ( $L > 0$ ) рівняння (6.16) допускають ще один розв'язок: у минулому (при  $t = -\infty$ ) радіус Всесвіту мав нескінченно велике значення, згодом настало стискування до якогось найменшого  $R_{min}$ , після чого стиск змінився розширенням.

І нарешті, звернемо увагу на те, що в моделі де Сіттера масштабний фактор зростає експоненціально:

$$R(t) = R_0 e^{H(t-t_0)}. \quad (6.38)$$

Протягом певного часу **Фред Хойл** (Англія) розробляв теорію «стаціонарного Всесвіту», в якому, незважаючи на розширення за законом (6.38), густина підтримувалася на одному й тому самому рівні за рахунок неперервного «творіння» речовини з особливого «енергетичного поля». Проте ця модель нині втратила будь-яку популярність.

Тепер ще таке зауваження. Формула Габбла (6.9) правильно описує зв'язок відстані до галактики  $r$  з її червоним зміщенням  $z$  лише у випадку, коли  $z \ll 0,3$ . При більших  $z$  «в гру» входять конкретні особливості космологічної моделі. Як встановив **Вольфганг Маттіг** (ФРН), коли параметр прискорення  $q_0 \gg 0$ , то зв'язок величин  $r$  і  $z$  має такий вигляд:

$$r = \frac{c}{Hq_0^2(1+z)} \left[ q_0 z + (q_0 - 1) \sqrt{1 + 2q_0 z - 1} \right] \quad (6.39)$$

Зокрема, у закритому Всесвіті при  $q_0 = 1$  ( $w = r/r_{кр} = 2$ ) замість формули (6.39) маємо співвідношення

$$r = \frac{c}{H} \frac{z}{1+z}. \quad (6.40)$$

Якщо ж  $q_0 = 1/2$  ( $r = r_{кр}$  – відкритий евклідовий простір), то відстань до певної галактики пов'язана з її червоним зміщенням так:

$$r = \frac{2c}{H} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}} \right]. \quad (6.41)$$

Поклавши  $z \ll 1$ , неважко перейти від (6.39) до закону Габбла у вигляді (6.8).

### Діаграма Габбла

Дві разом узяті величини – стала Габбла  $H$  і середня густина речовини у Всесвіті  $\bar{\rho}$  (або параметр прискорення  $q_0 = (1/2) \dot{r}/r_{кр}$ ), здавалося б, можуть дати певну відповідь на питання: котру ж з космологічних моделей «реалізувала» Природа? Та сьогодні ще важко сказати, що відповідь на це питання вже отримано...

З усього сказаного раніше видно, що сталою Габбла визначаються масштаби навколишнього Всесвіту, середня густина речовини в ньому. Тому неминуче виникає подив: як могло статися, що, назвавши величину  $H$  «сталюю», астрономи за якихось 40 років зменшили її числове значення майже у десять разів?

Як тепер відомо, 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. Проте згодом було доведено, що цефеїди насправді яскравіші, ніж приймалося раніше. По-друге, у всіх дальших галактиках Габбл вишукував найяскравіші зорі і порівнював їхній блиск з такими самими об'єктами галактик Місцевої системи. Потім виявилось, що 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 самих 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  $\epsilon$ , так би мовити, «стандартною свічкою», або «світловим еталоном».

І тут передовсім постає питання, котре турбувало й Габбла: якою мірою світло від тих об'єктів послаблюється у міжгалактичному сере-

довиші та в нашій Галактиці? Необхідну поправку  $A$  визначили досить-таки складними міркуваннями й спостереженнями. Далі беруть до уваги й ту обставину, що фотографічним або фотоелектричним методом спостерігач реєструє не повний потік енергії від тої чи тої галактики, а лише його частину – потік у певній ділянці спектра. Але ж 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 так званої  $K$ -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, залежно від того, скільки років світловий промінь долає відстань від неї до Землі. Інакше кажучи, ми порівнюємо об'єкти різного віку! Отож, виходячи з певних уявлень про еволюцію зір, необхідно було розрахувати, наскільки світність галактики із заданим значенням  $Z$  відрізняється від світності «стандартної свічки» з найближчих до нас околиць.

Блиск зір і галактик прийнято визначати у видимих зоряних величинах  $m$ . Нагадаємо, що зоря Вега із сизір'я Ліри має видиму величину  $m = 0,0^m$ , найслабкіша зоря, яку бачимо неозброєним оком, має 6-ту величину ( $6^m$ ), для сучасних телескопів доступні зорі  $28^m$ . Проте видима величина  $m$  нічого не говорить про справжню потужність зорі, бо одні зорі містяться ближче, інші – далі. У зв'язку з цим в астрономії запроваджено поняття про абсолютну зоряну величину  $M$  – величину, яку мала б зоря, коли б перебувала на відстані  $r = 10$  пк. Саме величина  $M$  і характеризує світність зорі (або галактики), бо  $M = -2,5 \lg L + \text{const}$ . Між абсолютною величиною зорі (чи галактики)  $M$  і її видимою величиною  $m$  є такий зв'язок:

$$m = M + 5 \lg r - 5, \quad (6.42)$$

тут  $r$  вимірюється у парсеках.

Як зазначалося, під час визначення відстаней до галактик приймають, що в кожному галактичному скупченні «стандартна свічка» має однакову світність  $L$ , тобто однакову абсолютну величину  $M$ . Тим самим, як видно з формули (6.42), відстань до того або того об'єкта пропорціональна його видимій величині  $m$  (з урахуванням поправок  $A$  і

К), 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  $r = \frac{v}{H} = \frac{cz}{H}$ . У такий спосіб отримуємо взаємозв'язок між двома характеристиками «стандартної свічки»  $m$  і  $z$ , що їх безпосередньо можна знайти зі спостережень

$$m = 5 \lg cz - 5 \lg H + M - 5, \quad (6.43)$$

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

Річ ясна, що 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 (бо де гарантія того, що поправки  $A$  і  $K$  обраховано як слід?). 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.

Тепер стає наглядним і джерело помилок Габбла: він підставляв у формулу (6.43) 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, **Алан 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 обгрунтованих міркувань (беручи, щоправда, до уваги групи інших об'єктів) отримав  $H \approx 50$  км/с/Мпк, з чим, як виглядає, Сендідж тоді погодився. Очевидно, можна було вважати, що значення сталої Габбла встановлено – і все ж ... із точністю  $\pm 50\%$ !

Проте формулу (6.43) 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:

$$E = \frac{L}{4\pi D^2}, \quad (6.44)$$

причому  $D$  прийнято називати *фотометричною відстанню*. При невеликих відстанях величина  $D$  дорівнює 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  $Dt_1$ . Спостерігач зафіксує їх у момент часу  $t_0$  розділеними в часі на величину  $Dt_0$ , причому з теорії випливає, що

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = \frac{R(t_1)}{R(t_0)}. \quad (6.45)$$

Якщо Всесвіт розширюється, то  $R(t_0) > R(t_1)$ , а тому  $Dt_0 > Dt_1$ . Ефект числа можна пояснити й так. Хай протягом часу  $Dt_1 = 1\text{с}$  галактикою випромінено певне число квантів. У процесі їх проходження через простір, якій розширюється, цей «пакет» наче розтягується в часі. Тому спостерігач за одну секунду зареєструє в  $(1+z)$  менше число квантів. Коли ж під часом  $Dt_1$  і  $Dt_0$  розуміти період електромагнітної хвилі  $T = 1/c$ , то з (6.45) знаходимо зв'язок довжини хвилі  $\lambda_1$ , яку випромінює джерело в момент  $t_1$ , з довжиною хвилі  $\lambda_0$  зареєстрованою спостерігачем у момент часу  $t_0$ :

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = 1+z = \frac{R(t_0)}{R(t_1)}, \quad (6.46)$$

де  $\lambda_0 = \lambda_1 + D\lambda$ . Із співвідношення (6.46) 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 (6.44) маємо зв'язок освітленості  $E$  з відстанню  $r$  у вигляді

$$E_0 = \frac{L_1}{4\pi^2(t_0)(1+z)^2}, \quad (6.47)$$

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 (6.43), до якої вхо-

дять і така важлива характеристика космологічної моделі, як параметр прискорення:

$$m = 5 \lg \frac{1}{q_0^2} \left[ q_0 z + (q_0 - 1) \sqrt{1 + 2q_0 z} - 1 \right] + C, \quad (6.48)$$

де  $C = M_1 - 5 \lg H - 45$ .

Залежність  $m - z$  (діаграма Габбла) для найяскравіших еліптичних галактик у скупченнях показана на рис 6.2, де позначено також криві, що відповідають різним значенням параметра прискорення  $q_0$ . Як ба-

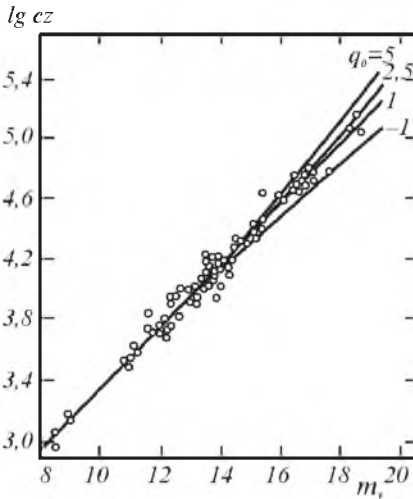


Рис 6.2. Залежність «видима величина  $m$  – червоне зміщення  $z$ » (діаграма Габбла) для найбільш яскравих еліптичних галактик і теоретичні залежності  $m - z$  для декількох значень параметра прискорення  $q_0$ .

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  $z \gg 3,0$ . Але це не так. Якщо в найяскравіших галактиках «різно-

чимо, визначити зі спостережень величину  $q_0$  дуже важко: помилки у встановленні блиску найдальших з досліджених тоді галактик (для яких  $z \gg 0,5$ ) усього на  $0^m,3$  відповідають зміні  $q_0$  приблизно на одиницю! За Сендіджем, найімовірніше значення параметра прискорення становить  $q_0 = 0,96 \pm 0,4$ . Звідси б впливало, що Природа «реалізувала» саме замкнену пульсуючу модель Всесвіту.

Проте тут може зіграти свою роль урахування еволюційного фактора, про який уже йшлося. І в цьому питанні серед астрономів немає єдності. За одними обрахунками, світність галактики зростає приблизно на 5% протягом кожного мільярда років, за іншими ж, вона за той самий час зменшується на 10%. І це останнє приводило б до зменшення параметра  $q_0$

бій» 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.

Як вже стало очевидним, і безпосереднє визначення середньої густини речовини у Всесвіті також не давало чіткої відповіді на питання, якою саме моделлю описується розширення Всесвіту... Бо, зокрема, 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  $\varphi$ . З теорії випливає, що кутові розміри галактик пов'язані з їхніми відстанями залежністю

$$\theta = a \frac{1+z}{r} = a \frac{(1+z)^2}{D}. \quad (6.49)$$

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

Проте з допомогою сучасних телескопів нелегко досягнути меж, за якою настає оте зростання кутових розмірів галактик, бо це відповідає червоним зміщенням  $Z \gg 1$ . Та досягати цього найменшого значення  $Z$  і не обов'язково. Зіставлення формул (6.39) і (6.49) показує, що вже при  $Z \sim 0,6$  кутовий діаметр галактики при  $q_0 = +1$  в 1,6 раза більший, ніж при  $q_0 = -1$ .

Але, як встановив **Я.Б.Зельдович**, співвідношення (6.49) 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  $\varphi$  взагалі може не досягати мінімальних значень. Не виключено, що ця обставина в майбутньому використовуватиметься для розв'язання питання, яка частина речовини у Всесвіті сконденсована в галактиках.

Кутові діаметри, про які йшлося, прийнято називати *метричними*. Під час фотографічних спостережень визначають так звані *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  $z \gg 0,6$  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.

На жаль, такі виміри перебувають практично на грані можливостей сучасних найпотужніших телескопів.

У першому розділі ми звернули увагу на *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 (6.47), 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 приходять цілком скінченна кількість енергії

$$F = \frac{2\pi}{3} \frac{c}{H} NL, \quad (6.50)$$

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  $r \gg 5$  млрд. світлових років. При цьому половину усієї енергії привносять галактики, видима величина яких яскравіша  $21^m$ , другу половину дають усі інші слабкіші об'єкти.

Доречно відзначити, що без урахування червоного зміщення у спектрах галактик замість формули (6.50) матимемо такий вираз для величини потоку енергії:

$$F = 2\pi N L r, \quad (6.51)$$

де  $r$  – радіус сфери, з якої до Землі приходять випромінювання. При  $r \rightarrow \infty$  з (6.51) і випливає  $F \rightarrow \infty$ .



## 7. СПОСТЕРЕЖНІ АСПЕКТИ КОСМОЛОГІЇ

### Реліктове радіовипромінювання

Серед багатьох питань, які постали перед астрономами в 40-х роках ХХ ст., чи не найважливішими були такі: чи справді розширення Всесвіту розпочалося від сингулярності, тобто від стану нескінченно високої густини ( $t=0$ ), і як сталося, що у Всесвіті існують хімічні елементи від водню аж до урану і саме в таких, а не інших пропорціях?

Чималу роль у розвитку теорії тут зіграв **Георгій Гамов** (1904–1968). Він об'єднав обидва поставлені вище питання, поклавши (1946 р.), що водень, гелій і всі важчі хімічні елементи аж до урану утворилися внаслідок реакцій синтезу при розширенні первинної дозоряної речовини, яку учений назвав «ліем» (так Аристотель називав «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 (1956 р.), 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.

З метою перевірки теорії гарячого Всесвіту й визначення температури згаданого випромінювання, яке названо *реліктовим*, група вчених США завершувала (1965 р.) монтаж спеціальної апаратури. А тим часом... **Арно Пензіас** і **Роберт Вільсон** (США) розробили методику використання радіотелескопа, призначеного спочатку для прийому на довжині хвилі  $\lambda = 7,3$  см сигналів, відбитих від супутника «Ехо». За допомогою спеціального модулятора їхній приймач міг виділяти корисний сигнал на тлі шуму, котрий виникає у кожному приймачі. Інтенсивність шуму тут у 1000 (!) разів перевищувала інтенсивність самого сигналу. Саме Пензіасу й Вільсону 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.

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  $z \gg 0,6$  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.

На жаль, такі виміри перебувають практично на грані можливостей сучасних найпотужніших телескопів.

У першому розділі ми звернули увагу на *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 (6.47), 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 приходять цілком скінченна кількість енергії

$$F = \frac{2\pi}{3} \frac{c}{H} NL, \quad (6.50)$$

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  $r \gg 5$  млрд. світлових років. При цьому половину усієї енергії привносять галактики, видима величина яких яскравіша  $21^m$ , другу половину дають усі інші слабкіші об'єкти.

Доречно відзначити, що без урахування червоного зміщення у спектрах галактик замість формули (6.50) матимемо такий вираз для величини потоку енергії:

$$F = 2\pi N L r, \quad (6.51)$$

де  $r$  – радіус сфери, з якої до Землі приходять випромінювання. При  $r \rightarrow \infty$  з (6.51) і випливає  $F \rightarrow \infty$ .

