

Серія *SCEPTICA*
Книжка I

СТІВЕН ГОКІНГ

КОРОТКА ІСТОРІЯ ЧАСУ

ВІД ВЕЛИКОГО ВИБУХУ
ДО ЧОРНИХ ДІР



Серія *SCEPTICA*
Книжка I

СТІВЕН ГОКІНГ

КОРОТКА
ІСТОРІЯ
ЧАСУ

ВІД ВЕЛИКОГО ВИБУХУ
ДО ЧОРНИХ ДІР

Переклад з англійської

2015
К.І.С.

Перекладено за виданням
«A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes»,
Bantam Books,
відповідно до угоди з автором
за посередництва агентства Writers House.

Видання підготовлено
за сприяння Українського фізичного товариства.

ISBN 978-617-684-106-7 (epub)

ISBN 978-617-684-105-0 (Серія *SCEPTICA*)

© Stephen Hawking, 1996

ЗМІСТ

Про книжку	5
Про українське видання	7
Дещо про Гокінга, його книжку та чорні діри, що не такі вже й чорні	9
Подяки	17
Передмова	18
Про автора	20
Розділ 1. Як ми уявляємо собі Всесвіт	21
Розділ 2. Простір і час	33
Розділ 3. Розширний Всесвіт	53
Розділ 4. Принцип невизначеності	69
Розділ 5. Елементарні частинки та сили природи	78
Розділ 6. Чорні діри.	95
Розділ 7. Чорні діри не такі вже й чорні	113
Розділ 8. Народження і загибель Всесвіту	126
Розділ 9. Стріла часу	152
Розділ 10. Червоточини та подорожі в часі.	162

Розділ 11. Об'єднання фізики	173
Розділ 12. Висновок	187
Персоналії	191
Глосарій	196

ПРО КНИЖКУ

«Коротка історія часу» — знаменита книжка, певно, найвідомішого сучасного англійського фізика, космолога, що вийшла 1988 року, і відтоді витримала понад двадцять перевидань англійською та сорок перекладів. Книжка перебувала у списку бестселерів *«Санді таймс»* понад чотири роки, потрапила до «Списку найпродаваніших книжок» (продано понад 10 млн примірників).

Фахівець із Всесвіту... Смілива наукова подорож до кордонів космосу. (*«Ньюзвік»*)

Ця книжка поєднує дитячу зацікавленість з інтелектом генія. Ми подорожуємо у Всесвіт Гокінга, захоплюючись його розумом». (*«Санді таймс»*)

Стежити за тим, як такий гострий розум розв'язує значущі проблеми — захопливий досвід. (*«Санді таймс»*)

Одна з найясніших наукових голів після Айнштайна. (*«Дейлі експрес»*)

[Гокінг] може пояснити складнощі космологічної фізики, предивно поєднавши у викладі зрозумілість і доступність... Його розум надзвичайної сили. (*«Нью-Йорк рив'ю оф букс»*)

Майстерно. (*«Вол-стрит джорнел»*)

Чарівно й зрозуміло... (Книжка) мов сонячне саяво. (*«Нью-йоркер»*)

Весело і зухвало... Безперечно, містер Гокінг має природжений талант учителя, що допомагає йому просто, талановито і з добрим гумором пояснювати надскладні твердження через аналогії з повсякденного життя. (*«Нью-Йорк таймс»*)

Навіть тепер, коли він, безпорадний, сидить в інвалідному візку, його розум, здається, дедалі могутніше ширяє в безмірі простору й часу, відкриваючи таємниці Всесвіту. (*«Тайм»*)

Справді, щоб ідея Великого вибуху й початку Всесвіту була логічна й уявленна, він зробив найбільше за всіх інших фізиків після Айнштейна... Читач мимоволі розуміє: якби Айнштейн спробував був написати книжку для нефізиків, то вона, ймовірно, вийшла б саме така. (*«Ньюздей»*)

Корифей фізики, один з небагатьох теоретиків, що, можливо, от-от розгадає задум Божий. (*«Лос-Анджелес таймс»*)

Геніальний, неповторний, трагічний і тріумфальний... Гокінг веде нас крізь еволюцію сучасної космологічної думки: від Аристотеля й Коперника, через Галілео і Ньютона, аж до Айнштейна й, певна річ, самого Гокінга. (*«Сідні морнінг гералд»*)

ПРО УКРАЇНСЬКЕ ВИДАННЯ

Книжка С. Гокінга «Коротка історія часу» — перша з серії найкращої світової науково-популярної [і навчальної] літератури SCERTICA. Переклад книжки колективний. Він відбувався в рамках двох конкурсів перекладів науково-популярної літератури на [форумі сайту r2u/e2u](http://forum.e2u.org.ua). До проєкту загалом долучилося понад десяток людей (нижче подано зареєстровані форумні ніки та імена учасників). Це насамперед перекладачі: Денис Торова-тов (Подяки, Передмова, Розділ 1), Анатолій Хлівний (Розділ 2), [Сондра](#) (Розділ 3), [Olesya_Gomin](#) (Розділ 4), [veta_veja](#) (Розділ 5), Ганна Лелів (Розділ 6, Розділ 7), Андрій Рисін (Розділ 8, Розділ 12, Додатки, Глосарій), Юлія Панова (Розділ 9), Олена Щербак (Розділ 10), Людмила Хлівна (Розділ 11) і редактор [Кувалда](#).

У проєкті також узяли участь: Дмитро Щербина — вичитування перших розділів; Юрій Марченко — переговори з власником та інша організаційна робота.

Декілька слів стосовно термінології і написання слів іншомовного походження. Тут основні орієнтири були: [Український правопис \(1928\)](#), [Термінологічна правописна конвенція \(1993\)](#), [Український правопис \(Проект-99\)](#) і [Англійсько-українсько-англійський словник наукової мови \(фізика та споріднені науки\)](#) О. Кочерги і Є. Мейнаровича, 2010 (<http://e2u.org.ua>). Втім залишилися деякі питання щодо перекладу низки слів/сполук, термінів як нових, так і давніших; щодо них зроблено декілька приміток; у тексті також є паралельні варіанти: часопростір/простір-час і пришвидшення/прискорення.

Висловлюємо щиро вдячність агентству «[Райтерз гауз](#)» та особисто [Елові Цукерману](#) за надання прав на розміщення безплатного електронного варіанта перекладу книжки для загального користування, Василю Старку та Максимові Стрісі за до-

помогу в перемовинах із правовласником, Андрієві Рисіну — за оплату авторських прав, Ігореві Яловецькому — за фінансову допомогу; Ользі Кочерзі — за мовні зауваги та дискусії, Юрієві Степановському — за передмову, зауваги і примітки, Юрієві Слюсаренку — за сприяння.

Олександр Телемко

ДЕЩО ПРО ГОКІНГА, ЙОГО КНИЖКУ ТА ЧОРНІ ДІРИ, ЩО НЕ ТАКІ ВЖЕ Й ЧОРНІ

Як сказав Джонсон, якщо ви знаєте, що вас завтра вранці повісять, це допомагає вам добре зосередитися. І він (Стівен) дійсно зосередився на своїй праці так, як я гадаю, не зміг би зосередитись у противному разі... Ні, ні, я не можу назвати його хворобу удачею. Але для нього хвороба була меншим лихом, ніж для більшості інших людей.

Ізобел Гокінг про сина

Стівен Гокінг мав щастя з'явитися на цей світ 8 січня 1942 р. в Оксфорді, куди його мати Ізобел та батько Френк втекли з Лондона від німецьких бомб. Було відомо, що німці вирішили не бомбити Оксфорд, бо Гітлер мав плани зробити в ньому свою резиденцію. Як згодом обчислив сам Гокінг, того ж дня побачили світ ще двісті тисяч дітей. Вважається, що генії народжуються у пропорції один до ста тисяч, і що тільки одному зі ста потенційних геніїв вдається реалізуватися. Двомстам тисячам людей, що народилися водночас з Гокінгом, пощастило: один із двох їх потенційних геніїв реалізувався. Ним виявився Стівен.

Ніщо не провіщало в юному Стівені генія, хіба крім деяких ознак: у дитинстві він розвивався ще повільніше, ніж Айнштайн, у школі вчився ще гірше, ніж Ньютон, а в університеті байдикував ще більше, ніж Гете чи Байрон. Можливо, що Стівен Гокінг трохи хизується, коли про все це розповідає, але що краще, ніж почуття гумору, може підтримувати хвору людину, хвороба якої має страшну назву — *бічний аміотрофний склероз*? Відповідь на це, здавалося б, риторичне питання є: ще краще безна-

дійно хвору, повністю паралізовану людину може підтримувати безупинна, улюблена та плідна праця. Стівен Гокінг вже давно не може самостійно рухатись, не може говорити, не може їсти, але може бачити, може чути і слухати, а головне, може думати. Коли Гокінг у 21 рік враз довідався, що жити йому залишилося не більше ніж два чи два з половиною роки, він впав у розпач. Від самогубства його врятувала кохана дівчина Джейн Вайлд, в яку він закохався, ще не підозрюючи про свою смертельну хворобу. Молоді люди вирішили одружитися, вже коли Гокінгові поставили страшний діагноз.

Стівен Гокінг прожив уже на 50 років більше, ніж звичайно живуть за такої хвороби. І в цьому йому допомогла дружина Джейн і книжка *«Коротка історія часу. Від Великого вибуху до чорних дір»*, яка зробила Гокінга багатою людиною. Всі ми знаємо, що хворіти тепер — це дуже дорогий спосіб проводити час. Тож неможливо собі навіть і уявити, скільки коштує підтримка життя у фізичному тілі Стівена Гокінга. Багатим йому необхідно було стати, щоб спростувати прогнози лікарів.

1982 року, коли Джейн порадила Стівенові написати книжку, щоб заробити грошей на платню для медичної доглядальниці, Гокінг уже три роки посідав Лукасівську катедру математики, найпрестижнішу катедру в Англії, яку з 1669 по 1702 р. займав Ісаак Ньютон, а з 1932 по 1969 р. — славетний фізик Пол Дирак (Гокінг був лукасівським професором з 1979 по 2009 р.). Сім'я Гокінгів була в тяжкому фінансовому стані. Окрім інших витрат, треба було оплачувати навчання старшого сина Роберта та дочки Люсі у приватних школах. 1979 р. народився син Тім. 1981 р. Джейн захистила дисертацію і теж почала працювати, але й двох зарплат Гокінгам катастрофічно не вистачало.¹ І тут Гокінг учинив щось неймовірне: всупереч історії, яку розповів Гарі Ліпкін, фізик Стівен Гокінг продемонстрував світові, що навіть лукасів-

¹ Відомий ізраїльський фізик Гарі Ліпкін якось розповів таку байку: «Дві молоді жінки гуляли в лісі. Побачили жабу. Раптом жаба їм каже: "Милі жінки! Я зовсім не жаба. Я зачарований фізик. Якщо хтось з вас мене поцілує, я знову стану фізиком." Одна з жінок взяла жабу і поклала у свою сумочку. "Так ти її поцілуєш?" — "Ні за що на світі! Жоден фізик не зможе заробити стільки грошей, як жаба, що розмовляє людською мовою!"».

ський професор² може заробити дуже багато грошей. Сталось це завдяки книжці, присвяченій Джейн, яка вийшла у США та Канаді в квітні 1988 р. Слід сказати, що майже всі її герої — Галілей, Кеплер, Лаплас, Айнштайн, Фрідман, Гамов, Едингтон, Ландау, Файнмен, Пенроуз та інші у свій час написали чудові науково-популярні книжки, присвячені фундаментальній фізиці та космосу, але жодна з них (за винятком книжок Гамова про містера Томпкінса) не досягла такої слави, як Гокінгова.

Стівен Гокінг, попри свою дуже тяжку хворобу, все життя багато подорожував і продовжує подорожувати. Крім Австралії, він відвідав усі континенти, навіть Антарктиду. Він піднімався на повітряній кулі, літав у невагомості й уже забронював квиток на космічний суборбітальний політ.

У Радянському Союзі Гокінг побував сім разів. Як він розповідає у своїй новій автобіографічній книжці *«Моя коротка історія»*, під час першого приїзду до Радянського Союзу його затримали за контрабанду, точніше, за контрабандний провіз російськомовної Біблії. Гокінг приїхав із студентською групою, і один із студентів, ревний баптист, дуже хотів подарувати нелегально провезені екземпляри Біблії релігійно неосвіченим радянським громадянам. Стівен Гокінг легко погодився допомогти йому провезти книги. Молодих правопорушників протримали декілька годин і вирішили відпустити, щоб не влаштовувати міжнародного скандалу.

Дуже корисним у науковому плані для Гокінга був приїзд у Москву у вересні 1973 р. Плідне спілкування з Я. Зельдовічем та А. Старобінським привело Гокінга до його найважливішого наукового відкриття — можливості квантового випаровування чорних дір (Гокінг у своїй книжці *«Коротка історія часу»* називає Алексея Старобінського *«Александром»*). Про своє відкриття Гокінг написав невелику статтю (півтори журнальні сторінки) та віддав її у журнал *«Нейче»*.

Навесні 1974 року журнал *«Нейче»* (Nature, Vol. 248, March 1, P. 30–31) із статтею Гокінга *«Black hole explosions?»*

² Справжня історія від нобелівського лавреата з фізики 2000 р. Ж. Алферова: «До американського професора зайшов сантехнік, за кілька хвилин полагодив кран та заправив 30 доларів за роботу. «Чи не забагато?», — спитав професор. «Коли я був професором, для мене це також було забагато», — відповів сантехнік.»

(«*Вибухи чорних дір?*») надійшов до наукових бібліотек Радянського Союзу. Мало кому пощастило погортати цей журнал і побачити Гокінгову статтю (автор цих рядків був одним з таких щасливців): журнал раптом зник. Хтось дуже значний у Москві наказав сховати всі журнали «*Нейче*» з Гокінговою статтею, які потрапили у Радянський Союз, у сейфи режимних відділів органів безпеки та нікому не видавати без особливого дозволу. Журнал із статтею Гокінга занесли в чорний список і нікому не видавали. Тому, хто встиг його побачити, було ясно, в чому справа. У злочасному журналі на сторінках 2–3 була надрукована дуже «небезпечна» для читачів стаття англійської журналістки Віри Річ «*Протест стосовно еміграції з Радянського Союзу*» (Vera Rich, «*Protest about emigration from the Soviet Union*»). В статті розповідалось про голодування, що оголосили в Москві певні науковці-євреї, яким забороняли виїхати в Ізраїль, йшлося також про різні інші непривабливі речі, що стосувались еміграції з Радянського Союзу. Невідомо, чи допомогла комусь ця стаття подолати труднощі з від'їздом в Ізраїль, але стала вона відтоді недоступною, мабуть і тепер лежить у тих самих «режимних» сейфах. Але в наші дні все стало набагато простіше: без будь-яких перешкод, за кілька секунд, кожен може одержати через інтернет і статтю пані Віри Річ³, і Гокінгову, заплативши журналові «*Нейче*» лише по 32 долари за кожну статтю.

Загальновизнано, що Гокінгова стаття 1974 р. про квантове випаровування чорних дір — перлина теоретичної фізики ХХ сторіччя. Відкриття Гокінга, що *чорні діри не такі вже й чорні*, і подальші його досягнення в дослідженні квантових процесів у ран-

³ Віра Річ (1936–2009), англійська журналістка, перекладачка, поетка, ще дівчиною закохалася в українську мову і в Україну. На її бажання її навіть поховано в Каневі, біля могили Тараса Шевченка. «Це було в Хайфі, — згадувала одного разу пані Віра, — офіцер органів безпеки проводив зі мною обов'язкову для цієї країни співбесіду. Під час розмови виявилось, що я знаю українську мову. «Але чому, — здивувався офіцер, — чому ви вивчили українську?» — «Для того, щоб перекласти Шевченка», — відповіла я. На тому співбесіда закінчилася. Коли його секретарка принесла тістечка і чай, ми вже співали, як брат і сестра після довгої розлуки, «Рече та стогне...», «Думи мої...», «Гетьмани, гетьмани...», «Тече вода...» та ще щось, що могли згадати. Офіцер безпеки Ізраїлю, який народився в Києві, більше не запитував, чому я вивчила українську» (<http://tyzhden.ua/Publication/3594>).