## 7. СПОСТЕРЕЖНІ АСПЕКТИ КОСМОЛОГІЇ

### Реліктове радіовипромінювання

Серед багатьох питань, які постали перед астрономами в 40-х роках ХХ ст., чи не найважливішими були такі: чи справді розширення Всесвіту розпочалося від сингулярності, тобто від стану нескінченно високої густини ( $t=0$ ), і як сталося, що у Всесвіті існують хімічні елементи від водню аж до урану і саме в таких, а не інших пропорціях?

Чималу роль у розвитку теорії тут зіграв **Георгій Гамов** (1904–1968). Він об'єднав обидва поставлені вище питання, поклавши (1946 р.), що водень, гелій і всі важчі хімічні елементи аж до урану утворилися внаслідок реакцій синтезу при розширенні первинної дозоряної речовини, яку учений назвав «ліем» (так Аристотель називав «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 (1956 р.), 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.

З метою перевірки теорії гарячого Всесвіту й визначення температури згаданого випромінювання, яке названо *реліктовим*, група вчених США завершувала (1965 р.) монтаж спеціальної апаратури. А тим часом... **Арно Пензіас** і **Роберт Вільсон** (США) розробили методику використання радіотелескопа, призначеного спочатку для прийому на довжині хвилі  $\lambda = 7,3$  см сигналів, відбитих від супутника «Ехо». За допомогою спеціального модулятора їхній приймач міг виділяти корисний сигнал на тлі шуму, котрий виникає у кожному приймачі. Інтенсивність шуму тут у 1000 (!) разів перевищувала інтенсивність самого сигналу. Саме Пензіасу й Вільсону 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, радіоґалактик чи розсіювання квантів світла на міжзоряних пилинках. Тому це відкриття зразу ж було належно оцінене: антена вловлює реліктове космічне радіовипромінювання, яке є доказом того, що Всесвіт у минулому перебував у гарячому стані. Ці «первісні» фотони блукають у просторі ще відтоді, коли не існувало ні зір, ні ґалактик...

Згодом було здійснено щонайточніші виміри інтенсивності реліктового випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 75 см до 2,5 мм. Їх результати повністю узгоджуються з теоретично розрахованим спектром чорного тіла, що має температуру 2,7 К. Звичайно, було б дуже цікаво зареєструвати максимум такого випромінювання, який припадає на довжину хвилі 1,1 мм. Проте саме такі довжини хвиль практично повністю поглинаються атмосферою Землі. Виміри в цьому діапазоні здійснили за допомогою спеціальних детекторів з висот понад 300 км. Точність спостережень тут була дещо нижча, але й вони виявили очікуваний спад інтенсивності в напрямі до інфрачервоної ділянки спектра, що цілком відповідало теорії.

Тим самим, як підкреслили **Я.Б.Зельдович** та **І.Д.Новиков**, «теорія гарячого Всесвіту як теорія величезного етапу еволюції Всесвіту в наш час встановлена остаточно. Вирішальним аргументом є існування й властивості реліктового випромінювання. Ті уточнення, які можуть з'явитися (оскільки точність усіх здійснених вимірів не абсолютна), не змінять основного висновку про гарячий Всесвіт, а дадуть інформацію про деталі процесів, котрі відбувалися в минулому».

Отже, міжґалактичний простір заповнений квантами низької частоти. При температурі  $T = 2,7$  К густина енергії цих квантів становить  $u = a_R T \gg 4 \cdot 10^{-20}$  Дж/см<sup>3</sup> (тут  $a_R = 7,56 \cdot 10^{-22}$  Дж/см<sup>3</sup>/К<sup>4</sup> – стала випромінювання). Середня енергія кванта  $\bar{\epsilon} \gg 2,7 k T \gg 10^{-22}$  Дж ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана). Звідси знаходимо, що середнє число квантів в одиниці об'єму  $N_{\bar{\epsilon}} = u / \bar{\epsilon} \gg 400$  см<sup>-3</sup>. Тим часом за сучасної середньої густини речовини у Всесвіті  $\rho \gg 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>; це дає концентрацію частинок  $N = \rho / m_H \gg 5 \cdot 10^{-7}$  см<sup>-3</sup> ( $m_H = 1,67 \cdot 10^{-24}$  г – маса атома водню). Таким чином, у Всесвіті на кожен нуклон припадає близько 1 млрд. фотонів!

У процесі розширення Всесвіту енергія кожного кванта зменшується за законом

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} = \frac{v_1}{v_0} . \quad (7.1)$$

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 гарячий!

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

$$r_{\rho} = u/c^2 = a_R T^{\#} = 4,5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3 \quad (7.2)$$

– 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 випливає, що густина маси частинок змінюється обернено пропорціонально кубові радіуса кривини:

$$r_m \sim 1/R^3(t)$$

За тим самим 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. Тому

$$u = \rho_{\gamma} c^2 = \frac{B}{R^4(t)}, \quad (7.3)$$

де  $B$  – стала величина. З теорії випливає, що при деякому значенні радіуса кривини

$$R(t_*) \leq \frac{1}{2,5 \cdot 10^4 \Omega} R(t_0) \quad (7.4)$$

маємо нерівність  $r_{\rho} \gg r_m$  і головну роль тоді грає якраз випромінювання. Протягом часу  $0 < t < t_*$  розширення відбувається за законом

$$R(t) = \left[ \frac{32\pi GB}{3c^2} \right]^{1/4} t^{1/2}. \quad (7.5)$$

Звідси випливає, що густина маси енергії випромінювання у кожен момент космологічного часу  $t$  дорівнює

$$\frac{u}{c^2} = \rho_{\gamma} = \frac{3}{32\pi G t^2} = \frac{4,5 \cdot 10^5}{t^2} \cdot \text{г/см}^3. \quad (7.6)$$

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

$$T = \left[ \frac{3c^2}{32\pi G a_R} \right]^{1/4} t^{-1/2} \approx \frac{3.4 \cdot 10^{10} K}{\sqrt{t}}. \quad (7.7)$$

Проте в кожному елементарному об'ємі у рівновазі з випромінюванням перебувають різні типи елементарних частинок: електронні, мюонні та нейтринні пари, нуклони (протони і нейтрони), що мають збуджений стан. З урахуванням сказаного вираз для густини енергії випромінювання записується так:  $u = b a_R T^4$ , де  $b$  – деяка стала. Тому, зокрема, при  $t \gg 1c$  з теорії випливає, що  $T \gg 10$  млрд. градусів.

Далі ми побачимо, що на ранній стадії розширення Всесвіту й справді відбуваються деякі реакції синтезу хімічних елементів, хоча зовсім не такою мірою, як це уявляв **Г.Гамов**. Тут же зосередимо увагу на можливій ролі 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

$$T(\varphi) \approx T_0(1 + (v/c) \cos \varphi), \quad (7.8)$$

де  $\varphi$  – кут між вектором швидкості руху спостерігача і напрямом осі радіотелескопа. Надлишок інтенсивності, що відповідає надвишкowi температури

$$\frac{\Delta T}{T} \approx (0,40 \pm 0,56) \cdot 10^{-3},$$

було виявлено орієнтовно у напрямі на сузір'я Лева. Звідси випливає, що стосовно «фону реліктового випромінювання» (для опису якого вживають ще назву «космічний субстрат» або ще, за аналогією до класичної електродинаміки, «неоєфір») Сонячна система рухається зі швидкістю  $u \gg 400$  км/с, а центр нашої Галактики – зі швидкістю  $u \gg 600$  км/с у напрямі на сузір'я Лева.

Це означає також, що з «неоєфіром» можна пов'язати систему координат, супутню космічному субстрату, як і запровадити всесвітній

космологічний час. І нарешті, високий ступінь ізотропії реліктового радіовипромінювання свідчить, що Всесвіт у великих масштабах однорідний (*див. однак с. 194–196*).

### Проблема «прихованої маси»

Як ми вже бачили, тип космологічної моделі визначається співвідношенням між величиною середньої густини речовини у Всесвіті  $\rho$  та її критичним значенням, котре при  $H \approx 70$  км/с/Мпк становить  $\approx$

$$\rho_{кр} = 3H^2/(8\pi G) \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3$$

Модель буде закрита, коли  $\Omega = \rho/\rho_{кр} > 1$ .

З усього сказаного в попередньому розділі стає очевидним, що встановити величину параметра прискорення  $q_0$  шляхом спостережень ще дуже важко. То, може, встановити тип моделі було б легше, прямо порівнюючи середню густину з  $\rho_{кр}$ ? Для цього слід розглянути питання про внесок різних форм космічної матерії у повну густину  $\rho$ . Адже, як зауважив П.Піблс, «немає жодних гарантій, що переважаючий внесок у густину дають ті форми матерії, які ми вже спостерігаємо».

«Найочевиднішою» формою існування речовини у Всесвіті є галактики, які об'єднуються у скупчення. Діаметри останніх сягають 8Мпк, причому в них налічують іноді десятки тисяч галактик. Середня відстань між скупченнями  $l_s \approx 40$  Мпк, що і є типовим масштабом неоднорідності Всесвіту. За всіма даними, у масштабах, більших  $l_s$ , Всесвіт однорідний, ніякої «ієрархічної» структури в ньому не виявлено. Про це ж свідчить і високий ступінь ізотропності реліктового радіовипромінювання.

Щоб визначити середню густину речовини галактик, скажімо, в кубі зі стороною  $l_s$ , необхідно знайти їхню загальну масу в цьому об'ємі. Ориєнтовна 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 можна вважати, що вся маса зір  $M$ , які є всередині сфери радіуса  $R$ , зконцен-

трована в центрі галактики. Прирівнюючи сили тяжіння  $f_T = \frac{Gm}{R^2} M$  і

відцентрову  $f_c = mv^2/R$ , знаходять масу галактики

$$M = Rv^2/G \quad (7.9)$$

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 (7.9).

Неодноразові визначення середньої густини речовини, сконденсованої у формі галактик, привели до висновку, що

$$\bar{\rho}_{\text{гал}} \gg 10^{-32} \text{ г/см}^3, \quad W_{\text{гал}} \gg \frac{\bar{\rho}_{\text{гал}}}{\rho_{\text{кр}}} \gg 0,02 \ll 1.$$

Оскільки масу галактик визначено динамічним методом, то в знайдене значення  $\bar{\rho}_{\text{гал}}$  входять і ті форми речовини, які, перебуваючи всередині сфери згаданого радіуса  $R$  та створюючи гравітаційне поле, безпосередньо не спостерігаються. Це можуть бути навіть чорні діри або великі кількості нейтронних зір.

Однак ще в середині 30-х років ХХ ст., визначаючи швидкості руху кожної галактики відносно центра тяжіння скупчення, астрономи виявили, що такі швидкості «надто великі». Створювалося враження, ніби скупчення галактик мало б розпастися за 1 – 2 млрд. років, тоді як вік галактик (а через те і їхніх скупчень!) у 5 – 10 разів більший!

У зв'язку з цим доречно пригадати так звану *теорему про віріал*: якщо скупчення галактик (або зір) перебуває у стаціонарному стані (а в цьому сумніватися важко), то сума подвоєної кінетичної енергії системи  $W_k$  та її потенціальної енергії  $W_p$  дорівнює нулеві. Це врешті – решт дає формулу для визначення маси системи галактик, яка збігається з (7.9), якщо під  $M$  і  $R$  розуміти загальну масу й радіус скупчення, під  $v$  – середню швидкість галактики відносно центра скупчення. До речі, для галактик зі скупчення у сузір'ї Волосся Вероніки  $v \gg 1000$  км/с.

Так було знайдено, що маси багатьох скупчень у десятки, а то й сотні (!) разів більші від тої, яку було визначено підсумовуванням мас кожної галактики зокрема. Таку ситуацію назвали *віріальним парадоксом*. Можна, отже, думати, що насправді в скупченні основна частина маси перебуває в «прихованому» стані у формі «невидимої» речовини. Тим самим було б  $W \gg 1$  і, можливо, навіть  $W > 1$ . Але що це за речовина? Ось міркування, які щодо цього склалися було наприкінці 80-х рр. ХХ ст.



Передовсім нею частково могли б бути ті ж таки 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 областей, де видно спіральні вітки, здебільшого не перевищують ... 10 кпк. Тепер йдеться про те, що галактики, мабуть, оточені протяжними коронами (гало) зі слабких карликових зір і що, можливо, саме на них і припадає основна частина маси галактик.

Можливо також, що чимала кількість галактик залишається недосяжною для спостережень через їх «розрідженість» і відповідно малу поверхневу яскравість, унаслідок чого вони стають непомітні на тлі неба, або ж, навпаки, з огляду на малі розміри вони практично не відрізняються від зір. Можуть бути й «мертві» галактики, де всі зорі завершили свою еволюцію.

Не виключається і можливість існування в міжгалактичному середовищі чорних дір, котрі поруч з галактиками входять до скупчень як їхні рівноправні члени. Але при зближенні з чорною дірою та або інша галактика мала б зазнавати дії припливних сил, унаслідок чого наставало б її руйнування. Оскільки таких явищ у скупченнях галактик не зауважено, це означає, що найбільша маса чорної діри мала б оцінюватися величиною  $M \gg 10^9 M_{\odot}$ , яка співмірна з масою «середньої» галактики. Тепер вже є докази того, що в декількох десятках галактик чорні діри такі є і їх маси сягають  $10^9 M_{\odot}$  (див кн. **Я.С.Яцківа** та ін., с. 117).

Висловлювалося припущення, за яким певна частина речовини у міжгалактичному середовищі може перебувати у вигляді сконденсованого водневого «снігу». Оскільки ж зображення далеких галактик залишаються чіткими, то розміри сніжинок мали б сягати десяти кілометрів! Поки що важко сказати, як такі брили могли б зформуватися.

У 80-х роках ХХ ст. здійснено багато спроб виявити міжгалактичний газ, насамперед – міжгалактичний водень. Спостереження на довжині хвилі 21 см (яку цей газ випромінює) привели до висновку, що нейтрального водню у скупченнях галактик практично немає, отож тут  $\bar{W}_H \gg 0,0001$ . Узято до уваги, що в спектрах квазарів практично не зауважено лінії поглинання  $L_{\alpha}$ , появу якої можна було б пов'язати з наявністю на шляху променя нейтрального водню. Звідси випливає, що концентрація такого газу в нейтральному стані тут  $n \leq 6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-3}$ , а тому  $\bar{W}_H \leq 2 \cdot 10^{-7}$ . Проте така концентрація газу в міжгалактичному середо-

вищі виглядає малоімовірною. Через те природно припустити, що газ перебуває здебільшого в іонізованому стані.

І тут доцільно пригадати, що 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. За обрахунками густина такого газу може бути співмірна з  $r_{кр}$ . Точніше, теорія дає  $W_{газ} \gg 0,9$ , коли міжгалактичне середовище складається з чистого водню, і  $W_{газ} \gg 0,6$ , коли тут є 70% водню і 30% гелію. Як висловився свого часу **Ян Оорт** (Голландія), галактики наче «плавають» у середовищі гарячого міжгалактичного газу. Оорт подав також деякі докази того, що у формі галактик перебуває усього  $1/_{15}$  частина газу Всесвіту. Оцінки ж концентрації речовини у формі космічних променів дають  $W_{кр} \gg 0,01$ . Щодо нейтрино теорія допускає набагато більшу їх масу, навіть до  $W_n \gg 1$ .

Ще раз подамо слова **П.Піблса**: «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  $L$ ». Бо «немає причин вважати, що наша винахідливість уже вичерпана».

## Оази в пустелі

«Конкретні й однозначні» спостереження довели: світ галактик – безмежно великий за своїми масштабами і дуже різноманітний за формами. 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 6-метрового телескопа їх можна спостерігати декілька мільярдів... З близько тисячі найяскравіших галактик 25%-еліптичні, мають круглу або еліптичну форму, близько 50% – різноманітні спіральні структури, близько 20 % – лінзоподібні, для яких яскравість від центру до краю падає сходинками, і близько 5 % – неправильні, для яких відсутня симетрія форми. Діапазон світностей, а, отже, і число зір, що належать до системи, найбільший для еліптичних галактик – від  $L \gg 10^{38}$  Вт (маси  $M \gg 10^{13} M_{\odot}$ ) до  $L \gg 10^{31}$  Вт ( $M \gg 10^5 M_{\odot}$ ). Є галактики «взаємодіючі», в інших є «активні» зони, що випромінюють значну частину енергії в радіодіапазоні.

Галактики об'єднуються в скупчення і надскупчення. І тут-то виявлено багато загадкового. З одного боку, Всесвіт начебто дуже однаковий. З іншого ж – у ньому знайдено велетенські волоконноподібні структури, що складаються як намистини на нитці, із надскупчень і величезних порожнин – «каверн» або войдів, що в цілому «подібне на швейцарський сир». Найбільша з таких ниткоподібних структур є в сузір'ях Персея і Пегаса, її протяжність – понад 400 Мпк, тобто понад один мільярд світлових років. Одну з «каверн» відкрито в сузір'ї Волопаса, діаметр її сягає 250 млн. світлових років. «Каверна» обмежена «стінками» з галактик.

І хоча дотепер детально досліджено менше 1% об'єму видимого Всесвіту, аналіз імовірності приводить все ж таки до цілком певного висновку: «вибудовування в ряд» величезного числа скупчень галактик не випадкове!

У процесі космологічного розширення згадані комірчасті структури, очевидно, розтягуються у всі боки. Точніше, у кожному конкретному випадку розширюється система розміром понад 100 Мпк, тоді як системи менших масштабів утримуються гравітацією.

Виявлено, що крім великомасштабної структури у розподілі галактик існує ще і тонка структура – дрібні ланцюжки галактик, які заповнюють Всесвіт майже безперервною просторовою сіткою, є вони і в «кавернах»...

Джерелом інформації тут є також активні (або нестаціонарні) галактики (зокрема, галактики Сейферта і Маркаряна і так звані лазертиди) і, зрозуміло, квазари. В першому випадку йдеться про зміни яскравості самих ядер галактик, причому на тривало-періодичні цикли (з характерним часом у декілька років) накладаються короткочасні «спалахи» (тривалість їх декілька тижнів). Аналіз спектрів нестаціонарних галактик показує, що в напрямі від їх центрів зі швидкостями близько 1000 км/с рухаються хмари газу, маса яких іноді сягає сотень і тисяч мас Сонця (для галактики NGC 1068– $10^6 M_{\odot}$ , і що важливе, – енергія такого газу рівна  $10^{46}$  Дж!). Статистичні дані свідчать, що активність виявляє кожна сота галактика. Невідомо, свідчить це про нетривалість активної стадії розвитку ( $\gg 1$  % загального віку галактики), чи така нестаціонарність властива лише окремим типам галактик.

Вже відомо понад 10 000 квазарів – джерел, які на фотографічній пластинці мають вид звичних зір і є могутніми джерелами радіовипро-

мінювання. За червоним зміщенням у спектрах квазарів визначають відстані до цих об'єктів і, в подальшому, беручи до уваги їх видимі величини, світність. Ці світності ( $10^{39} - 10^{41}$  Вт) в десятки і тисячі раз перевищують потужності «нормальних» галактик. Встановлено, що блиск квазарів хаотично змінюється. Найймовірніше, квазари є ядрами велетенських галактик, що перебувають на дуже великих відстанях (наприклад, об'єкт OQ172 має червоне зміщення  $z = 3,53$ , що при  $r = r_{\text{кр}}$  відповідає відстані  $z \gg 2 \cdot 10^{28}$  см), так що їх зовнішні частин просто не видно. Навколо деяких квазарів знайдено туманні оболонки, які можуть бути зовнішніми шарами еліптичних галактик.

«Прихованими квазарами» названо об'єкти типу VL Ящірки (лацертиди), які раніше вважали «звичними» змінними зорями. Амплітуди блиску цих об'єктів сягають  $6^m - 7^m$ , що відповідає змінам їх світностей в 400–1000 разів. У спектрах лацертід не вдалося знайти жодних ліній, тому встановити їх природу неможливо. Але ще в 1975 р. методами електронної фотографії навкруги об'єкту BW Тельця (він же радіоджерело 3C120) знайдена ціла галактика із зорями і спіральними вітками. Слабка туманна оболонка знайдена і навкруги VL Ящірки. Лінії в спектрі оболонки зміщені в червоний бік на величину  $z = 0,07$ , що відповідає відстані до цього об'єкта  $r \gg 450$  Мпк.

У чому ж причина таких великих змін світностей згаданих об'єктів? Чи можуть вони хоч частково «пролляти світло» на проблему формування галактик і квазарів? Дискусії про це продовжуються. За гіпотезою Д.Лінден-Бела (Англія), в ядрах галактик є чорні діри. При падінні на чорну діру речовина, прискорюючись, розігрівається і світиться. Для забезпечення ж світностей активної галактики  $L \gg 10^{39}$  Вт необхідно, щоб у чорну діру при швидкості  $v \gg c$  падало усього лише  $10^{26}$  г/с, тобто близько  $1M_{\odot}$  за рік; для квазарів така величина у декілька разів більша.

Цю ідею конкретизував Г.Хіллс (США), мовляв у процесі розвитку галактики в ній внаслідок «випадкових причин» виникає невелика чорна діра масою близько  $100M_{\odot}$ . Надалі маса чорної діри зростає, збільшуючись за рахунок «випадання» на неї зір. Таким чином, наближаючись до чорної діри на відстань, меншу деякого критичного значення, зоря під дією припливних сил з боку чорної діри розривається. Частина зоряної речовини провалюється в чорну діру, інша викидається назовні і спостерігається як газові хмари. Оскільки ж зустріч зорі з чо-

рною дірою – явище випадкове, то це у підсумку і дає неправильні коливання блиску. Хіллс підрахував, що за час  $dt \gg 10^8$  років маса чорної діри зростає до  $3 \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Після цього її зростання припиняється, оскільки середня густина чорної діри ( $M/R_g^3$ ) зменшується до величини близько  $1 \text{ г/см}^3$ , тобто стає співмірною із середньою густиною зір. Така чорна діра вже не в змозі руйнувати зорі.

У свою чергу, поділ галактик на еліптичні і спіральні мав би бути обумовлений різною швидкістю утворення зір на початковій стадії еволюції галактики. Практично у всіх галактиках є «старше» покоління зір, які у формі гігантського рою концентруються навколо центра своєї системи. В еліптичних галактиках, ймовірно, саме на цій стадії розвитку у форму зір перейшла практично вся речовина. У спіральних же галактиках значна його частина «осідала» до площини галактики, утворюючи диск, з якого лише згодом формувалося наступне покоління зір. Значну роль, однак, від початку тут можуть відігравати темні, несвітні форми речовини.

І ще така обставина: за сучасними уявленнями важкі хімічні елементи утворюються в надрах зір, зокрема при їх спалахах як наднових, тоді як «первинна» речовина мала б складатися лише з водню і гелію. Тим часом, як свідчить спектральний аналіз, в атмосферах зір з найбільших еліптичних галактик вміст важких хімічних елементів нібито майже не відрізняється від їх вмісту в атмосфері Сонця. Мимовільно виникає думка, що формуванню «звичних» зір у галактиках передувало утворення зір-гігантів, які якраз і були своєрідними «фабриками» з виробництва значної кількості важких хімічних елементів...

### **Загадка «великих чисел»**

«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 зривають 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 просунутися у тому самому напрямі і дати астрономічне пояснення найважливішим фізи-

чним 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, можливо, раніше, саме від космології очікують вирішальних відкриттів, значення яких виходило б далеко за рамки суто астрономічних проблем. Бо саме в космології одночасно перешітаються ролі законів тяжіння, квантової механіки і теорії елементарних частинок...

Пошук у цьому напрямі привів англійських учених **Артура Еддінгтона** (1882–1944) і **Поля Дірака** до виявлення дивного 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.

Ось перелік тих загадкових співвідношень, які в цілому виконуються у випадку замкненого Всесвіту.

1. Співвідношення між кулонівською і гравітаційною силами взаємодії електрона і протона. Перша з них  $F_e = e^2/r^2$ , де  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE – величина елементарного заряду, друга –  $F_g = Gm_p m_e / r^2$ , тут  $G = 6,68 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г/с<sup>2</sup> – стала тяжіння,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-24}$  г – маса протона,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$  г – маса електрона. Відношення цих сил

$$K_1 = F_e / F_g = e^2 / (Gm_p m_e) \gg 0,23 \cdot 10^{40}. \quad (7.11)$$

2. Співвідношення між радіусом кривини Всесвіту  $R \gg c/H$  і так званим класичним радіусом електрона  $r_e = e^2 / (m_e c^2) \gg 2,8 \cdot 10^{-13}$  см. Тут при  $H \gg 70$  км/с/Мпк =  $1,94 \cdot 10^{-18}$  с<sup>-1</sup> маємо  $t_H = 1/H = 4,4 \cdot 10^{17}$  с і  $R = ct_H \gg 1,7 \cdot 10^{28}$  см, так що

$$K_2 = R/r_e = ct_H / r_e \gg 6,5 \cdot 10^{40}. \quad (7.12)$$

3. Співвідношення між середньою густиною речовини електрона  $r_e = m_e / (4/3\pi r_e^3)$  і середньою густиною речовини у Всесвіті  $r \gg 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>:

$$K_3 = r_e / r \gg 10^{39}. \quad (7.13)$$

4. Число нуклонів у Всесвіті, точніше, в замкненій сфері радіусом  $R \gg ct_H$

$$K_4 = 2\pi^2 R^3 r / m_p \gg (0,9 \cdot 10^{40})^2. \quad (7.15)$$

Таких безрозмірних великих чисел є ще декілька. І тут передовсім доречно пригадати, що комбінуванням трьох фундаментальних фізичних сталих – швидкості світла  $c$ , сталої гравітації  $G$  і сталої Планка  $h = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – Планк отримав деякі («планківські») одиниці довжини  $l_{Pl}$ , часу  $t_{Pl}$ , маси  $m_{Pl}$  і густини  $r_{Pl}$ , причому

$$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \gg 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см},$$

$$t_{\text{Pl}} = l_{\text{Pl}}/c = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \gg 5,3 \cdot 10^{-44} \text{ с},$$

(7.14)

$$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} \gg 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г},$$

$$\rho_{\text{Pl}} \gg m_{\text{Pl}} l_{\text{Pl}}^{-3} = \frac{c^5}{G^2 \hbar} \gg 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3,$$

Отже маємо ще й такі «великі числа»:

$$K_5 = (r_e/l_{\text{Pl}})^2 \gg 31 \cdot 10^{40}, \quad (7.15)$$

$$K_6 = m_{\text{Pl}}^2/(m_e m_p) = 31,8 \cdot 10^{40} \quad (7.16)$$

Якщо  $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ с}$  – маса «середньої» зорі, то отримуємо також число

$$K_7 = M/m_{\text{Pl}} \gg 0,01 \cdot 10^{40} \quad (7.17)$$

Співвідношення (7.11) між радіусом кривини Всесвіту і класичним радіусом електрона зпробували прочитати й інакше. Бо ж величина  $t \gg 10^{23} \text{ с}$  є певною «атомною» одиницею часу, яку іноді звать «темпом» або «хрономом». Отже, замість (7.11) буде:

$$K_2 = t_{\text{H}}/t \gg 6,6 \cdot 10^{40}. \quad (7.18)$$

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 нашої думки, 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 пропорційно  $t$ . Так **П.Дірак** дійшов висновку, що не всі фізичні сталі зберігають одне і те саме значення у процесі розширення Всесвіту. Зокре-

ма, оскільки праві сторони співвідношень (7.10) і (7.11) рівні (з точністю до певного числового множника), то в кожен момент часу мали б бути рівними і їхні ліві частини, тобто

$$\frac{e^2}{Gm_e m_p} = \frac{t_H}{e^2 / (m_e c^3)} \quad (7.21)$$

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

$$\frac{1}{G} \left| \frac{dG}{dt} \right| \gg -3 \cdot 10^{-11} / \text{рік} \quad (7.22)$$

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 ( $Da \gg 5$  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  $300^\circ \text{C}$ , 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  $t_*$   $\gg 10^6$  років (що становить  $3 \cdot 10^{36}$  темпнів). 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

$$K_1^* = e^2 / (Gm_p^2) \gg 10^{36} \quad (7.23)$$

Співвідношення радіуса кривини замкненого Всесвіту на момент  $t$ , і класичного радіуса електрона дає

$$K_2^* = ct_e / r_e \gg 10^{36} \quad (7.24)$$

Тут уже немає потреби говорити про зміну з часом цих сталих. Проте коли ті співвідношення й відображають якийсь глибокий зв'язок між гравітацією, квантовою механікою і теорією елементарних частинок, то цей зв'язок поки що прихований...

У 1973 р. **П.Дірак** висловив гіпотезу, за якою кожне велике число  $L = (10^{40})^n$  змінюється з часом за законом  $L \sim t^n$ . Учений дійшов висновку, що тут можна говорити про модель статичного світу, в якому стала гравітації зменшувалася б як  $G \sim t^{-1}$ , а число нуклонів у Всесвіті зростало б за законом  $N \sim t^2$ . Творення нових частинок, за П.Діраком, мало б настати внаслідок специфічного розпаду вакууму. При цьому є дві можливості: воно відбувається рівномірно у всьому просторі («адитивне творення») або ж поруч з великими масами («мультиплікативне творення»). В останньому випадку швидкість появи нових частинок мала б бути пропорційна кількості вже наявної маси. Але гіпотеза про змінність сталої  $G$  суперечить загальній теорії відносності. І щоб узгодити ці дві концепції, П.Дірак висловив припущення, за яким властивості простору – часу описуються двома різними формами інтервалу  $ds$ . Один з них – ейнштейнівський  $ds_E$  – мав би пов'язуватися з рівняннями теорії відносності. Локальні ж визначення довжин і часу мали б стосуватися процесів мікросвіту та описуватися атомною метрикою  $ds_A$ . При такому підході стала гравітації  $G$  змінюється лише в атомних одиницях, тоді як в ейнштейнівських вона залишається сталою. Тут виникає зв'язок  $ds_E = t ds_A$  – за адитивного і  $ds_E = (1/t) \cdot ds_A$  – за мультиплікативного творення речовини. У другому випадку в ейнштейнівських одиницях маса протона зменшується з часом як  $m_p \sim t^{-2}$ , а оскільки число частинок зростає, то при  $H \sim t^2$

загальна маса речовини у Всесвіті залишається сталою. Тут також змінюються величина електричного заряду і стала Планка ( $e^2 \sim t^{-3}$ ,  $\hbar \sim t^{-3}$ ). Проте в атомних одиницях усі сталі, крім  $G$ , зберігають своє значення. Цікаво, що в атомних одиницях «великий вибух» наявний при  $t = 0$ , тоді як в ейнштейнівських відповідає моменту  $t_e = -\infty$ . Червоне зміщення у спектрах галактик мало б бути усього лиш геометричним ефектом, пов'язаним з різним темпом перебігу атомного та ейнштейнівського часу: світло далеких галактик, випромінене тоді, коли атомні годинники йшли повільніше, ніж сьогодні.