ньому Всесвіті були відзначені коштовною нагородою. 20 березня 2013 р. у Женеві Стівен Гокінг одержав *Спеціальну премію з фундаментальної фізики* (три мільйони доларів) за «за відкриття випромінювання Гокінга чорними дірами та великий внесок у квантову гравітацію та квантові аспекти раннього Всесвіту». Але це ще не вся історія. Через 30 років після опублікування статті, 21 липня 2004 р. на 17 Міжнародній конференції з загальної теорії відносності і теорії гравітації у Дубліні Стівен Гокінг визнав свою роботу помилковою. Таке визнання не стало несподіванкою. Далеко не всі фізики (в тому числі і друзі Гокінга) поділяли його інтерпретацію. Обчислення Гокінга були правильні, як і одержані ним формули та його твердження про властивості квантового випаровування чорних дір. Хибним було його розуміння власних результатів. Гокінг стверджував у своїй статті, що випромінювання чорних дір «чорне», тобто теплове з певною температурою, а таке випромінювання не містить у собі ніякої інформації. А це означало, що коли щось падає в чорну діру та навіки в ній зникає, то після випаровування чорної діри, навіки зникає і та інформація, яку містило це «щось». Але в тих обчисленнях, що провів Гокінг, не було ніяких механізмів, які б дозволяли «стерти» інформацію. Виникали питання, чи дійсно випромінювання чорних дір «чорне», чи правильно ми розуміємо, що таке «чорне» випромінювання, що таке «температура часопростору», введена Гокінгом, та інші принципові питання. 2005 р. Гокінг опублікував статтю, у якій запропонував використати для розв'язання проблем, про які йдеться (і які вже давно дістали назву «інформаційний парадокс»), так звану *AdS/CFT-відповідність*, але всі ці питання і досі остаточно не розв'язані.

4 січня 2012 р. до 70-річчя Гокінга часопис «*Нью саєнтіст*» взяв у нього інтерв'ю. Ось два питання, можливо, пов'язані між собою, на які відповів Стівен Гокінг.

«Нью саєнтіст»: *Айнштайн вважав введення космологічної константи своєю найбільшою помилкою⁴. Яка ваша найбільша помилка?*

⁴ Насправді саме космологічна константа Айнштейна відповідає за пришвидшене розширення Всесвіту, яке було відкрите вже після того, як вийшла книжка Гокінга, тобто найбільшою помилкою Айнштейна було те, що він вважав своєю найбільшою помилкою те, що взагалі не помилка.

С. Гокінг: *Я довгий час вважав, що інформація зникає в чорних дірах. Але AdS/CFT-відповідність змусила мене змінити мою думку. Це була моя найбільша помилка, в усякому разі, найбільша наукова помилка.*

.....
«Нью саентіст»: *Про що ви здебільшого думаєте протягом дня?*

С. Гокінг: *Про жінок. Жінки для мене — це найглибша таємниця.*

Цілком можливо, що своєю найбільшою помилкою у приватному житті Гокінг вважає те, що в лютому 1990 р. він залишив свою сім'ю, Джейн, двох синів і дочку, які всі були шоковані його вчинком. Гокінг став жити разом зі своєю доглядальницею Елейн Мезон, яка теж залишила чоловіка та двох синів. Пізніше, після розлучення із Джейн, Гокінг 1995 р. одружився з Елейн. Джейн також вийшла заміж за свого старого друга. Після розлучення з Елейн у 2006 р. Гокінг знову зблизився зі своєю першою сім'єю, особливо з дочкою Люсі, журналісткою та письменницею. Разом з Люсі вони написали (2007, 2009, 2011) три захопливі дитячі книжки про хлопчика Джорджа, його подружку Ені, про порося Фреді, про Всесвіт, чорні діри та Великий вибух. У червні 2014 р. вийшла вже четверта книжка про Джорджа та Ені, про їхню боротьбу з комп'ютерними гачерами, що паралізували все життя на Землі, зіпсувавши всі комп'ютери світу.

* * *

Слід докладніше зупинитися на тому, як змінилися уявлення про Всесвіт відтоді, як вийшло поправлене видання книжки Гокінга (1995), з якого зроблено переклад. Виявилось, що Всесвіт побудований набагато простіше, ніж це вважали 20 років тому. Насамперед великомасштабну⁵ будову Всесвіту дуже добре можуть описати рівняння загальної теорії відносності з космологічною константою (сталою), що ввів Айнштайн 1917 р. у рівняння своєї теорії, остаточно сформульованої 1915 р. На ці рівняння варто подивитися, бо вони керують Всесвітом:

⁵ Великомасштабна будова — це коли галактики у Всесвіті вважають такими ж крихітними, як, наприклад, молекули газу у великій кімнаті.

Космологічна
стала

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = -\kappa (T_{\mu\nu} - 0,5g_{\mu\nu} T)$$

Геометрія (гравітація) Матерія (речовина)

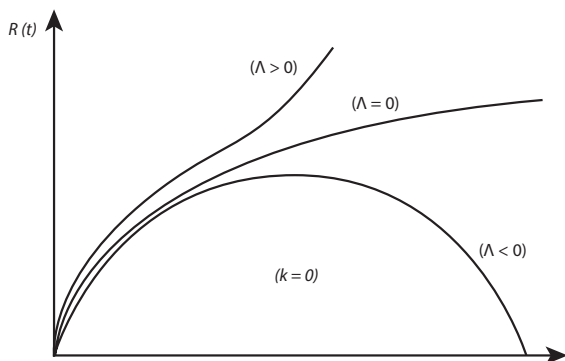
Рівняння Айнштейна — це дуже складні тензорні рівняння, але фізичний зміст їх дуже простий: **матерія, тобто речовина, визначає геометрію, тобто гравітацію**. Космологічну константу Айнштейн ввів, щоб його рівняння описували стаціонарні, незмінні в часі стани Всесвіту. Але, як виявив Фрідман, рівняння Айнштейна не мають сталих стаціонарних розв’язків, тобто всі можливі всесвіти нестационарні. Отже, космологічна константа виявилась непотрібною, вона не стабілізувала Всесвіт. Ще більше Айнштейн був засмучений тим, що якщо ніякої матерії (речовини) немає, все одно його рівняння з космологічною константою описують дуже цікавий Всесвіт (схожий на той, в якому ми тепер живемо). Тобто головна ідея Айнштейна — **матерія визначає геометрію** — виявилась хибною. Все, що треба зробити, щоб проблема, яка дуже засмучувала Айнштейна, була розв’язана, це переписати його рівняння таким чином:

$$G_{\mu\nu} = -\kappa (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T - \frac{1}{\kappa}\Lambda g_{\mu\nu})$$

Геометрія (гравітація) Темна енергія
Матерія (речовина)

та назвати доданок з космологічною константою **матерією**, що тепер і роблять, називаючи цю матерію **темною енергією**.

Рівняння Айнштейна докладно проаналізував А. Фрідман у роботах 1922 та 1924 р. Фрідман знайшов їх розв’язок для всесвітів з позитивною, негативною та нульовою просторовими кривинами. Тепер переконливо встановлено, що просторова кривина всесвіту κ дорівнює нулеві. Те, як Всесвіт буде розвиватися в часі, залежить від того, який знак має космологічна константа. Розв’язки рівнянь Айнштейна для випадку $\kappa = 0$, знайдені Фрідманом, мають вигляд:



Переконливо встановлено, що Всесвіт підлягає рівнянням Айнштейна з позитивною космологічною константою (верхня крива на рисунку). $R(t)$ — це так званий масштабний фактор, який визначає розширення Всесвіту, що, як переконливо встановлено, розширюється з пришвидшенням, передбаченим теорією Айнштейна.

Отже, ми бачимо, що наш реальний Всесвіт набагато простіший за ті, які Гокінг обговорює у своїй книжці. Як пояснює Гокінг у розділі «Стріла часу», *«розумні істоти можуть існувати тільки в фазі розширення»* Всесвіту і не можуть існувати *«в фазі стискання»*. Ми можемо не турбуватися: фаза стискання не загрожує нашому Всесвіту!