Тоді ж з'явилося декілька публікацій, де висловлювалися припущення про зміну величини електричного заряду ( $e^2 \sim t$ ), чи одночасно величин  $e$ ,  $\hbar$ , і  $G$  ( $e^2 \sim t$ ,  $\hbar \sim t$ ,  $G \sim t$ ). Проте ряд міркувань, зокрема встановлення віку гірських порід і метеоритних зразків за розпадом ізотопів  $U^{238}$  і  $K^{40}$ , швидкості яких істотно різняться своєю чутливістю до зміни величини заряду, привів до висновків, що електрон не «старіє», а величина його заряду стала. Усі ті й інші варіанти вимагають подальшого аналізу. Про це ще буде мова у заключному, 8-му розділі.

### **Розширення ... з прискоренням**

Упродовж кількох десятків років чи не більшість астрономів «плекала надію», що аналіз даних про червоне зміщення ліній у спектрах найдальших галактик виявить певне сповільнення руху. Це означало б, що в тих найдальших закутках Всесвіту верх бере гравітація. А отже, що Всесвіт хоча й неозорий, але все ж «більш-менш збагнений». Спостережні дані, отримані двома незалежними групами дослідників, вказують на протилежне.

Однак тут передусім доцільно зупинитися на доказах того, що Всесвіт взагалі розширюється! Бо, як не дивно, хоча співвідношення Габбла відоме з 1929 р., то дехто цей факт заперечує, а наявне червоне зміщення намагається пояснити іншими ефектами, як ось зміною з часом швидкості світла. Що проблема ця заслуговує серйозної уваги, підкреслив А.Сендідж у 1997 р. Доповіді 11-ти учасників конференції, проведеної тоді на Канарських островах, були присвячені найактуальнішим питанням сучасної астрономії і опубліковані під назвою «Всесвіт у цілому» (Кембрідж, 1997 р.).

Доповідь А.Сендіджа «Астрономічні задачі на наступні 30 років» включала пункт 15-й (усіх пунктів було 23): «Реальність розширення

Всесвіту» як потребу подати прямі, однозначно пояснювані докази реальності космологічного розширення. Перший із трьох запропонованих А.Сендіджом тестів (він і здійснив його перевірку майже зразу) полягав у *вимірюванні поверхневих яскравостей* далеких об'єктів, конкретно – *еліптичних галактик*. Було знайдено, що вона зменшується залежно від червоного зміщення  $z$  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, проведено у 2001 р. 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 8,2К, і  $\gg 11$ К при  $z = 3$ . Ефект виявляють детально досліджуючи 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. Детальніше про них описано в статті **В.П.Решетникова** на сайті Астрономічного інституту при СПбДУ.

Оскільки різні  $z$  відповідають різним моментам еволюції Всесвіту, то значення  $z = 2$  стосується віку  $1/4$  від сучасного,  $z = 3$  – близько  $1/8$ .

«Для повноти картини» можна згадати, що ХХІ ст. астрономи розпочали, досліджуючи близько 20 об'єктів на відстанях  $z = 5$ , для одного навіть  $z \gg 6,56$ .

У травні 1998 р. відбулася ще одна знаменна конференція, де було розглянуто особливості розширення Всесвіту. «Більшістю голосів – 40 із 60» стверджено: почавши від червоних зміщень  $z = 0,5$ , це розширення є прискореним! Цей висновок отримав навіть назву революції в космології, але він не менш важливий і для фізиків.

Дві групи дослідників (керівники відповідно **С.Перлмуттер** та **А.Рісс**) незалежно провели співставлення отриманих ними видимих зоряних величин і червоних зміщень Наднових типу Ia у декількох десятках випадків. 1 – постало питання: що є причиною отого «додаткового розтягування» простору?

Як було зазначено у розд. 6, А.Ейнштейн увів у свої рівняння космологічну сталу  $L$ , смисл якої, при  $L > 0$ , у створенні ефекту відштовхування (початковий задум очевидний: зрівноважити силу тяжіння і збудувати модель статичного Всесвіту). Хоча А.Ейнштейн введення її у рівняння «визнав найбільшою помилкою свого життя», вона, якщо починати аналіз від відомої тотожності Б'янкі, з'являється в теорії на правах сталої інтегрування. А отже рівність  $L = 0$  вимагала доведення!

Сьогодні космологічну сталу розглядають як «математичне відображений наявності у просторах Всесвіту певної «темної» енергії, розподіленої рівномірно і незмінної з часом. Фактично це мав би бути вияв нової фізичної сутності, як ось «нульові квантові коливання густини енергії вакууму».

Однак поруч із сталою  $L$ , як окремих фактор, розглядають *квінтесенцію* – динамічне квантове поле, яке також має здатність гравітаційно відштовхувати. Річ у тім, що для пояснення теперішньої кількості темної енергії, кажучи словами **Дж. Острика** і **П.Стейнхардта** («Світ науки», № 2, 2001), «значення космологічної сталої треба тонко налаштувати в момент створення Всесвіту на певне значення... А квінтесенція – навпаки: взаємодіє з речовиною й еволюціонує з часом, а отже, здатна природно налаштуватися на досягнення теперішнього значення».

Є, однак, і така гіпотеза, висловлена **Г.Двалі** (США): сьогодні фізики для з'ясування тонкощів природи елементарних частинок використовують уявлення про 11-вимірний простір-час, і носій гравітаційної взаємодії – гравітон – може просковзувати «у ті додаткові просторові виміри», послаблюючи гравітаційні зв'язки у світі нашому...

### Шкала ядерної хронології

Оцінку віку розширеного Всесвіту  $t_0$  можна отримати, виходячи із співвідношення Габбла, якщо стала  $H$  відома. Якщо  $r \gg r_{кр}$  ( $w=1$ ), то

$$t_0 \geq \frac{2}{3} t_H \text{ і при } H = 70 \text{ км/с/Мпк знаходимо } t_0 \gg 14 \text{ млрд. років.}$$

З іншого боку, з деякого моменту у Всесвіті починаються процеси зоре утворення і зразу ж у надрах зір відбуваються реакції синтезу ядер все складніших хімічних елементів. Очевидно, спочатку це були масивні до галактичні 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 випливають 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:

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

2)  **$\alpha$ -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  $T_c \approx 5 \cdot 10^8 \text{ K}$  в надрах зір з масою  $M = 1,5M_{\odot}$ .

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  $T_c \gg 3 \cdot 10^9 \text{ K}$  безпосередньо перед спалахом зорі як наднової.

4)  **$s$ -процес** (від англійського **slow** – повільний) – процес повільного захоплення нейтронів у ядрах зір із  $M \approx 1,5M_{\odot}$  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 ( $^{209}\text{Bi}$ ). Джерелами вільних нейтронів є реакції типу  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$   
 $\textcircled{R} \text{ } ^{23}\text{Mg} + \text{n}, ^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \textcircled{R} \text{ } ^{31}\text{S} + \text{n}$ .

5) *г-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  $A \gg 270$  (зокрема урану і торію).

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

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

7) *Х-процес* – утворення літію, берилію і бору внаслідок процесів зколювання, 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.

8) *п-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 ізотопи урану і торію, продуктом розпаду яких є свинець:  $^{238}\text{U} \textcircled{R} \text{ } ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$  ( $T_{1/2} = 4,5$  млрд. років),  $^{235}\text{U} \textcircled{R} \text{ } ^{207}\text{Pb} + 7^4\text{He}$  (0.7 млрд. років),  $^{232}\text{Th} \textcircled{R} \text{ } ^{208}\text{Pb} + 6^4\text{He}$  (14 млрд. років).

Зіставлення вмісту ізоотопів урану, торію і свинцю в метеоритах привело до висновку, що вік планетної системи  $\alpha_n \gg 4,55$  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 (Рис. 7.1.). 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...).

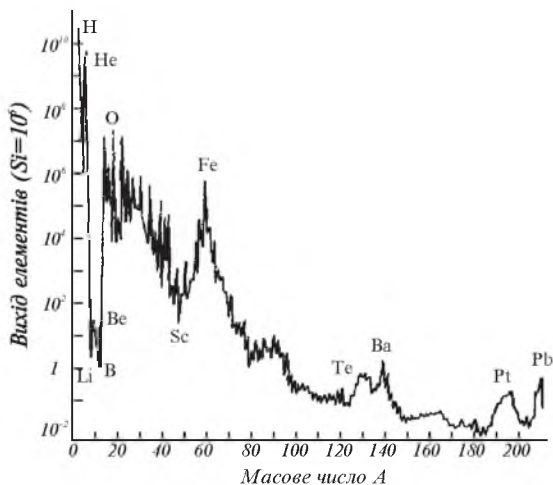


Рис. 7.1. Розповсюдження хімічних елементів у Сонячній системі

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 об'єднаних ядер (збіднених нейтронами ядер важких елементів). І все ж збіг віку Всесвіту за даними космохронології і теорії його розширення виявляється все-ж непоганим.

## 8. ВСЕСВІТ: СЦЕНАРІЙ ЕВОЛЮЦІЇ

### Посталий «з піни»

За одною старогрецькою легендою богиня любові і краси Афродита (в римській міфології вона ототожнена з Венерою) народилася з морської піни. Сьогодні ця асоціація виникає при розгляді питання про «найранніший» етап розвитку Всесвіту – одного з найважливіх у сучасній науці. 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. Кажуть ще й інакше: він народився з вакууму...

З дивними властивостями фізичного вакууму ми зіткнулися при обговоренні термодинаміки чорних дір. Вже загальноновизнано, що вакуум, по суті, є «найфундаментальнішим із відомих нам типів фізичної реальності». Він «служить 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 ніби одержують свої реальні маси.

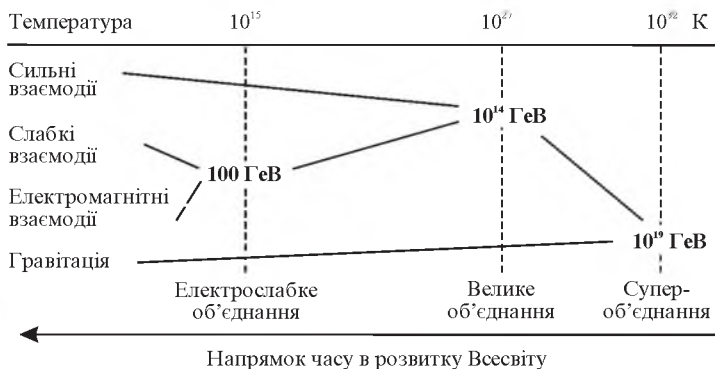
Тепер звернемо увагу на таке. З теорії «стандартного» Всесвіту, який розширюється, випливає, що чим ближче «до початку», тим вища його температура. Цей результат одержаний астрономами. Зі свого боку, фізики, збільшуючи енергію (тобто «температуру») частинок, які стикаються в прискорювачах, зробили дивні 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 спин  $s = 1$ ). Сам акт розпаду нейтрона мав би відбуватися за такою 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. І – «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. 8.1).

Проте, вже «достеменно відомо», що в реалізації Великого об'єднання важливу роль грають надважкі частинки –  $X$  і  $Y$ -бозон (і античастинки  $\bar{X}$  і  $\bar{Y}$ ) з масою порядку  $10^{14}$  ГеВ і дробовим електричним зарядом ( $\pm 4/3 e$ , де  $e$  – заряд електрона).



Мал. 8.1. Схема об'єднання взаємодій

Об'єднання всіх чотирьох взаємодій проводиться з використанням ідей *суперсиметрії*. Важливі результати в розробці теорії явищ, що від-

буваються при надвисоких температурах, типових для ранніх стадій еволюції Всесвіту, і впливаючих із цієї теорії космологічних досліджень одержали Е.Б.Глінер, Л.Е.Гуревич, Я.Б.Зельдович, Д.А.Киржніц, В.А.Кузьмін, А.Д.Лінде, Л.Б.Окунь, А.А.Старобінський (СРСР). Згадані тут проблеми висвітлені в книзі **І.Д.Новикова** «Як вибухнув Всесвіт» (М.: Наука, 1988).

Відсилаючи читача за роз'ясненнями до згаданої книги, написаної провідним фахівцем у цій царині науки, зупинимось тут лише на найважливіших епізодах «виходу з піни» нашого Всесвіту. До речі, ідею про те, що він «виник як квантова флуктуація структури простору-часу», почавши практично «з нічого», висловив у 1973 р. український учений **П.І.Фомін** (з іншого боку, про «народження» Всесвіту з вакууму говорив і **Г.Наан** говорив у 1965 р.). Отже, якщо у 70-х роках ХХ ст. процеси у розширеному Всесвіті розглядалися, починаючи від моменту  $10^{-6}$  с, то з початком 80-х його історія вже неначе «досить добре відома» з моменту часу  $t = t_{pl} = 10^{43}$  с і відповідних йому інших планківських величин – просторового масштабу  $l_{pl} = 10^{-33}$  см і густини  $r_{pl} = 10^{94}$  г/см<sup>3</sup>. 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).

2) У вакуумі стану, тобто в «резервуарі» віртуальних частинок і полів, прихована найбільша потенціальна енергія, густина якої пов'язана з густиною вакууму  $r_B$  співвідношенням  $e_B = c^2 \cdot r_B$  причому в деяких варіантах теорії приймалося  $r_B = 10^{74}$  г/см<sup>3</sup>, в інших  $r_B = r_{pl} = 10^{94}$  г/см<sup>3</sup>, так що густина енергії цього псевдовакууму відповідно рівна  $10^{88}$  Дж/см<sup>3</sup> або  $10^{108}$  Дж/см<sup>3</sup>.

3) Завдяки роздуванню Всесвіту (причина цього розглядається нижче) густина звичайної речовини і температура стрімко зменшуються, тоді як густина вакууму до певного часу залишається незмінною.

4) Потенціальна енергія взаємодії частинок  $E_H$  «регулюється» особливим *скалярним полем Хіггса* (а точніше, полями Хіггса, введеними в квантову теорію поля в 1964 р. англійським фізиком П. Хіггсом). Саме поля Хіггса, взаємодіючи з елементарними частинками, породжують їхню масу, яка тим більша, чим сильніша взаємодія поля з частинкою. Кажуть, що частинки одержують масу, «проковтуючи» *бозони Хіггса* –

«згустки» полів Хіггса. Цей механізм порівнюють із поглинанням чорнила промокаткою, де шматочки паперу – це окремі частинки, а чорнило – енергія поля Хіггса. Залежність же потенційної енергії взаємодії частинок від величини поля  $j$  (скажемо конкретніше – від «напруженості»

поля  $j$ ) із зменшенням температури змінюється складним чином, як це показано на рис. 8.3. Тим самим скалярні поля Хіггса виконують роль «спускових гачків», стимулюючих у певні моменти порушення симетрії фізичних станів, тобто відщеплювання спочатку сильної, а потім слабкої взаємодій.

На початковому етапі роздування Всесвіту (при  $T > T_{BO}$ ) «напруженість» поля Хіггса  $j = 0$ , так що стійкому стану відповідає високий рівень потенціальної енергії, зосередженої у вакуумі. Далі при зменшенні температури до  $T \sim T_{BO} \sim 10^{30}$  К стійкість системи порушується, її властивості змінюються, з'являється бозе-конденсат Хіггса (реалізується *фазовий перехід*), набувають маси X- та Y-бозони і сильна взаємодія відщеплюється.

Як тільки температура стану зменшиться до величини  $T < T_{BO}$ , поле Хіггса еволюціонує таким чином, що при деякому його значенні  $j_0$  потенціальна енергія взаємодії частинок має якнайменше, близьке до нуля значення, відповідне справжньому вакууму. Перехід системи до цього нового стану супроводжуєть-

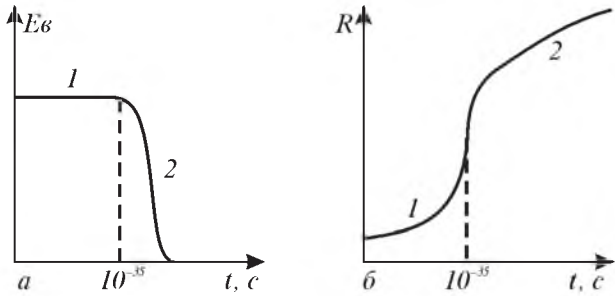


Рис. 8.2. Зміна густини енергії вакууму (а) і масштабного фактора (б) з часом: 1-модель де Сіттера (інфляційний Всесвіт); 2-розширний Всесвіт

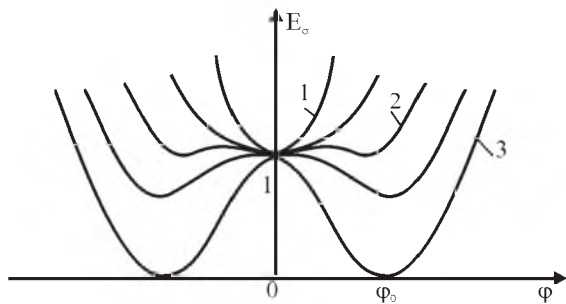


Рис. 8.3. Залежність потенціальної енергії взаємодії частинок від величини поля  $j$  із зменшенням температури: 1 –  $T \gg T_{BO}$ ; 2 –  $T \sim T_{BO}$ ; 3 –  $T \ll T_{BO}$

ся народженням величезного числа частинок і античастинок (їх переходом з віртуального в актуальний стан), а внаслідок їх анігіляції і розпадів – виділенням величезної кількості енергії. Це, у свою чергу, визначає складний характер зміни температури у Всесвіті, що народився (вище у тому ж значенні кілька разів використано суто фізичний термін «система»).

Справді, народження частинок із вакууму, що відбувається упродовж фази роздування, і пов'язане з цим звільнення енергії майже повністю компенсує сам ефект роздування, унаслідок якого температура повинна була б різко зменшуватися. Роздування продовжується від  $t = 10^{-43}$  с до  $t = 10^{35}$  с. І у всьому цьому інтервалі часу температура системи виявляється майже однакою. До моменту переходу Всесвіту на режим розширення вона якраз фантастично висока – порядку  $10^{27}$  К: на ранньому етапі свого розвитку тепер уже в рамках стандартної моделі Всесвіт був справді дуже гарячим.

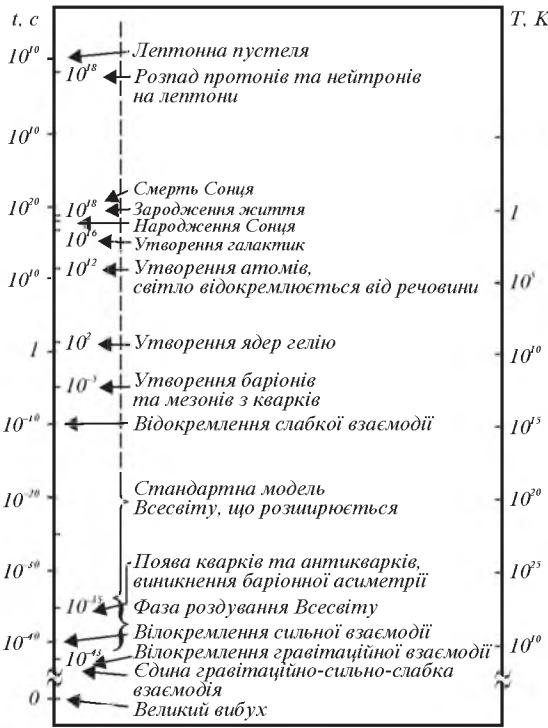


Рис. 8.4. Розвиток процесів у Всесвіті після його народження

Другий раз поле Хіггса діє як «спусковий гачок», приводячи до порушення симетрії при  $t=10^{-10}$  с (що відповідає температурі  $T = 10^{15}$  К), вже після виходу Всесвіту на режим розширення. Тепер відбувається розділення слабкої і електромагнітної взаємодій. І знову, «проковтуючи бозони Хіггса», тепер уже лептони і кварки набувають своїх мас.

Калейдоскоп процесів, що відбувалися у Всесвіті з моменту його «виходу з піни» представлений на рис. 8.4, докладніше вони обговорені нижче. Відзначимо, що багато що зі сказаного тут – усього лише «вкрай полегшена схема». Трудно-

щів перед дослідниками тут ще дуже багато. Чого коштує, наприклад, такий вислів **М.Вельтмана**: «...будується яка-небудь витончена теорія, потім в неї включається поле Хігса і вся будова руйнується»...

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, в менших масштабах воно розпадається на кванти єдиного простору-часу».

Як образно висловився **І.Д.Новиков**, «річка часу дробиться тут на неподільні краплі»... Мовиться також, що в масштабах  $10^{-43}$  с в часі і  $10^{-33}$  см в просторі існує своєрідна «піна» квантів простору-часу або, інакше, – чорних міні-дір. Як показав **С.Хокінг**, кожний згаданий квант простору-часу спонтанно перетвориться на чорну діру з масою порядку  $10^{19}$  ГеВ, яка тут же, за  $10^{-43}$  с випарується, утворюючи знову такий же квант простору-часу. До того ж сам простір, як це вже згадано, у цих масштабах має розмірність більше трьох...

## Роздувний Всесвіт

Каверзне питання «чому Всесвіт розширюється» було одним з багатьох, що «постали на повний зріст» перед природодослідниками вже наприкінці 20-х років ХХ ст. І теорія «Великого вибуху», тобто теорія гарячого Всесвіту відповісти на нього не могла. Як відзначав **Я.Б.Зельдович**, – «в цю теорію розширення закладене від початку. Як висловлюються теоретики, закладено «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» (Природа, 1984. – № 2. – с. 66).

Як виглядає розширення, яке спостерігається зараз, – усього лише «відблиск» тих могутніх процесів, що їх пережив наш Всесвіт у минулому і одним з проявів яких було його роздування. Інакше кажучи, простому розширенню передувало «роздування Всесвіту», або «інфляційна фаза» (цей термін узятий з не дуже веселої асоціації: коли річна швидкість інфляції незмінна, то ціни зростають за експоненціальним законом). Зміна масштабного фактора «у той час» описувалася моделлю **де Сігтера** (7.38). Все це було обумовлене особливостями фазових переходів, що відбувалися «у фальшивому вакуумі», властивостями цього специфічного стану матерії, вивчення яких лише починається...

Одна з найцікавіших властивостей вакууму – буквально «дивовижний» зв'язок між тиском  $p_B$  і густиною енергії  $e_B = c^2 \rho_B$ . У звичному середовищі обидві ці величини мають однаковий, додатній знак. Наприклад, тиск фотонного газу  $p = (1/3) \epsilon$ . Але вакуум – середовище незвичне. У ньому тиск від'ємний, він визначається через густину енергії  $e_B$  співвідношенням

$$p_B = -\epsilon_B = -c^2 \rho_B. \quad (8.1)$$

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:  $e_B = \text{const}$ . 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  $E = eV$ , то з (8.1) випливає, що  $dE = -pdV$ . Тому при  $p = -\epsilon$  маємо  $d(eV) = \epsilon dV$  або  $de = 0$ , тобто  $e = \text{const}$ .

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.

Про те, як цей новий погляд на початкову стадію еволюції Всесвіту «одержував права громадянства», детально описано у вже згадуваній книзі І.Д.Новикова «Як вибухнув Всесвіт». Зіставляючи приведені в згаданих авторів публікаціях оцінки масштабів роздування (відповідно в  $10^{50}$ ,  $10^{1000000}$  і  $10^{4 \cdot 10^8}$  разів, читач не повинен був розчаровуватися або відчувати недовіру до самої моделі. Так «виявляє себе» невизначеність у виборі одного з параметрів задачі – густини вакууму. Важливе те, що ця модель без внутрішніх суперечностей пояснювала динаміку процесу.

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  $\epsilon$ , виділимо проб-

ну частинку  $m$ . Під дією маси хмари  $M = (4/3)\rho r^3$  частинка набуває прискорення

$$a = -\frac{GM}{r^2} = -\frac{4}{3}\pi G\rho \cdot r, \quad (8.2)$$

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

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

$$a = -\frac{4}{3}\pi G\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right)r. \quad (8.3)$$

І якщо зв'язок між тиском і густиною визначається співвідношенням (8.1), то з останньої формули випливає, що

$$a = \frac{8\pi}{3}G\rho_B r = \frac{\Lambda c^2}{3}r, \quad (8.4)$$

де через  $L$  позначена величина

$$\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}\rho_B. \quad (8.5)$$

Як видно, у вакуумі прискорення  $a$  має додатній знак і отже ним описується гравітаційне відштовхування, величина якого пропорцій-

на відстані. І оскільки  $a = \frac{d^2r}{dt^2}$ , то із співвідношення (8.4) знаходимо формулу, якою визначається зміна відстаней між частинками (а не тільки віддалення пробної частинки від маси  $M$ !) з часом

$$r = r_0 e^{\sqrt{\Lambda/3}ct}, \quad (8.6)$$

тобто воно справді зростає за експоненціальним законом.

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

$$v = \sqrt{\Lambda/3}cr_0 e^{\sqrt{\Lambda/3}ct} = \sqrt{\Lambda/3}c. \quad (8.7)$$

Зіставляючи це співвідношення із законом Габбла (7.8), приходимо до висновку, що коефіцієнтом пропорційності у зв'язку швидкості  $v$  з відстанню  $r$  у формулі (8.6) є стала Габбла

$$H = \sqrt{\Lambda/3}c. \quad (8.8)$$

Проведемо деякі числові оцінки. Приймемо густину вакууму рівною  $\rho_B = 10^{94}$  г/см<sup>3</sup>. Тоді з формули (8.4) знаходимо, що  $L = 2 \cdot 10^{67}$  см<sup>2</sup>, а співвідношення (8.6) конкретизується так:  $r = r_0 e^{7.5 \cdot 10^{13} t}$ . Звідси випливає, що за час від  $t = 10^{-43}$  с до  $t = 10^{-35}$  с відстань у Всесвіті збільшиться в  $e^{7.5 \cdot 10^{43} \cdot 10^{-35}} \approx e^{7.5 \cdot 10^8} \approx 10^{3 \cdot 10^8}$  раз (в книзі І.Д.Новикова прийнято  $t = 3 \cdot 10^{-35}$  с, тому є «невелика» відмінність у коефіцієнті показника експоненти). Зрозуміло, що зобразити ці зміни масштабу графічно неможливо.

Отже, за проміжок часу  $\Delta t = 10^{-35}$  с масштаби Всесвіту збільшилися приблизно в  $10^{10^8}$  раз, тобто відстані між двома довільно взятими частинками на кінець роздування вже рівні  $10^{-33} \cdot 10^{10^8}$  см  $\gg 10^{10^8}$  см (такі закони операцій з гігантськими числами типу  $10^{10^8} \dots$ ). У свою чергу, «середня швидкість» розльоту частинок  $v \gg 10^{10^8}$  см /  $10^{-35}$  с  $\gg 10^{10^8}$  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, нарешті, тут неминуче виникає питання про те, як в цьому фантастичному роздувному Всесвіті, «йдуть справи із законами збереження енергії». На нього ми відповімо словами **Я.Б.Зельдовича**: «Якщо читач запитася, що (або хто) врешті-решт виконує роботу, я відповідалиму, ґрунтуючись на точці зору глобального збереження енергії усього Всесвіту. Візьмемо закритий Всесвіт: його повна енергія рівна нулю і залишається нульовою незалежно від радіуса 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)...

### Асиметричний і майже плоский

А ось як саме існування фази роздування усуває проблеми, які у Всесвіті, що «просто розширюється», здавалися нерозв'язними. Але спочатку про ті, які виникли при розробці теорії роздування: про проблему доменних стінок і проблему магнітних монополів.

Нагадаємо, що *домени* (від франц. domaine – володіння, область, сфера) – це ділянки хімічно однорідного середовища, що відрізняються електричними, магнітними або пружними властивостями. Прикладом можуть бути феромагнітні домени – зони самовільної намагніче-



ності у феромагнетику розмірами  $< 0,01$  см або ж домени, які виникають внаслідок затвердіння рідини, її перетворення в кристалічний стан, коли в різних місцях виникають кристали з різною орієнтацією осей кристалічних ґраток.

Аналогічно Всесвіт, що роздувається, у ході фазових переходів також розбивається на безліч областей – доменів з різними властивостями. При цьому неминуче повинні були виникати так звані доменні стінки, в яких була б сконцентрована величезна густина енергії. Наявність такої стінки в спостережуваному Всесвіті привело б до неприпустимих космологічних наслідків.

Проблема «усувається» за допомогою такого міркування: внаслідок роздування Всесвіту кожен із доменів набуває розмірів, що на багато порядків перевищують розмір тієї частини Всесвіту, яка доступна для спостережень у наш час. Інакше кажучи; ми перебуваємо всередині одного з доменів, стінки якого віддалені від нас на багато сотень мільярдів світлових років. А за ними – інші, можливо, «дещо інакші» всесвіти...

Як відомо, закони фізики допускають існування частинок з одним магнітним полюсом – *магнітних монополів* (таку гіпотезу висловив **П.Дірак** ще в 1931 р.). Ці частинки буквально «необхідні» для пояснення спостережуваного в природі факту квантування електричного заряду. В сучасній фізиці елементарних частинок монополі і справді «з'являється» як один із представників «зоопарку частинок», причому його маса мала б сягати  $10^{17}$  мас протона ( $\sim 10^{-8}$  г). При цьому в звичному розширеному Всесвіті, густина цих надважких частинок була б неприпустимо високою. Абсолютно інша картина складається у Всесвіті, який роздувається. Тут монополі народжуються лише на найранніших стадіях роздування, коли температура надзвичайно висока ( $T \gg 10^{26}$  К), вони є, за теорією Великого об'єднання, «вкрапленнями старого вакууму в новий».