У 1932 р., звертаючись до студентів Каліфорнійського університету в Лос-Анджелесі, Альберт Айнштайн сказав, що *«зусилля науковців ґрунтуються на впевненості в тому, що дійсність повинна мати дуже гармонійну структуру. Сьогодні в нас більше підстав для такої прекрасної впевненості, ніж будь-коли раніше»*.

Сьогодні, у нас ще більше підстав для такої прекрасної впевненості, ніж 80 років тому, коли ці слова були сказані. Саме така впевненість керує Гокінгом протягом усього його нелегкого життя, надихає його на творчі звершення і пронизує його легендарну книжку *«Коротка історія часу»*.

Юрій Степановський

ПОДЯКИ

Багато хто допомагав мені писати цю книжку. Мене надихали колеги-науковці. Але головними моїми спільниками й однодумцями ці всі роки були Роджер Пенроуз, Роберт Героч, Брендон Картер, Джордж Еліс, Гарі Гібенс, Дон Пейдж і Джим Гартл. Я дуже вдячний їм, а також своїм студентам-дослідникам, що завжди, коли була потреба, ставали мені у великій пригоді.

Підготувати перше видання цієї книжки мені допоміг мій студент — Браян Віт. Мій редактор з «*Бентем букс*» Пітер Гудзарді зробив безліч зауваг, які значно поліпшили книжку. Крім того, за це видання я хотів би подякувати Ендрю Дану, що допоміг мені скорегувати текст.

Я б ніколи не написав цієї книжки без своєї системи спілкування. Програмне забезпечення «Еквалайзер» подарував мені Волт Волтош з «*Вордс плюс інкорпорейтед*», що в каліфорнійському Ленкестері, а мовний синтезатор — фірма «*Спіч плюс*» з каліфорнійського Санівейла. Синтезатор і портативний комп'ютер встановив на мій інвалідний візок Дейвід Мейсон з «*Кембридж едептив комунікейшн ЛТД*». Відтоді завдяки цим пристроям я спілкуюся краще, ніж перед тим, як спав з голосу.

Я мав чимало секретарок і асистентів, поки писав і корегував цю книжку. Хочу скласти величезну подяку секретаркам Джуді Фела, Ен Ралф, Лаурі Джентрі, Шерил Білінгтон і Сью Мейсі. За асистентів мені були Колін Вільямс, Дейвід Томас, Реймонд Лефлейм, Нік Філіпс, Ендрю Дан, Стюарт Джеймісон, Джонатан Бренчлі, Тим Гант, Саймон Гіл, Джон Роджерс та Том Кендал. Вони, а також медсестри, колеги, друзі та сім'я, попри мою інвалідність, дали мені змогу жити повним, насиченим життям, не припиняючи досліджень.

Стівен Гокінг

ПЕРЕДМОВА

Я не писав передмови до першого видання «Короткої історії часу». Це зробив Карл Саган. Я ж тоді просто подякував усім, хто допомагав мені створювати книжку. Однак декотрі фонди, які мене були підтримали, не надто зраділи з того, що я їх згадав у своїх подяках, бо дістали на свою адресу величезну кількість замовлень.

Гадаю, ні мої видавці, ні мій агент, ні я сам навіть не сподівалися, що книжка стане такою популярною. Вона протрималася в списку бестселерів лондонської «Санді таймс» аж 237 тижнів — довше за будь-яку іншу книжку (крім хіба Біблії та Шекспіра). Її перекладено майже сорока мовами. Приблизно на кожні 750 душ у всьому світі припадає один примірник моєї книжки. Як зауважив Нейтан Мірволд із корпорації «Майкрософт» (мій колишній постдокторант), я продав більше книжок з фізики, ніж Мадонна про секс.

Успіх «Короткої історії часу» свідчить про неабияку цікавість до таких визначальних питань, як «звідки ми взялися?» і «чому Всесвіт такий, який є?».

Я скористався з нагоди освіжити книжку і доповнив її новими теоретичними та практичними результатами, що їх дістав уже після того, як моя праця вперше побачила світ у День сміху 1988 року. Я додав новий розділ, присвячений червоточинам і подорожам у часі. Загальна теорія відносності Айнштайна, як на мене, не заперечує того, що ми кінець кінцем створимо ті червоточини — малі трубки, які сполучатимуть різні ділянки часопростору. Якщо це правда, то вони допоможуть нам швидко пересуватися Галактикою або подорожувати назад у часі. Певен, що ми ще не бачили жодної людини з майбутнього (чи бачили?), і, здається, я можу пояснити чому.

Останнім часом у пошуках дуальностей, або відповідностей між позірно різними фізичними теоріями, досягнуто величезного прогресу. Ці відповідності — вагома ознака існування повної єдиної теорії фізики й водночас індикатор того, що її, можливо, годі записати одним фундаментальним формулюванням. Тож у різних ситуаціях нам, мабуть, просто доведеться по-слуговуватися окремими образами тої самої теорії. Це як із мапою поверхні Землі: її годі зобразити точно, тому ми змушені користуватися окремими мапами, створеними для різних ділянок. На мою думку, об'єднання всіх законів науки в один стало б революцією, але не змінило б найважливішого: Всесвіт підлягає низці раціональних законів, і ми можемо відкрити й осягнути їх.

Щодо спостережень, то, безперечно, найбільшу вагу з-поміж них має вимірювання флюктуацій космічного мікрохвильового фонового проміння за допомогою супутника КОБІ (*COBE — Cosmic Background Explorer*, букв. дослідник космічного фону) та інших спільних проєктів. Ці флюктуації — сліди створення, крихітні початкові неоднорідності в ранньому Всесвіті, інакшому, гладкому й однорідному, який з часом вибував у галактики, зорі та інші об'єкти, що їх ми бачимо сьогодні довкола себе. Їхня форма відповідає припущенню, що Всесвіт не має меж чи країв в уявному напрямі часу, проте подальші спостереження допоможуть нам відрізнити це припущення від інших можливих пояснень флюктуацій фону. Сподіваюся, що за кілька років ми вже напевно знатимемо, що живемо в цілком автономному й самодостатньому Всесвіті, який не має ні початку, ні кінця.

Стівен Гокінг
травень 1996

ПРО АВТОРА

Стівен Гокінг народився в Оксфорді 1942 року в трьохсоту річницю смерті Галілея. Студював фізику в Оксфордському й Кембридзькому університетах. Коли Гокінгові минув двадцятий рік, у нього виявили бічний аміотрофічний склероз, що його у Великій Британії частіше називають хворобою рухового нейрона. Тридцять років, як свого часу Ісак Ньютон, Гокінг обіймав посаду лукасівського професора математики в Кембриджі. Тепер він директор досліджень Центру теоретичної космології Кембридзького університету. Має понад десять почесних наукових звань. З 1989 року — Кавалер честі. Член Королівського товариства і Національної академії наук США. Його найпопулярніші книжки — «Коротка історія часу», «Чорні діри і всесвітідитята», «Всесвіт у горіховій шкаралупі», «Найкоротша історія часу», «Великий задум» (останні дві — у співавторстві з Ленардом Млодиновим). Разом з дочкою Люсі написав кілька дитячих книжок: «Джорджів секретний ключ до Всесвіту», «Джорджів пошук космічних скарбів», «Джордж і Великий вибух», «Джордж і незламаний код». Визнаний одним з найблискучіших фізиків-теоретиків від часів Айнштейна. Живе в Кембриджі.

Розділ 1

ЯК МИ УЯВЛЯЄМО СОБІ ВСЕСВІТ

Якось один добре відомий науковець (кажуть, то був Бертран Расел) прочитав публічну лекцію з астрономії. Він описав, як Земля обертається навколо Сонця і як Сонце, своєю чергою, обертається навколо центра величезного скупчення зір, що його називають нашою Галактикою. Наприкінці лекції в задніх рядах зали підвелася літня жіночка і заявила: «Те, що ви розповіли нам, — нісенітниця. Світ — насправді площина, яку тримає на спині величезна черепаха». Науковець, поблажливо всміхнувшись, спитав у відповідь: «А на чому ж стоїть черепаха?». «Ви дуже розумний, юначе, дуже розумний, — сказала літня жіночка. — Проте черепаха стоїть на черепасі, і так аж до споду!».

Більшості людей уявлення про Всесвіт як нескінченну вежу з черепак видається, мабуть, смішним, але чому кожен з нас гадає, ніби він розумніший за інших? Що ми знаємо про Всесвіт і як ми довідалися про це? Звідки взявся Всесвіт і куди він рухається? Чи має Всесвіт початок, і коли так, тоді що було перед ним? Яка природа часу? Чи настане часові кінець? Чи можемо ми подорожувати в минуле? Останні досягнення в галузі фізики, що їх почасти уможливили й незвичайні новітні технології, можуть дати відповіді на деякі питання, що здавна цікавлять нас. Коли-небудь ці відповіді, певно, здаватимуться нам очевидними, так само, як те, що Земля обертається навколо Сонця. А можливо, й безглуздими, як вежа з черепак. Це покаже тільки час (хоч би який він був).

Ще 340 року до н. е. грецький філософ Аристотель у своїй книжці «Про небо» навів два вагомні аргументи про те, що Земля — це кругла сфера, а не площина. По-перше, він зрозумів, що місяцеві затемнення спричинює Земля, коли опиняється між Сонцем і Місяцем. Тінь Землі на Місяці завжди кругла,

а це можливо тільки в тому разі, якщо Земля кулястої форми. Якби Земля мала форму плоского диска, то тінь була б видовжена й еліптична, хіба що затемнення наставало б тільки тоді, коли Сонце стоїть точно над центром диска. По-друге, з досвіду своїх подорожей греки знали: Полярна зоря на небі в південних районах з'являється нижче, ніж у північних. (Полярна зоря повсякчас залишається над північним полюсом, тож світить там просто над спостерігачем, але спостерігачеві на екваторі видається, що вона — на горизонті). Оцінивши різницю у видимому розміщенні Полярної зорі в Єгипті й Греції, Аристотель навіть зумів обчислити, що довжина обводу Землі становить 400 000 стадій. Достеменно невідомо, яка завбільшки та стадія, проте вона приблизно дорівнює 200 ярдам, а отже Аристотелева оцінка майже вдвічі перевищує довжину, визнану тепер. Греки мали й третій аргумент, що Земля куляста: коли це не так, то чому ми спершу бачимо вітрила корабля над горизонтом, а вже згодом корпус?

Аристотель гадав, що Земля нерухома, а Сонце, Місяць, планети та зірки рухаються навколо неї по кругових орбітах. Відповідно до своїх містичних уявлень він уважав Землю за центр Всесвіту, а круговий рух — за найдосконаліший. Цю ідею в II ст. до н. е. Птолемей розвинув у закінчену космологічну модель. Земля стоїть у центрі, її оточують вісім сфер, що несуть на собі Місяць, Сонце і п'ять планет, відомих на той час: Меркурій, Венеру, Марс, Юпітер і Сатурн (рис. 1.1). Самі ж планети рухаються меншими колами, пов'язаними з відповідними сферами. Цим можна пояснити їхні досить складні траєкторії, спостережувані на небі. Найвіддаленіша від центра сфера несла на собі так звані нерухомі зорі, які, залишаючись на тих самих місцях одна щодо одної, обертаються по небу всі разом. Що лежить за межами останньої сфери, не зовсім зрозуміло, але воно, безперечно, вже не належить до спостережуваного Всесвіту.

Птолемеєва модель дала змогу досить точно передбачати розміщення небесних тіл. Але задля правильності Птолемеєві довелося припустити, що Місяць рухається такою траєкторією, яка іноді дає йому підійти до Землі вдвічі ближче, ніж у якийсь інший час. А це означало, що Місяць мав би іноді видаватися вдвічі більшим, ніж у якийсь інший час! Птолемей усвідомлював собі цей гандж. Проте з його моделлю, хоч і не повсюдно, за-

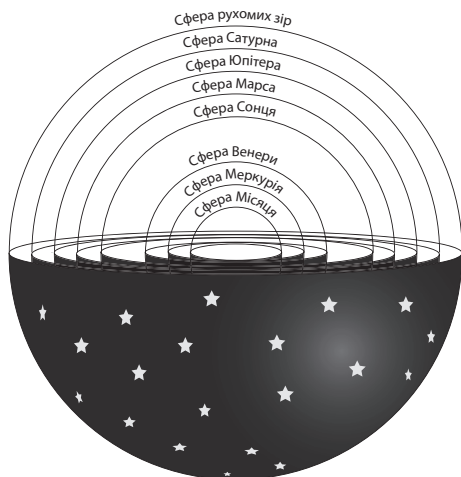


Рис. 1.1.

галом погодилися. Християнська церква визнала її за справжню картину Всесвіту, що відповідала Святому Письму й мала велику перевагу, залишаючи поза сферою нерухомих зір багато місця для раю і пекла.

Однак 1514 року польський священик Миколай Коперник запропонував простішу модель. (Попервах, боячись, певно, що церква затаврує його як єретика, він поширював свою модель анонімно). Його ідея полягала в тому, що нерухоме Сонце стоїть у центрі, а Земля та планети рухаються навколо нього по кругових орбітах. Минуло майже століття, перш ніж цю ідею прийняли серйозно. Тоді два астрономи — німецький, Йоган Кеплер, та італійський, Галілео Галілей, — почали публічно підтримувати теорію Коперника, дарма що визначені в ній орбіти не зовсім збігалися зі спостережуваними. Нищівного удару Аристотелевій (Птолемеєвій) теорії завдано 1609 року, коли Галілео почав спостерігати нічне небо крізь телескоп, що його тільки-но винайшли. Вивчаючи Юпітер, Галілео з'ясував, що цю планету супроводжують кілька малих супутників, або ж місяців, які рухаються по орбітах навколо неї. Це означало, що не всі небесні тіла обертаються по орбітах навколо Землі, як уважали Аристо-

тель і Птолемей. (Звісно, можна ще було припустити, що нерухома Земля міститься в центрі Всесвіту, а місяці Юпітера рухаються по надзвичайно складних траєкторіях навколо неї, створюючи враження, ніби вони обертаються навколо Юпітера. Але теорія Коперника була набагато простіша). Водночас Йоган Кеплер модифікував Коперникову теорію, припустивши, що планети рухаються не по колах, а по еліпсах (еліпс — видовжене коло). Нарешті передбачення почали відповідати спостереженням.

Що ж до Кеплера, то його здогад про еліптичні орбіти був лише гіпотезою *ad hoc* (для цього випадку) і, крім того, не зовсім красивою, бо еліпси, певна річ, менш досконалі, ніж кола. Майже випадково виявивши, що еліптичні орбіти якнайточніше відповідають спостереженням, він так і не зміг узгодити це відкриття зі своєю думкою про те, що планети обертаються навколо Сонця завдяки магнетним силам. Пояснення з'явилося набагато пізніше, 1687 року, коли сер Ісак Ньютон опублікував свої «Математичні основи натуральної філософії»⁶ — чи не найважливішу з усіх праць, присвячену природничим наукам. У ній Ньютон не лише висунув теорію про те, як рухаються тіла в просторі й часі, а й розробив складні математичні методи, що дали змогу аналізувати цей рух. Крім того, Ньютон постулював закон всесвітнього тяжіння, згідно з яким усяке тіло у Всесвіті притягається до іншого тіла, і що більші їхні маси і менша віддаль між ними, то більша сила тяжіння. Саме вона змушує падати предмети на землю. (Історія про те, що Ньютон винайшов цей закон, надихнувшись яблуком, яке впало йому на голову, майже напевне невірорідна. Сам Ньютон завжди розповідав, що ідея гравітації спала йому на думку, коли він сидів «у споглядальному настрої» і «був спонуканий падінням яблука»). Далі Ньютон показав, що, відповідно до його закону, сила тяжіння змушує Місяць рухатися по еліптичній орбіті навколо Землі, а Землю та інші планети — по еліптичній траєкторії навколо Сонця.

Модель Коперника допомогла позбутися Птолемеєвих небесних сфер, а разом і думки, що Всесвіт має якусь природну межу.

⁶ Лат. «*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*», або скорочена назва «*Principia*». Українською не перекладено, зокрема тому більше поширена назва, взята з російського перекладу «Математичні начала натуральної філософії». — Прим. ред.