Кажучи словами **І.Д.Новикова**, «істотна відмінність монополя від справді елементарних частинок полягає в тому, що він має складну внутрішню структуру в просторі. Значна частина його маси зосереджена в дуже маленькому об'ємі, діаметром усього  $10^{-28}$  см ... Усередині цього крихітного об'єму сконцентрована велика енергія, там панує Велике об'єднання усіх сил природи (окрім гравітації). Навкруги цього ядра є шар, де багато Х- і Y-бозонів. В зовнішніх, більш розріджених шарах, є W, W і Z<sup>0</sup>-бозони. Зовнішні межі монополя мають радіус близько  $10^{-15}$  см»...

Проблема знову-таки «знімається» тим, що внаслідок швидкого збільшення масштабів Всесвіту монополі «рознесені» на надзвичайно великі відстані один від одного. Тепер їх «можна б зустріти» лише на межах доменів, тобто монополі сьогодні дуже віддалені від нас.

Цікавим дослідженням деяких моделей фазових переходів у дуже ранню епоху розвитку Всесвіту є також утворення *космічних струн* – тонких ниток (завтовшки порядку декількох радіусів атома водню), в яких сконцентрована дуже велика маса (близько 10 т на один сантиметр довжини, в інших моделях – в десятки і сотні разів більше). Передбачається, що їх можна було б виявити унаслідок акреції на них прихованої маси. Існує гіпотеза, за якою петлі з надпровідних космічних струн могли б бути джерелом енергії квазарів і спостережуваних у позагалактичних джерелах релятивістських викидів. Перетинаючись самі з собою в ході розширення Всесвіту, космічні струни могли б утворювати петлі, що стають пізніше «природними приманками» для утворення галактик і скупчень галактик.

Розмову про труднощі стандартної моделі почнемо з такого твердження: «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»...

Так неодноразово висловлювався **Я.Б.Зельдович**, – маючи на увазі чудове поєднання теорії гарячого Всесвіту, що розширюється, зі спостереженнями після відкриття реліктового радіовипромінювання і зіставлення обчислених та вимірених у ньому гелію і дейтерію (див., наприклад, ж. «Природа», 1983. – № 9, – с. 2).

Класична теорія розширеного Всесвіту зіткнулася із рядом проблем. Їх якраз і вдалося усунути за допомогою *моделі роздутого Всесвіту*. Ось найважливіші з них.

1. **Проблема ентропії**: чому у Всесвіті число фотонів реліктового радіовипромінювання в одиниці об'єму  $N_\gamma$  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 воедино зв'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 напрямку? 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. Адже кажучи словами **І.Д.Новикова**: «якщо сьогодні густина матерії відрізняється від критичної не більше, ніж у декілька разів, то в минулому тяжіння і швидкість повинні були бути збалансовані з ювелірною точністю. Можна підрахувати, що через секунду після початку розширення баланс міг порушуватися не більше, ніж на одну десятитисячну мільярдної частки процента! Звідки узялося ювелірне балансування?»

4. **Проблема однорідності і первинних флуктуацій** (утворення галактик): чому в дуже великих масштабах (аж до відстаней близько 5000 Мпк, на яких знаходяться найбільш віддалені з відомих об'єктів) Всесвіт такий однорідний? Чому в малих масштабах у ньому спостерігаються порожнини («каверни») – області 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 те, яким виявився розв'язок останньої зі згаданих тут проблем, вже сказано вище: Всесвіт виник внаслідок квантового стрибка з «просторово-часової піни». Щодо інших можна сказати таке:

1. Проблема ентропії і зарядної асиметрії вирішується в теорії Великого об'єднання. Як згадано, при енергіях порядку  $10^{16}$  GeV 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 децю 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  $+1$

( $X \rightarrow q_i + e^+$ ). 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 украй важливий висновок: в природі повинні відбуватися процеси розпаду протонів.

Період піврозпаду протона оцінений в  $10^{32}$  років. Якщо цей висновок теорії підтвердиться, то ... в «дуже-дуже далекому» майбутньому наш Всесвіт перетвориться на «лептонну пустелю»...

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

2. Проблема горизонту вирішується таким чином. Точки, з яких ми сьогодні приймаємо сигнали (звідки до нас приходять 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'ясується і навіть

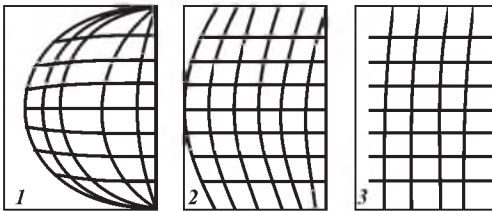


Рис. 8.5. Приклад, який пояснює евклідовість просторової геометрії у спостережуваній частині Всесвіту: при різкому збільшенні розмірів сферичного тіла геометрія його поверхні стає практично евклідовою

допускає пояснення за допомогою елементарного прикладу. Якщо в початковий момент  $t_{p1}$  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

вою (рис. 8.5). Тобто, якщо навіть у Всесвіті при  $t = t_{pl}$  густина істотно перевищувала критичну ( $\bar{W} > 1$ ), то внаслідок роздування відбувається наближення до стану  $\bar{W} \approx 1$ .

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

### «Стандартна модель» Всесвіту

Як твердив американський космолог **П.Піблс**, спектр мікрохвильового реліктового випромінювання «змушує покладати, що Всесвіт розширювався від щільного стану, бо невідомі інші природні механізми утворення такого спектра у сучасному світі». Тут приглянемо до етапів розвитку Всесвіту, уявлення про які було складено у 60-х – 70-х роках ХХ ст. після детального аналізу всіх особливостей спектра реліктового випромінювання.

Обговорення загальної картини розширення Всесвіту більшість авторів розпочинала з деякого мінімального часу  $t_{min} \approx 10^{-6}$  с, дотримуючись погляду, що за допомогою наявної фізичної теорії неможливо описати явища, які відбувалися при  $t < t_{min}$ , коли густина речовини істотно перевищувала гуστину атомного ядра. Всю подальшу історію розвитку Всесвіту прийнято поділяти на чотири стадії: адронну еру, лептонну еру, еру фотонної плазми та післярекомбінаційну еру.

1. **Адронна ера** ( $t_{min} < t < 10^{-4}$  с) – ера важких частинок і мезонів. Тут густина  $r \approx 10^{14}$  г/см<sup>3</sup> 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: різниця в кількості нуклонів і антинуклонів в одиниці об'єму становила близько  $10^{-8}$  кількості фотонів. Про це **Я.Б.Зельдович** та **І.Д.Новиков** писали так: «Той невеликий надвишок нуклонів задається як початкова умова для того, щоб після розширення плазми, її охолодження й анігіляції пар дати спостережувану сьогодні картину Всесвіту з реліктовим радіовипромінюванням».

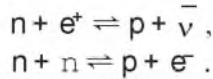
Щоправда, деякі вчені намагалися розглянути випадок цілковитої симетрії заряду, вважаючи, що у Всесвіті є строго однакова кількість

частинок («речовини») і античастинок («антиречовини»). Було розглянуто декілька моделей поділу речовини й антиречовини, зокрема, за допомогою магнітного й гравітаційного полів. Результати таких досліджень були малопереконливі. Отож згадані автори зауважують: «За сукупністю ми покладаємо, що зарядовосиметричний Всесвіт... не узгоджується зі спостереженнями й має бути відкинтий».

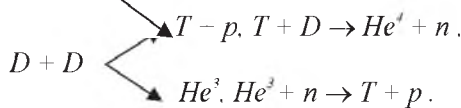
Від адронної ери й аж до нашого часу мали б залишитися реліктові кварки, якщо справді з таких «цеглинок» складаються всі відомі нам елементарні частинки. За обрахунками сьогодні на кожен мільярд звичайних частинок у Всесвіті мав би припадати один кварк. Інакше кажучи, у природі, та й у земній корі, кварки мали б траплятися частіше за атоми золота. Пошуки частинок, типовою ознакою яких мав би бути дробовий заряд ( $+2/3$  та  $-1/3$  заряду електрона), здійснено як у звичайній речовині, так і в космічних променях та на потужних прискорювачах. Зроблено висновок, що ті частинки були б виявлені, якби навіть їх було в сотні мільярдів разів менше від зазначеної кількості (тобто  $10^{-20}$  кількості нуклонів). Це дає підставу думати, що таких частинок з дробовим зарядом «у наш час» у вільному стані взагалі не існує. Однак, за одним із припущень, можуть бути (на певному етапі еволюції – при гравітаційному стискуванні) зорі, «збудовані із кварків»...

**2. Лептонна ера.** За час від  $t \gg 10^4$  с до  $t \gg 10$  с температура зменшується від  $10^{12}$  до  $5 \cdot 10^9$  К, а густина – від  $10^{14}$  до  $10^4$  г/см<sup>3</sup>. 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  $e^- + e^+ \rightarrow n + \bar{\nu}$ . Обрахунок, проте, свідчить, що в момент  $t \gg 0,2$  с взаємодія нейтрино з іншими частинками та між собою припиняється. Нейтрино «відключаються» від інших частинок. Температура нейтрино в той час сягала  $10^{10}$  К і за рахунок розширення Всесвіту зменшувалася аж до 2 К на сучасний момент. Таке розширення «світу нейтрино» відбувалося незалежно від розширення речовини. Тому ці реліктові нейтрино зберегли інформацію про перебіг процесів, які відбувалися у лептонній ері. Зокрема, вони могли б проінформувати про міру однорідності речовини на тій стадії розвитку Всесвіту. Методи вловлювання нейтрино тепер інтенсивно розробляються.

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



Проте зі зниженням температури перебіг цих процесів істотно сповільнюється. Ефективнішими стають процеси з'єднання нейтронів із протонами, за яких утворюються дейтони D:  $n + p \rightarrow D + \gamma$  і дальші 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 (розглядалися випадки від  $\bar{W} = 0,025$  до  $\bar{W} = 5$ ).

*Передбачення вмісту гелію у первинній речовині вважається тріумфом теорії гарячого Всесвіту.* Справді, світність нашої Галактики з її 100 млрд. зір становить  $10^{37}$  Вт. Покладемо, що вік Галактики становить  $10^{10}$  років і що гелій утворюється лише в надрах зір. За згаданий проміжок часу всі зорі Галактики висвітили енергію близько  $3 \cdot 10^{54}$  Дж. При утворенні одного ядра гелію виділяється енергія  $2,5 \cdot 10^{-12}$  Дж. Отже, за час існування Галактики в ній утворилося  $10^{66}$  ядер гелію. Оскільки маса одного такого ядра  $6,67 \cdot 10^{-24}$  г, то це становить  $7 \cdot 10^{42}$  г. Маса ж Галактики  $4 \cdot 10^{44}$  г, і основним компонентом тут є водень. Таким чином, до сучасного, моменту відношення He/H могло б бути  $7/400 \gg 1/57$  ( $Y \gg 0,017$ ) за масою або близько  $1/230$  за числом атомів.

Тим часом аналіз хімічного складу зоряних атмосфер і космічних променів, зіставлення розрахунків моделей зір з їх спостережуваними характеристиками показали, що на гелій припадає близько 8% атомів, на водень – 92%. Лише один атом з тисячі належить важчому хімічному елементу. Зокрема, дослідження атмосфер молодих гарячих зір у нашій Галактиці та зон іонізації водню у дев'яти найближчих галактиках привели до висновку, що вміст гелію в них становить 28% за масою ( $Y = 0,28$ ).

Теоретичний аналіз співвідношення між масою і світністю для зір головної послідовності дає  $Y = 0,32$ . Отож, можна стверджувати, що гелію в природі майже у 20 разів більше, ніж це могло б бути, якби він утворювався тільки внаслідок термоядерних реакцій у надрах зір! І що головне, спостереження дають число, яке практично збігається зі знайденим теоретично на підставі уявлень про гарячу модель Всесвіту.

Є тут, звичайно, і деякі тонкощі. На жаль, неможливо спектральними методами встановити вміст гелію в атмосфері Сонця, оскільки лінії цього хімічного елемента спостерігаються лише в спектрі хромосфери і корони, де умови надто вже специфічні. Проте від Сонця відлітають потоки речовини, де вміст гелію становить усього 20%.

Щоправда, не можна сказати, що наведені вище обрахунки цілком однозначні. Бо якби у «первісній» речовині Всесвіту існував, скажімо, значний надлишок антинейтрино, то сьогоднішній вміст гелію становив би 100% (весь водень перетворився б на гелій). І навпаки, істотний надвишок нейтрино призвів би до того, що гелію в ній взагалі не буде.

Усупереч згаданим сподіванням Гамова, елементи, важчі за гелій, у процесі розширення Всесвіту утворюватися не можуть. А ось на роль «помічника» у справі вибору моделі Всесвіту «претендує» ще один ізотоп – дейтерій. Розрахунки показують, що при всіх можливих процесах, які відбуваються у надрах зір, дейтерій незрівнянно швидше витрачається, ніж синтезується. Так ось, аналіз хімічного складу атмосфер зір показує, що ваговий вміст дейтерію тут становить 0,005%. З іншого ж боку, як свідчать обрахунки, вміст «реліктового» дейтерію у Всесвіті істотно залежить від густини речовини в ньому (від співвідношення  $\bar{W} = r/r_{кр}$ ). Якби сучасна густина речовини становила  $10^{-32}$  г/см<sup>3</sup>, то дейтерію мало б бути близько 1%, при  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup> його було б менше від  $10^{-10}$  %. Дані спостережень найлегше сумістити з теорією в припущенні, що на сучасний момент ця середня густина  $r \gg 3 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>, а це становить усього  $0,1 r_{кр}$ .

Однак існує припущення, за яким дейтерій може утворюватися під час проходження напіврелятивістських альфа-частинок крізь іонізований водень. Такі умови можуть виникати при спалахах нових і наднових зір. А через те більший або менший вміст дейтерію не мав би ніякого відношення до типу космологічної моделі нашого Всесвіту! Цей приклад є наглядною ілюстрацією труднощів, з якими стикаються вчені в намаганні побудувати модель Всесвіту.



**3. Ера фотонної плазми.** Протягом періоду від  $t \gg 10$  с до  $t, \gg 10^{13}$  с  $\gg 1$  млн. років густина зменшується від  $10^4$  до  $10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>, 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  $T \approx 3000$  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 рекомбінації 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 якогось моменту тієї стадії їй розпочалися процеси формування галактик і зір.

## **Всесвіт: проблема структуризації**

Питання про походження галактик і квазарів (оскільки ці другі є такими ж космологічними об'єктами) – одне із найскладніших в астрономії. Весь гігантський і різноманітний 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.

Зокрема, все ще немає єдиної думки про те, з чого починалося формування спостережуваних структур: чи йшов процес зверху «вниз» – спочатку надскупчення, потім скупчення, окремі галактики і зорі або ж, навпаки, «від» знизу до верху – з виникнення дрібніших тіл і їх подальшого скупчення в системи вищого порядку. 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.