«Нерухомі зорі» не змінюють свого положення, коли не брати до уваги кругового руху по небу, пов'язаного з тим, що Земля обертається навколо своєї осі. Тож цілком природно було припустити, що вони подібні до нашого Сонця, тільки набагато віддаленіші.

Ньютон розумів, що, згідно з його теорією гравітації, зорі мають притягатися одна до одної, і тому, здавалося б, не можуть залишатися зовсім нерухомими. Чи не впадуть вони всі разом у якійсь точці? 1691 року в листі до Ричарда Бентлі, ще одного провідного мислителя того часу, Ньютон стверджував, що так і справді могло б статися, якби ми мали тільки скінченну кількість зір у скінченній частині простору. Але, розважав він, якщо кількість зір нескінченна і вони розподілені більш-менш рівномірно в нескінченному просторі, то цього не станеться, бо немає ніякої центральної точки, до якої вони могли б падати.

Цей аргумент — приклад того, як легко вскочити в пастку, говорячи про нескінченність. У нескінченному Всесвіті будь-яку точку можна вважати за центр, бо кількість зір з усіх боків довкола неї нескінченна. Правильніше було б, як це зрозуміли згодом, розглянути скінченну систему, де всі зорі падатимуть одна на одну, а тоді знайти відповідь, як усе змінюватиметься, коли до цієї системи додавати дедалі більше зір, розподілених приблизно рівномірно поза нею. Відповідно до закону Ньютона, додані зорі майже ніяк не вплинуть на початкові, отже вони падатимуть із тою самою швидкістю. І хоч скільки додати зір, вони, як і перше, падатимуть одна на одну. Тепер ми вже знаємо, що нескінченної статичної моделі Всесвіту, де гравітація завжди притягальна, бути не може.

Ось такий цікавий відбиток загального стану наукової думки до двадцятого століття: нікому й на гадку не спало, що Всесвіт може розширюватися чи стискатися. Загалом вважали, що Всесвіт вічно існував у незмінному стані або був створений у певний скінченний момент часу в минулому приблизно таким, яким ми бачимо його сьогодні. Почасти це можна пояснити схильністю людей вірити у вічні істини, а також знаходити відраду в думці, що хай навіть вони самі старіють і вмирають, проте Всесвіт лишається вічним та незмінним.

Навіть ті, хто зрозумів, що Ньютонова теорія тяжіння спростовує статичність Всесвіту, не припускали, що він може

розширюватися. Натомість вони спробували змодифікувати теорію, зробивши гравітаційну силу відштовхувальною на дуже великих відстанях. Це істотно не вплинуло на передбачуваний рух планет, однак дало змогу нескінченному розподілові зір залишатися зрівноваженим, бо сили притягання між близькими зорями були скомпенсовані силами відштовхування від далеких. Однак тепер ми вважаємо, що така рівновага була б нестабільна: якби зорі в якійсь частині простору хоч трохи наблизилися одна до одної, то сили притягання між ними б зросли й перевищили сили відштовхування, отже, зорі й далі падали б одна на одну. А якби зорі хоч трохи віддалилися одна від одної, то переважили б сили відштовхування й відстань між зорями збільшилася б.

Ще одне заперечення нескінченного статичного Всесвіту зазвичай приписують німецькому філософу Гайнрихові Ольберсу, що 1823 року виклав свої міркування про цю теорію. Насправді ж її досліджувало багато Ньютонових сучасників, і Ольберсова цілком аргументована стаття була не перша. Однак вона зробилася найвідомішою. Все ускладнювалося тим, що в нескінченному статичному Всесвіті майже кожний промінь зору мав би вpirатися в якусь зорю. Отже, можна було б очікувати, що все небо сяятиме так само яскраво, як Сонце, навіть уночі. Контраргумент Ольберса полягав у тому, що світло від далеких зір потьмяніло б, бо його поглинула б проміжна матерія. Проте в такому разі сама проміжна матерія мала б нагрітися й засяяти так само яскраво, як зорі. Єдиний спосіб уникнути висновку, що все нічне небо має бути таке ж яскраве, як і поверхня Сонця, — припустити, що зорі світили не вічно, а загорілися в певний скінченний момент часу в минулому. Тоді ще, можливо, поглинальна матерія не розігрілася або ж світло від далеких зір не дійшло до нас. Але перед нами постає питання: чому запалали зорі?

Звичайно, проблему виникнення Всесвіту обговорювали з давніх-давен. Згідно з кількома ранніми космологічними теоріями і юдейсько-християнсько-мусульманськими уявленнями, Всесвіт виник у певний скінченний і не дуже віддалений момент часу в минулому. Однією з підстав для такого твердження була потреба в «першопричині», яка б могла пояснити існування Всесвіту. (Всяку подію у Всесвіті люди завжди пояснюва-

ли іншою подією, яка відбулася раніше, проте існування самого Всесвіту пояснити таким чином можна, тільки якщо він має початок). Інший аргумент висунув Святий Августин у своїй книжці «Про град Божий». Він зазначив, що цивілізація розвивається, і ми пам'ятаємо, хто зробив який учинок чи винайшов той чи той спосіб. Отже, людина, а також, певно, і Всесвіт, навряд чи існують довго. За дату створення Всесвіту Святий Августин визнав 5000 р. до н. е. відповідно до книги «Буття». (Цікаво, що ця дата не така вже й далека від останнього льодовикового періоду, який скінчився приблизно за 10000 років до н. е.; саме тоді, як твердять археологи, і виникла цивілізація).

Але Аристотелеві й більшості інших грецьких філософів була не до вподоби ідея створення Всесвіту, бо в ній відчувалося забагато божественного втручання. Тому вони вірили, що людська раса і довколишній світ існували й існуватимуть завжди. Наведений вище аргумент щодо прогресу античні мислителі також аналізували й дійшли висновку, що в світі періодично відбувалися повені та інші стихійні лиха, які раз у раз повертали людську расу до зародку цивілізації.

Питання про те, чи Всесвіт мав початок у часі і чи обмежений він у просторі, згодом якнайдокладніше розглянув філософ Імануїл Кант у своїй монументальній (і дуже заплутаній) праці «Критика чистого розуму», опублікованій 1781 року. Він назвав ці питання антиноміями (тобто суперечностями) чистого розуму, усвідомлюючи собі, що є однаково переконливі аргументи і для тези про виникнення Всесвіту, і для антитези про вічне існування його. Кантів аргумент на користь тези полягав у тому, що якби Всесвіт не мав початку, тоді всякій події передував би нескінченний проміжок часу, а це, на думку філософа, абсурд. Аргумент на користь антитези зводився до того, що якби Всесвіт мав початок, то цьому початкові передував би нескінченний проміжок часу, а тоді постає питання: чому Всесвіт виник саме в той, а не в інший момент часу? Насправді ж аргументи науковця для тези й антитези цілком тотожні. Вони ґрунтуються на його замовчаному припущенні, що час у минулому нескінченний, незалежно від того, чи Всесвіт існував вічно, чи ні. Як ми побачимо далі, до початку Всесвіту поняття часу взагалі позбавлене сенсу. Перший цю думку висловив Святий Августин. Коли

його спитали, що робив Господь, перш ніж створив Всесвіт, Августин не відповів, що Всевишній, мовляв, готував пекло для людей, які ставлять такі питання. Ні, він сказав, що час — властивість Всесвіту, створеного від Бога, а тому до початку Всесвіту часу не було.

Коли більшість людей вірила в суттєво статичний і незмінний Всесвіт, то питання, мав він початок чи ні, лежало тільки в метафізичній чи теологічній площині. Всі спостережувані явища однаково добре можна було б пояснити і теорією, де Всесвіт існував вічно, і теорією, згідно з якою він був урухомлений у певний скінченний момент часу, але так, щоб здалося, ніби він існував вічно. Однак 1929 року Едвін Габл досвідчився, що, куди не глянь, далекі галактики швидко рухаються від нас. Інакше кажучи, Всесвіт розширюється. А це означає, що раніше об'єкти були ближчі один до одного, ніж тепер. Виходить, що був, певно, той час (приблизно десять чи двадцять мільярдів років тому), коли всі об'єкти зосереджувалися в одному місці, а отже густина Всесвіту була нескінченно велика. Це відкриття нарешті перевело проблему виникнення Всесвіту в наукову площину.

Результати Габлових спостережень свідчили про певний час у минулому (так званий Великий вибух), коли Всесвіт був нескінченно малий і нескінченно густий. За таких умов усі наукові закони безсилі, а отже жодної можливості передбачити майбутнє немає. Якби перед цим і сталися якісь події, вони однаково не змогли б вплинути на те, що відбувається тепер. Тож їх можна знехтувати, бо вони не дають ніяких спостережених наслідків. Великий вибух можна вважати за початок відліку часу в тому розумінні, що раніші часи для нас просто залишаються невизначеними. Слід підкреслити, що такий початок часу до Габла ніхто не розглядав. У незмінному Всесвіті початок часу — це те, що його має визначити щось суще поза Всесвітом; у такому початку немає фізичної доконечності. Можна припустити, що Бог створив Всесвіт буквально в якийсь момент часу в минулому. Та якщо Всесвіт розширюється, то мають бути фізичні причини його початку. Можна, звісно, уявити собі, що Бог створив Всесвіт у момент Великого вибуху або й згодом (але так, щоб здавалося, наче стався Великий вибух). Однак безглуздо твердити, що Всесвіт створено раніше від Великого вибуху. Думка про те, що

Всесвіт повсякчас розширюється, не відкидає Творця, а лише уточнює час Його можливої праці!

Щоб розмірковувати про природу Всесвіту й дискутувати навколо того, чи він має початок і чи матиме кінець, треба чітко уявляти собі, що таке наукова теорія. Я обставитиму за тим, що теорія — це просто модель Всесвіту або ж якоїсь його частини з певним набором правил, що пов'язують величини в моделі з нашими спостереженнями. Вона існує тільки в наших думках і не має іншої дійсності (хоч що ми розуміємо під цим словом). Теорія добра, якщо вона задовольняє дві вимоги, а саме: дає змогу точно описувати широкий клас спостережень на основі моделі лише з кількома довільними елементами і робити цілком певні передбачення щодо результатів майбутніх спостережень. Наприклад, Аристотелева теорія про те, що все навколо складається з чотирьох елементів — землі, повітря, вогню та води, хоч вона була досить проста, щоб кваліфікувати, але не давала ніяких певних передбачень. Ньютонова теорія гравітації спиралася на ще простішу модель, де тіла притягаються одне до одного з силою, пропорційною до величини, що зветься їхньою масою, й обернено пропорційною до квадрата відстані між ними. Проте вона дає змогу з високою точністю передбачати рух Сонця, Місяця і планет.

Будь-яка фізична теорія завжди тимчасова в тому розумінні, що всього лише гіпотеза: ви ніколи не зможете довести її. Хоч скільки разів результати експериментів збігалися з теорією, ви однаково не можете бути впевнені, що надалі вони не суперечитимуть їй. До того ж ви можете спростувати теорію навіть одним спостереженням, яке не збігатиметься з теоретичними передбаченнями. Як наголошував філософ науки Карл Попер, добра теорія дає зробити низку передбачень, що їх узагалі можна спростувати або сфальсифікувати спостереженням. Щоразу, коли результати нових експериментів підтверджують передбачення, теорія показує свою спроможність, а наша довіра до неї зростає; та коли бодай одне нове спостереження не узгоджуватиметься з теорією, нам доведеться відкинути або змодифікувати її.

Принаймні саме так і мало б статися, однак ви завжди можете взяти під сумнів компетенцію спостерігача.

Насправді ж часто буває так, що нова теорія — це тільки розширення попередньої. Наприклад, дуже точні спостережен-

ня за планетою Меркурій виявили невеличку різницю між її рухом і передбаченнями Ньютонової теорії гравітації. Відповідно до Айнштайнової загальної теорії відносності, Меркурій мав би рухатися трохи інакше, ніж за Ньютоновою теорією. Той факт, що Айнштайнові передбачення збіглися зі спостереженнями, а Ньютонові не збіглися, був одним з вирішальних підтверджень нової теорії. Проте на практиці ми й досі користуємося з Ньютоновою теорією, бо в тих випадках, з якими ми зазвичай стикаємося, її передбачення майже не відрізняються від передбачень загальної теорії відносності. (Ньютонова теорія має ще велику перевагу в тому, що з нею набагато простіше працювати, ніж з Айнштайновою!).

Кінцева мета науки — створення єдиної теорії, що змогла б описати цілий Всесвіт. Проте більшість науковців воліє ділити це завдання на дві частини. По-перше, це закони, з яких ми дізнаємося, як Всесвіт змінюється з часом. (Знаючи вигляд Всесвіту у якийсь один момент, ми за допомогою цих фізичних законів зможемо встановити, яким він буде будь-коли пізніше). По-друге, це питання про початковий стан Всесвіту. Дехто гадає, що наука має працювати тільки над першою частиною, а питання про початковий стан Всесвіту — це, мовляв, справа метафізики або релігії. Прихильники такої думки кажуть, що Бог усемогутній, а тому міг запустити Всесвіт як завгодно. Якщо вони мають рацію, то Бог також міг зробити так, щоб Всесвіт розвивався абсолютно довільно. Однак, видається, Вишній постановив, щоб Всесвіт розвивався вельми впорядковано, відповідно до певних законів. Тож цілком резонно припустити, що існують ще й закони, яким підлягає початковий стан Всесвіту.

Як з'ясувалося, розробити теорію, що охоплюватиме цілий Всесвіт, дуже важко. Тож нам доводиться ділити велике завдання на дрібніші і створювати низку часткових теорій. Кожна з них описує і дає змогу передбачити якийсь обмежений клас спостережень, нехтуючи вплив інших величин або зображаючи ці величини простими наборами чисел. Можливо, що цей підхід абсолютно неправильний. Якщо все у Всесвіті цілком залежить від усього іншого, то, окремо досліджуючи частини завдання, годі було б, здається, наблизитися до повного розв'язку. Однак це, без сумніву, той шлях, завдяки якому ми досягли прогресу в

минулому. Класичний приклад — згадана вже Ньютонова теорія гравітації, згідно з якою сила тяжіння між двома тілами залежить тільки від одної характеристики кожного тіла, а саме від маси, проте зовсім не залежить від того, з чого складаються тіла. Отже, щоб обчислити орбіти Сонця і планет, теорія їхнього складу та структури не потрібна.

Сьогодні науковці описують Всесвіт за допомогою двох основних часткових теорій — загальної теорії відносності і квантової механіки. Ці теорії — великі інтелектуальні здобутки першої половини ХХ століття. Загальна теорія відносності описує гравітаційну силу й великомасштабну структуру Всесвіту, тобто структуру в масштабах від кількох миль⁷ до мільйона мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з двадцятьма чотирма нулями після неї) миль, до розмірів спостережного Всесвіту. А квантова механіка, своєю чергою, розглядає явища у всьох малих масштабах — таких як одна мільйонна однієї мільйонної частки дюйма. На жаль, ці дві теорії, як відомо, несумісні одна з одною: вони не можуть бути одночасно правильні. Один з основних напрямів сучасної фізики і головна тема цієї книжки — пошук нової теорії, яка б їх обох охопила, — теорії квантової гравітації. Поки що такої теорії немає, і нам, можливо, доведеться ще довго чекати на неї, але ми вже точно знаємо багато її властивостей. І в дальших розділах ми впевнимися, що нам уже чимало відомо про те, які передбачення ґрунтуватимуться на квантовій теорії гравітації.

Отже, коли ви вважаєте, що розвиток Всесвіту відбувається не довільно, а відповідно до певних законів, то вам зрештою доведеться об'єднати часткові теорії в єдину повну теорію, яка зможе описувати все у Всесвіті. Але в пошуку цієї єдиної теорії є фундаментальний парадокс. Усі викладені вище уявлення про наукові теорії мають своєю передумовою те, що ми розумні істоти, вільні спостерігати за Всесвітом так, як нам хочеться, і робити логічні висновки з того, що ми бачимо. У такій схемі слушно припустити, що ми могли б усе більше наближатися до розуміння законів, яким підвладний наш Всесвіт. Проте, якщо єдина повна теорія справді існує, то вона, певно, має впливати і на наші

⁷ 1 миля $\approx$ 1,6 км. — Прим. ред.