До проблеми походження галактик астрономи підходили з двох взаємно протилежних точок зору. Наприклад, **В.А.Амбарцумян** вважав, що галактики утворилися унаслідок вибухів (або розпаду) певних надщільних тіл (згустків «дозоряної речовини»), які нібито існували на ранній стадії розширення Всесвіту. В рамках цієї гіпотези квазари мали б бути оголеними ядрами, початковою стадією розвитку галактик. Критики гіпотези В.А.Амбарцумяна звертали увагу на її труднощі, пов'язані з моментом обертання галактик. Зокрема, наша Галактика при масі приблизно  $2 \cdot 10^{11}$  мас Сонця має момент кількості руху близько  $2 \cdot 10^{74}$  г см<sup>2</sup>/с, що і відповідає коловій швидкості  $v \gg 250$  км/с на відстані Землі від центра Галактики ( $r \gg 25$  тисяч світлових років). Якщо ж галактика утворилася з початкового надщільного тіла радіусом навіть близько три світлових роки, то і тоді лінійна швидкість обертального руху на екваторі згаданого тіла мала б у декілька разів перевищувати швидкість світла! До того ж тут доводиться обмежуватися найзагальнішими міркуваннями, оскільки ніяких конкретних даних про властивості цієї дозоряної речовини немає.

Популярнішою залишалася «конденсаційна» точка зору, за якою галактики формувалися внаслідок стиснення (конденсації) речовини.

Цю точку зору висловив ще **Ньютон** в своєму листі **Річарду Бантлі**, ректору Трінті Коледжа в Кембріджі (1692 р.): «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».

Як вже знаємо, 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** (1877 – 1946). Він встановив *критерій гравітаційної нестійкості*: нескінченно протяжне однорідне середовище, що має густину  $\rho$  і температуру  $T$ , внаслідок випадкових збурень (скажімо, проходження звукових хвиль) під дією сили тяжіння розпадається на окремі ущільнення з розміром

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi a^2}{G\rho}} = \sqrt{\frac{\pi \gamma A T}{\mu G \rho}}. \quad (8.9)$$

Тут  $a$  – швидкість звуку,  $A = 8,3$  Дж/моль/К – газова стала,  $\rho$  – відношення питомих теплоємностей,  $m$  – молекулярна маса. Внаслідок цього утворюються фрагменти речовини з початковим об'ємом  $g^3$  і джинсовою масою

$$M_J = \frac{4}{3} \pi r_{\text{реч}}^3 \rho \quad (8.10)$$

де  $r_{\text{реч}}$  – 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.

Як виявилось, гравітаційна нестійкість у цьому випадку виявляється передусім у тому, що окремі ділянки, густина яких  $\rho'$  дещо більша за середню густину середовища  $\rho_0$ , продовжують розширюватися, проте повільніше, ніж середовище в цілому. Відповідно і густина в зоні ущільнення зменшується дещо повільніше. Проте, як і в картині Ньютона (або Джинса), первинне слабке відхилення від середньої густини середовища з часом мимовільно збільшується. І в певний момент часу сила тяжіння бере верх, «відключаючи» цей фрагмент від загального космологічного розширення. За **Є.М.Ліфшицем**, відносна величина

збурення густини змінюється пропорційно часу  $\left( \frac{\rho' - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\delta \rho}{\rho} \sim t \right)$  до

тих пір, доки враховується тиск ультрарелятивістського газу або випромінювання ( $p = (1/3) \epsilon$ ),  $\frac{\delta\rho}{\rho} \sim t^{2/3}$  при  $p = 0$ .

Розрахунок показує, що за час від одної секунди до  $t \sim 3 \cdot 10^9$  років відносна величина збурення зросте не більше, ніж у  $10^7$  разів. А це значить, що при  $t \gg 1$  с в догалактичному середовищі вже повинні були бути збурення густини з відносною величиною  $\delta\rho/\rho \gg 10^{-17}$ , що не так вже й мале. Адже якщо говорити про «звичні» теплові флуктуації в середовищі, то для них  $\delta\rho/\rho \sim 1/\sqrt{N}$ , де  $N$  – число частинок у системі. І для Галактики при  $N = 10^{68}$  частинок маємо  $\delta\rho/\rho \gg 10^{-34}$ , 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 вдалося зробити. Так, зіставляючи формули (8.9) і (7.6), знаходимо, що в епоху до рекомбінації космічної плазми, коли головною роль відігравало випромінювання, джинсова довжина зростала пропорційно часу. І оскільки швидкість звуку у фотонному газі  $a = c/\sqrt{3}$ , то

$$\lambda_J = \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} ct. \quad (8.11)$$

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  $t, \gg 100\,000$  років джинсова маса менша  $10^{15} M_\odot$  утримується гравітацією як єдине ціле, еквівалентне великому скупченню

галактик. Після рекомбінації плазми, при  $t \gg 1$  млн. років температура зменшується приблизно до 3000 К, а швидкість звуку до  $a \gg 6$  км/с. У цей момент густина  $\rho \gg 3 \cdot 10^{22}$  г/см<sup>3</sup> і  $M_j \gg 10^6 M_\odot$  (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, ніж 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 залишалось 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 найпосилішому 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 мав би зберегти «для нас» космічний мікрохвильовий фон (КМФ – 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  $\approx 10\,000\text{К}$  і настає епоха рекомбінації, «востаннє» здійснюється акт розсіювання фотонів. Відтоді то й упродовж наступних 13 млрд. років випромінювання «зберігає себе як чорнотільне», поступово охолоджуючись до сучасного значення ( $2,728 \pm 0,004\text{ К}$ ). 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  $2^\circ$ . І – масштаби  $> 2^\circ$  стосується тих збурень, які виникли якраз завдяки згаданим уже флуктуаціям скалярного поля. Масштаби ж  $< 2^\circ$  розповідають про фізичні процеси, 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).

Теоретичний аналіз спостережень КМФ (на частотах  $1 \dots 1000$  ГГц) проводять, зокрема, розкладаючи зареєстровані відносні флуктуації температури на сферичні функції і представляючи їх як суму, де типовим параметром є кутовий масштаб  $p$  ( $l$ ) тобто на сферичні гармоніки, як звук на тони,  $l$  – номер гармоніки.

Спочатку цей аналіз даних, отриманий у 1992 рр. за допомогою космічного апарата COBE (COsmic Background Explorer) у 2001 р. – апарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), також стратосферних експериментах BOOMERANG і MAXIMA, були «цілковитим підтвердженням теорії», що й було назване «космічною симфонією» (див. статтю В.Гу і М.Вайт у ж. «Сайєнтифік Америкен», № 1, 2004). Через півтора року, однак, там же маємо пересторогу: «Всесвіт фальшує» (стаття Г.Старкмана і Д.Шварца, № 7, 2005): «Є космічний дисонанс... у цих флуктуаціях виділено окремі «моди». І – «космічний контрабас» і «космічна туба» грають надто тихо та ще і за іншою партитурою... В музиці раннього Всесвіту бракує низьких тонів, які в партитурі є, бо записані завдяки теорії інфляції... Не виключене, що ця теорія зазнає серйозної ревізії, хоча інші варіанти не є привабливими... Є думка, що Всесвіт має неочікувано складну топологію».

Будемо сподіватися нових даних від супутника «Планк» – у 2007 р...

### **Антропний принцип**

Упродовж багатьох століть людство поступово звільнялося від *антропоцентричного* (від грецького «антропос» – людина) *погляду* на будову світу, за яким Земля (потім Сонце, наша Галактика) є центром Всесвіту. Але вигнаний в двері він знову й знову повертався через вікно...

Поза всяким сумнівом, існування близько двох десятків (частково описаних у розділі 6) космологічних моделей стимулювало розвиток уявлень про те, що «кожна з них може описувати лише той або інший окремий (більш менш самостійно існуючий, як би автономний, квазі-замкнутий) Всесвіт, але не увесь Світ».

У свою чергу, як це відзначено багатьма фізиками, структура спостережуваного нами Всесвіту настільки крихка, що найменші зміни діючих у ньому закономірностей призводять до катастрофічних наслідків. Все наче підстроєно так, щоб розвиток усіх можливих процесів привів до появи на Землі різноманітних форм життя аж до людини, здатної осягати і розкривати таємниці Всесвіту.

Висновок із сучасної космології – «у Всесвіті діє прихований принцип, що організовує його певним чином» – багато авторів (серед них – Р.Дікке, Б.Картер, С.Хокінг, Дж.Барроу і ін.) виклали найрізноманітнішим формулюванням. Ось одне з тверджень: *ми є свідками процесів певного типу тому, що процеси іншого типу протікають без нас*. **Р.М.Ідліс** узагальнив його і так: «Єдиним можливим рішенням цього найзагальнішого космологічного парадоксу є пряма вказівка на некоректність поставленого питання: насправді Всесвіт реалізує, звичайно, всі свої потенційні можливості, але ми стикаємося лише з тим, що відбувається саме в нашому конкретному макросвіті». Тож поглянемо, як уся навколишня ієрархія матеріальних структур у Всесвіті (а в підсумку і ми самі) залежить від дивної узгодженості параметрів, що визначають процеси в мікросвіті. Пригадавши при цьому справді пророчий вислів **А.Еддінгтона**: «Ми почали досліджувати внутрішню будову зорі і незабаром виявили, що досліджуємо будову атома»...

1. Як виявилось, стійкість найбільш поширеного хімічного елемента – водню в тому, що маса електрона  $m_e$  ( $\gg 0,5$  MeV) менша від різниці мас нейтрона  $m_n$  і протона  $m_p$ :  $m_e < m_n - m_p = \Delta m_{np}$  ( $\gg 1,3$  MeV). Якби маса електрона була в три рази більша, відбувався б колапс атома водню за схемою  $p + e^- \rightarrow n + \gamma$ , причому при  $m_e' = 3m_e$  атом нейтрального водню, що утворився, існував би не більше одного місяця, при  $m_e' = 4m_e$  – не більше доби. А це значить, що галактики і зорі склалися б цілком із нейтронів. Складніших форм речовини – атомів і молекул, а отже, і всього розмаїття нашого світу в такому всесвіті не було б. А тим часом, якщо порівняти електрон з іншими елементарними частинками, то стає ясным, що його маса – це, як висловився **І.Л.Розенталь**, «гігантська флуктуація, необхідна, однак, для існування складних форм речовини»...

2. Існує й сильніше обмеження на масу електрона. Як стверджує теорія, наше Сонце випромінює енергію упродовж мільярдів років (і

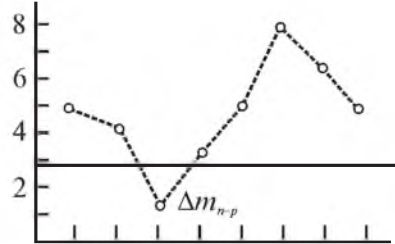


тим самим забезпечує розвиток життя на Землі), тому що дуже поволі йде реакція взаємодії двох протонів з утворенням дейтрона  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ . Але такий «задовільняючий нас» темп подій можливий лише у випадку, якщо маса електрона  $m_e < 0,9$  МеВ! Це впливає з очевидного співвідношення між масами частинок, що наявні у цій реакції:  $2m_p > (m_p + m_n) - e_d/c^2 + m_e$ , де  $e_d \sim 2,2$  МеВ – енергія зв'язку протона і нейтрона в дейтроні. Звідси і випливає, що  $m_e < e_d/c^2 - Dm_N \sim 0,9$  МеВ. Отже, електрон (при незмінних значеннях інших величин) міг би бути хіба що в півтора раза «важчим», ніж він є насправді (рис. 8.6.).

3. Існує обмеження на різницю мас нуклонів  $Dm_N = m_n - m_p$ . Адже ті реакції синтезу, що відбуваються в надрах зір, можливі завдяки стабільності дейтрона, яка, виявляється, «забезпечена з дуже невеликим запасом» нерівністю  $Dm_N < e_d/c^2 - m_e \approx 1,7$  МеВ. Неважко переконатися, що різниця мас нейтрона і протона  $Dm_N = 1,3$  МеВ набагато менша за різницю мас інших частинок, які належать одному і тому ж ізотопічному мультиплету (так  $m_{p\pm} - m_{s0} \gg 5$  МеВ,  $m_{s-} - m_{s0} \gg 5$  МеВ і т.д.). А якби здійснювалася нерівність  $Dm_N > 2,9$  МеВ, то дейтрон виявився б нестабільним. Синтез гелію і важчих елементів у надрах зір став би неможливим. У цьому випадку Всесвіт складався б лише з водню, а зформовані у ньому зорі швидко колапсували б.

А ось наскільки структура Всесвіту залежить від констант фундаментальних взаємодій. Збільшення сили взаємодії між нуклонами усього на декілька (<10%) відсотків, призводить до того, що біпротон (система  $pp$  або ізотоп  ${}^2\text{He}$ ) стає стабільною частинкою. У цьому випадку водень за схемою  ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{He} + \gamma$  катастрофічно швидко, вже в перші хвилини розширення Всесвіту, перетворюється на гелій, який виявився б єдиною складовою її речовини. Бо – вже при невеликій зміні сили взаємодії між нуклонами реакція «потрійного захоплення»  ${}^3\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$  стає неможливою, а тим самим ланцюжок реакцій синтезу всіх подальших елементів обривається.

$\Delta m_{n-p}, \text{ MeV}$



$m_{\pi^+} - m_{\pi^0}$   $m_n - m_p$   $m_{s^-} - m_{s^0}$   $m_{t^+} - m_{t^0}$   
 $m_{K^0} - m_{K^+}$   $m_{s^0} - m_{s^+}$   $m_{s^-} - m_{s^+}$   $m_{D^+} - m_{D^0}$

Рис. 8.6. Різниця мас частинок з одного ізотопічного мультиплету

І, навпаки, якби сила взаємодії між нуклонами була на 5 % слабкішою, то дейтрон як стійка система не міг би існувати, оскільки кінетична енергія його складових частинок ( $n$  і  $p$ ) перевищувала б енергію їхнього зв'язку. Отже, було б неможливим утворення ядер гелію.

5. У навколишньому світі електростатична сила відштовхування протонів в атомному ядрі менша, ніж їхнє тяжіння, обумовлене сильною взаємодією. Очевидно, що зворотна залежність між цими величинами зробила б існування складних ядер неможливим.

6. Якби процеси, що визначають слабку взаємодію, були інтенсивнішими, то відповідно зменшився б час життя нейтронів і їх у дозорній речовині практично могло б не бути. А оскільки відношення  $N_d/N_p$  в епоху синтезу гелію (при  $t = 10\text{--}300$  с) визначається відношенням  $N_n/N_p$ , то реакції синтезу гелію практично не відбувалися б. У цьому випадку Всесвіт складався б виключно з водню. У свою чергу, реакції перетворення двох протонів у дейтрон у надрах зір протікали б із набагато більшою швидкістю, через що, мабуть, рівновага зорі була б неможливою.

І, навпаки, якби ефективність слабких взаємодій була менша від реально існуючої, то практично всі протони вже на стадії розширення перетворилися б на ядра гелію.

7. Гравітаційною сталою  $G$  визначається, зокрема, температура в надрах зір. І якби, скажімо, вона була удесятеро більшою, то енергія в надрах Сонця звільнялася б за рахунок не  $pp$ -циклу, а  $CNO$ -циклу. Внаслідок цього час перебування Сонця на головній послідовності вимірювався б не мільярдами, а мільйонами років. Витративши запаси водню, воно швидко перетворилося б на червоного гіганта, спалюючи і випаровуючи речовину планет (втім мабуть, їх у нього і не було б, оскільки планети, за існуючими нині теоріями, утворюються лише поблизу тих зір, біля яких є оболонки в конвективному стані, а при більшому  $G$  такої оболонки біля Сонця було б).

8. Наш простір тривимірний. А, як вже було зазначено, лише у просторі трьох вимірів можуть існувати стійкі планетні системи...

9. Нарешті, розвиток усіх спостережуваних матеріальних структур у Всесвіті – галактик, зір і планет, та й поява життя на Землі – є можливими саме тому, що густина речовини в ньому близька до критичної ( $r \gg r_{кр}$ ). У випадку  $r < r_{кр}$  сили інерції переважали б над силами тяжіння, тому галактики і, очевидно, зорі утворитися б не змогли. У свою чергу, при  $r > r_{кр}$  тривалість циклу «розширення-стис-

нення» була б дуже малою для того, щоб в ній міг з'явитися «спостерегіач».

З цих прикладів (а їх можна підшукати ще з десятків) видно, що і справді антропоцентричний погляд на світ як би повернувся назад. Але чи у вікно? Швидше тим же шляхом і навіть як бажаний гість. Адже розвиток антропного принципу сприяв чіткому формулюванню питання: «Чому світ влаштований так, а не інакше?», тоді як раніше задовольнялися питанням «Як влаштований світ?».

Знаємо, можлива відповідь на це, по-новому зформульоване питання така: спостережуваний нами Всесвіт – не єдиний. В світі, можливо, «існує якийсь фізичний простір – вакуум великої (безконечновимірної?) розмірності. Спонтанні флуктуації цього вакууму породжують всесвіти зі своїми вимірами, наборами взаємодій і числовими значеннями фундаментальних сталей». Один з безлічі Всесвітів у цьому складному і далеко не зрозумілому Світі – наш...»

## ЗАМІСТЬ ПІСЛЯМОВИ

Головною темою цієї книжки була розповідь про використання загальної теорії відносності для пояснення закономірностей будови і розвитку спостережного Всесвіту і його окремих частин. Залипається наголосити: прагнення охопити думкою увесь Всесвіт з'явилося в людини вже тоді, коли вона не знала ще ні розмірів планети, на якій живе, ні відстаней до інших небесних тіл, ні, тим більше, – їхньої фізичної природи. Але вдумаймося: як далеко вперед у розкритті таємниць Всесвіту пішло людство порівняно з уявленням про плоску Землю, підтримувану чотирма слонами, як стоять на черепасі!..

За останні 350 років масштаби світу, що їх вивчає астрономія, зросли у  $10^{15}$  разів. Проте, і на початку ХХІ ст. доходимо висновку: людина, як висловився француз **Блез Паскаль** (1623–1662), «утримується на межі двох безодень – безодні нескінченності і безодні небуття», наче не «в силах навіть наблизитися до розуміння цих крайностей – кінця Всесвіту і його початку, неприступного, прихованого від людського погляду непроникною таємницею, і не може осягнути небуття, з якого виникла, і нескінченність, в якій розчиняється».

З одного боку це, начебто, не так, адже спільними зусиллями релятивістська космологія і квантова теорія поля поступово таки просуваються до розуміння найпотемніших загадок Природи! З іншого ж, як висловився **В.Паулі**: «Межі усіх природничо-наукових методів там, де з'являються питання про походження». То ж, хоч-не-хоч, «Велике Дещо» доводиться віддавати філософії, бо таки, як казали римляни: «*Quantum scimus, gutta est, ignoramus mare*» (те, що ми знаємо, – це лише краплина, чого не знаємо – море).

І закінчимо цю нашу розповідь ось цими словами **Я.Б.Зельдовича** (1981 р.): «Дотик до великої таємниці початку Всесвіту є, можливо, найбільш хвилюючим моментом у розвитку природничих наук. Щастя жити у такий час і відчувати драматичний момент мужніння людського пізнання»...

## ЛИТЕРАТУРА

- Архангельская И. В., Розенталь И. Л., Чернин А. Д. Космология и физический вакуум. – М., УРСС, 2006. – 216 с.
- Брагинский В. Б., Полнарев А, Г, Удивительная гравитация, – М.: Наука, 1985. – 162 с.
- Вайнберг С. Первые три минуты. – М.: Энергоиздат, 1981. – 210 с.
- Гинзбург В. Л. О теории относительности. – М.: Наука, 1979. – 238 с.
- Грин Брайан. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории, изд. 2-е; – М. УРСС. 2005. – 288 с.
- Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Происхождение галактик и звезд. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
- Девис П. Пространство и время в современной картине Вселенной. – М.: Мир, 1979. – 288 с.
- Девис П. Случайная Вселенная. – М.: Мир, 1985. – 160 с.
- Долков Д.А., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. – М., Изд. Моск. ун-та, 1988. – 199 с.
- Дорфман Я. Г. Всемирная история физики. – М. 1974. – 352 с,
- Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. – М.: Наука, 1984. – 224 с
- Зельдович Я. Б. Теория вакуума и космология // УФН, 1981. – Т. 133, вып. 3. – С. 479 – 503.
- Зельдович Я. Б. Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная. – М.: Наука, 1985. – 464 с.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1975. – 736 с.
- Кайку Мічію. Візії: як наука змінить ХХІ сторіччя. Л. Літопис, 2004. – 544 с.
- Кайку Мічію. Гіперпростір. Л. Літопис, 2005. – 458 с.
- Кауфман У. Космические рубежи теории относительности. – М.: Мир, 1981. – 350 с.
- Климишин И, А, Астрономия наших дней. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
- Космология: Теория и наблюдения. – М.: Мир, 1978. – 468 с.
- Крамаровский Я. М., Чечев В. Д. Синтез элементов во Вселенной. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
- Крупномасштабная структура Вселенной. – М.: Мир, 1981. – 516 с.
- Кузнецов Б. Г. Эйнштейн. – М.: Изд-во АН СССР, 1968. – 416 с.

Латышов Н.Н., Бейлин В.А., Верешков Г.М. Вакуум, элементарные частицы и Вселенная. – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 2001, – 226 с.

Линде А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология – М.: Наука, 1990 – 276 с.

Логунов А. А. Лекции по теории относительности и гравитации. Современный анализ проблемы. – М.: Наука, 1987. – 272 с.

Марков М. А. О природе материи. – М.: Наука, 1976. – 216 с.

Николсон И. Тяготение, черные дыры и Вселенная. – М.: Мир, 1988. – 240 с.

Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1983. – 190 с.

Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. – М.: Наука, 1988. – 168 с.

Новиков И. Д., Фролов В. П. Физика черных дыр. – М.: Наука, 1986. – 328 с.

Пиблс П. Физическая космология. – М.: Мир, 1975. – 312 с.

Розенталь И. Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. – М.: Наука, 1984. – 112 с.

Розенталь И. Л. Геометрия, динамика, Вселенная. – М.: Наука, 1987. – 144 с.

Сажин М. Н. Современная космология в элементарном изложении. М. УРСС. 2002. – 254 с.

Силк Дж. Большой взрыв. Рождение и эволюция Вселенной. – М.: Мир, 1982. – 392 с.

Фаулер У. А. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов // УФН, 1985. – Т. 145, вып. 3. – С. 441-488.

Физика космоса. – М.: Советская энциклопедия, 1986. – 784 с.

Фридман А. А. Мир как пространство и время. – М.: Наука, 1965. – 112 с.

Хван М. П. Неистовая Вселенная. М. УРСС, 2006. – 408 с.

Чернин А. Д. Физика времени. – М.: Наука, 1987. – 222 с.

Шмутцер Э. Теория относительности: Современное представление. – М.: Мир, 1981.

Эйнштейн А. Физика и реальность. – М.: Наука, 1965. – 360 с.

Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. – М., 1965. – 326 с.

Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Кудря Ю.М., Парновський С.Л., Федорова О.В., Хміль С.В. Загальна теорія відносності: випробування часом. – К., ГАО НАН України, 2005 – 288 с.

## ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

- Августин 11  
Альбрехт А. 180  
Амбарцумян В.А. 72, 192  
Анаксагор 9  
Аристарх Самоський 9  
Аристотель 8, 12
- Бантлі Р. 192  
Бейлін В.А. 6  
Бентлі 20  
Берроу Дж. 198  
Берклі Дж. 22  
Богородський О.Ф. 24, 27, 99, 100  
Больцман Л. 31  
Борн М. 16, 85, 98  
Брагінський В.Б. 79  
Брадлей Дж. 34  
Бранс К. 100
- Верешков Г.М. 6  
Вільсон Р. 153  
Вайнберг С. 175  
Вайт М. 197  
Вебер Дж. 96  
Вейль Г. 130  
Вейцекер К. 195  
Вельтман М. 179  
Владимиров Ю.С. 100  
Вокульор Дж. де 148
- Габбл Е. 89, 131  
Галілей Г. 13, 14, 36, 50  
Гамов Г. 153, 156, 167, 195  
Гаусс К. 53-55  
Геракліт 10
- Герц Г. 33  
Гільберт Д. 67, 72, 99  
Гінзбург В.Л. 119  
Глінер Е.Б. 23  
Глешоу Ш. 175  
Гу В. 197  
Гук Р. 25  
Гуревич Л.Е. 23, 176, 194  
Гут А. 180  
Гюйгенс Х. 15
- Дікке Р. 100  
Дірак П. 100, 124, 164, 165, 167, 183  
Двалі Г. 170  
Декарт Р. 14, 21, 195  
Демокріт 9  
Джексон Г. 78  
Джинс Дж. 193  
Дорфман Я.Г. 18  
Доплер 41
- Евклід 55  
Еддінгтон А. 145, 164, 198  
Ейлер Л. 32  
Ейнштейн А. 24, 37, 38, 39, 46, 57, 80, 81, 85, 90, 109, 127, 141, 144  
Еренфест П. 74  
Етвеш Л. 79
- Зелігер Х. 29  
Зельдович Я.Б. 96, 119, 139, 151, 154, 176, 179, 182, 184  
Зельманов А.Л. 69, 70  
Зенон Елейський 10

Іваненко Д.Д. 72, 94  
Ідліс Р.М. 198  
Імшенник В.С. 5, 6  
Інфельд Л. 38, 81  
Іоанн Філіпон 9

Йордан П. 100

Калуца Т. 75  
Кант І. 71, 73  
Каплан С.А. 5, 118  
Кар Тіт Лукрецій 9  
Картер Б. 198  
Кауфман В. 35  
Кеплер Й. 13, 15  
Керр Р. 116  
Киржніц Д.А. 176  
Кланічка В.М. 7  
Клейн О. 75  
Клеро А. 26  
Коперник М. 13  
Крістоффель 57, 62  
Крускал М. 111, 112  
Ксенократ 10  
Кудрявцев П.С. 25, 57  
Кузнецов Б.Г. 13  
Кузьмін В.А. 176  
Курт В.Г. 5

Латипов Н.Н. 6  
Лагранж Ж. 100  
Ламберт Й. 29  
Ландау Л.Д. 98  
Лаплас П. 25, 27, 105  
Лармор Дж. 35  
Левер'є У. 26  
Левкіш 9

Леметр Ж. 132, 143, 145  
Лесаж Ж. 24  
Лінде К. 176, 180  
Лінден-Бел Д. 162  
Ліфшиц Є.М. 98, 193  
Лобачевський М.І. 53, 54  
Логунов А.О. 101  
Ломоносов М.В. 33  
Лонгейр М. 49  
Лоренц Х. 34, 26, 39

Майкельсон А. 32  
Маймонід 10  
Максвелл Дж. 33  
Марціан Капелла 10  
Маттіг В. 145  
Мах Е. 23, 79, 80  
Мебіус А. 64  
Менделєєв Д.І. 33  
Метьюз Т. 48, 49  
Мінковський 36, 51  
Міцкевич Н.В. 100  
Мостипаненко О.М. 67, 74

Наан Г.Й. 66, 68, 176  
Надьожин Д.К. 5  
Нейман К. 29, 77  
Нетер Е. 101  
Новиков І.Д. 30, 96, 119, 125, 139,  
154, 176, 179, 185  
Ньютон І. 15, 17-22, 77, 137, 192

Окунь Л.Б. 176  
Ольберс Г. 28  
Оорт Я. 160  
Оппенгеймер Р. 109  
Орір Дж. 47



Остафійчук Б.К. 7  
Острайк Дж. 170

Панов В.І. 79  
Паскаль Б. 202  
Паулі В. 202  
Пензіас А. 153  
Пенроуз Р. 116, 126  
Перель Ю.Г. 28  
Перлмуттер С. 169  
Піблс П. 157, 160, 187  
Піфагор 9  
Платон 8, 11  
Прокл 11  
Проник В.І. 7  
Пуанкаре А. 35, 72

Райл М. 49  
Рахлін І.Є. 5  
Решетников В.П. 169  
Ріман Б. 55  
Рісс А. 169  
Рітц В. 37  
Річчі Г. 62  
Розенталь І.Л. 198, 204

Салам А. 175  
Сендідж Е. 148, 168, 169  
Сіттер В. де 37, 129, 144, 179  
Слайфер В. 130  
Смородинський Я.А. 15  
Соболев В.В. 5  
Соколовський Ю.Й. 53  
Старобінський А.А. 176  
Старкман Г. 197  
Стейнхардт П. 170, 180  
Стратон Лампсакський 11

Тейлор Дж. 98  
Толанд Дж. 23  
Томсон Дж. 35  
Томсон У. 31  
Торн К. 102

Уїлер Дж. 24, 114  
Уїтроу Дж. 12, 71, 74

Фарадей М. 33  
Фаулер У. 173  
Фінзі А. 27  
Фіцджеральд Дж. 34  
Фомін П.І. 176  
Франклін Б. 32  
Френкель Я.І. 32  
Фрідман О.О. 69, 89, 131, 141  
Фролов В.П. 125  
Фуко Ж. 23

Халс Р. 98  
Хіллс Г. 162, 163  
Хойл Ф. 145, 173  
Хокінг С. 124, 125, 198  
Холл А. 26  
Хорски Я. 100

Чернін А.Д. 5, 194

Шама Д. 79,92  
Шарльє К. 29  
Шварц Д. 197  
Шварцшільд К. 88, 103, 112, 113,  
127  
Шезо Ж. 28  
Шкловський Й.С. 106, 121

Яцків Я.С. 7, 92, 123, 159, 204

І. А. Климишин

**РЕЛЯТИВІСТСЬКА  
АСТРОНОМІЯ**

*Верстка Романа Костинюка*

Видавництво «Гостинець», Івано-Франківськ, Короля Данила, 14Б/45,  
тел. 8-0342-501533, 8-03422-45182.

[Tretyak@optima.com.ua](mailto:Tretyak@optima.com.ua)

Здано до складання 1.09.2006. Підписано до друку 31.01.2007.

Папір офсетний. Гарнітура Таймс. Тираж 500 прим.