дії. Отже, вона має визначати наперед результат нашого пошуку її самої! А чому вона має визначати, що ми з усіх фактів зробимо правильні висновки? Може, вона з таким самим успіхом визначить, що ми дійдемо хибного висновку? Або й зовсім не дійдемо жодного висновку?

Єдина відповідь, яку я можу дати на це питання, базується на принципі Дарвіна про природний добір. Ідея полягає в тому, що в будь-якій популяції організмів, здатних до самовідтворення, неминучі варіації, спричинені генетичним матеріалом і вихованням різних індивідів. Ці відмінності означають, що деякі індивіди здатні краще за інших робити про навколишній світ правильні висновки і діяти відповідно до них. Такі індивіди матимуть більше шансів вижити й дати потомство, тому їхня модель поведінки і мислення домінуватиме. У минулому інтелект і здатність до наукового відкриття давали, безперечно, перевагу у виживанні. Щоправда, зовсім не очевидно, що це й досі так: наші наукові відкриття цілком можуть знищити нас усіх, а навіть якщо ні, то єдина повна теорія навряд чи зможе справити великий вплив на наші шанси вижити. Проте, якщо Всесвіт еволюціонує закономірно, тоді слід сподіватися, що наша здатність міркувати, набута внаслідок природного добору, виявиться також у пошуках єдиної повної теорії і допоможе уникнути хибних висновків.

А що часткових теорій уже досить, щоб робити точні передбачення в усіх ситуаціях, крім найекстремальніших, то пошук остаточної теорії Всесвіту, здається, важко виправдати з практичних міркувань. (Варто зазначити, що такі аргументи можна було б навести і проти теорії відносності, і проти квантової механіки, однак завдяки саме цим теоріям ми маємо ядерну енергетику і революційний прорив у мікроелектроніці!). Отже, відкриття єдиної повної теорії не може сприяти виживанню людського роду. І навіть не може впливати на наш спосіб життя. Але вже на світанку цивілізації людям не подобалися неспрозумені й незв'язані події. Вони жадали зрозуміти той порядок, що лежить в основі світу. Ми, як і наші попередники, прагнемо знати, чому ми тут і звідки взиялися. Великий потяг людства до знань — достатня підстава для нашого неперервного пошуку. І наша мета — це щонайповніший опис Всесвіту, в якому ми живемо.

Розділ 2

ПРОСТІР І ЧАС

Наші теперішні уявлення про рух сягають часів Галілея і Ньютона. Перед тим панувала думка Аристотеля. Він стверджував, що природний стан тіла — спокій і що рухається воно тільки під дією сили або імпульсу. Звідси випливало, що важче тіло має падати швидше за легке, бо воно дужче тяжітиме до землі.

Відповідно до Аристотелевої традиції, всі закони Всесвіту можна винайти самою тільки силою думки і перевіряти їх спостереженнями не треба. Тому до Галілея нікому навіть на думку не спадало пересвідчитися, чи справді тіла, що мають різну вагу, падають з різною швидкістю. Подейкують, що Галілей довів хибність Аристотелевого погляду, скидаючи різні предмети з похилої Пізанської вежі. Найпевніше, ця історія неправдива, однак Галілей робив щось подібне до того: він пологим схилом скочував додолу кулі різної ваги. Такий експеримент аналогічний до вертикального падіння важких тіл, тільки спостерігати його легше, бо швидкості в ньому менші. Галілеєві вимірювання засвідчили: швидкість усякого тіла незалежно від його ваги збільшується з часом на однакову величину. Наприклад, коли взяти кулю й пустити її схилом, який щодесья метрів знижується на один метр, то за одну секунду вона набере швидкості один метр за секунду, за дві секунди — два метри за секунду і так далі, хай би яка була вага кулі. Певна річ, олив'яна гиря падатиме швидше за перо, однак це тільки тому, що швидкість пера зменшуватиметься через опір повітря. Коли ж пустити додолу два тіла різної ваги, яким повітря не чинитиме великого опору, наприклад дві олив'яні гирі, то вони падатимуть з однаковою швидкістю. На Місяці, де немає повітря, а отже ніщо не сповільнює падіння, астронавт Дейвід Скот, зробивши дослід із пе-

ром та олив'яною гирею, виявив, що вони справді падають на поверхню одночасно.

Галілеєві вимірювання Ньютон використав як основу для своїх законів руху. В експериментах Галілея тіло завжди котилося схилом під дією одної сили (своїєї ваги), через що швидкість тіла постійно прискорювалася. Звідси випливало, що прикладена сила повсякчас змінює швидкість тіла, а не просто зрушує його, як уважали перше. А ще це означало, що коли на тіло не діятиме жодна сила, воно рухатиметься по прямій лінії зі сталою швидкістю. Цю думку вперше чітко висловив Ньютон у «Математичних основах натуральної філософії», опублікованих 1687 року. Тепер вона відома нам як перший Ньютонів закон. Як поводить себе тіло, коли на нього діє сила, визначає другий Ньютонів закон. Він твердить, що тіло буде прискорюватися, тобто його швидкість змінюватиметься пропорційно до величини сили. (Наприклад, якщо вдвічі збільшиться прикладена сила, то й прискорення тіла так само зросте вдвічі.) Однак що більша маса (кількість речовини) тіла, то меншим буде його прискорення. (Діючи на тіло вдвічі більшої маси, та ж сила надасть йому вдвічі меншого прискорення.) Відомий приклад — автомобіль: потужніший двигун надає більшого прискорення; але що важчий автомобіль, то меншого прискорення надасть йому той самий двигун. Крім законів руху, Ньютон винайшов закон, якому підлягає сила тяжіння. Цей закон твердить: усяке тіло притягає до себе інше тіло з силою, пропорційною до маси кожного з цих тіл. Отже, сила тяжіння між двома тілами буде вдвічі більша, якщо одне з тіл (наприклад, тіло А) матиме вдвічі більшу масу. Такий висновок цілком сподіваний, бо легко собі уявити нове тіло А складеним з двох тіл однакової (початкової) маси. До кожного з них тіло В тяжітиме з однаковою (початковою) силою. Тож сумарна сила між новим тілом А і тілом В буде вдвічі більша за попередню (початкову) силу. А якщо, наприклад, одне з тіл матиме вдвічі більшу масу, а друге — втричі більшу, то сила взаємодії між ними зросте вшестеро. Тепер зрозуміло, чому всі тіла падають з однаковою швидкістю: на тіло з удвічі більшою вагою діятиме вдвічі більша сила тяжіння, але й маса такого тіла буде вдвічі біль-

ша. Згідно з другим Ньютоновим законом, ці два ефекти точно компенсують один одного, тож прискорення в усіх випадках буде однакове.

Ньютонів закон тяжіння також твердить: що далі одне від одного тіла, то менша сила діє між ними. Відповідно до цього закону, гравітаційне притягання зорі буде на чверть менше, ніж у такої ж зорі, але вдвічі ближчої. Ньютонів закон тяжіння дає змогу з великою точністю передбачити орбіти Землі, Місяця і планет. Якби закон був інакший і сила гравітаційного притягання зорі з відстанню зменшувалася чи збільшувалася швидше, то орбіти планет не були б еліптичні; вони або рухались би по спіралі до Сонця, або віддалялися від нього.

Аристотелеві уявлення істотно відрізнялися від Галілеєвих і Ньютонових тим, що Аристотель уважав спокій за особливий стан, у якому завжди перебуває всяке тіло, коли на нього не діє якась сила чи імпульс. Він, зокрема, гадав, що й Земля перебуває в стані спокою. Проте, як впливає з Ньютонових законів, єдиного мірила спокою немає. Можна з однаковою певністю твердити, що тіло А перебуває в стані спокою, а тіло В рухається зі сталою швидкістю відносно тіла А, або ж, навпаки, тіло В перебуває в стані спокою, а тіло А рухається. Коли ж, наприклад, на якийсь час забути про обертання Землі і про її рух навколо Сонця, то можна сказати, що Земля перебуває в стані спокою, а поїзд мчить по ній на північ зі швидкістю дев'яносто миль за годину, або ж, навпаки, що поїзд перебуває в стані спокою, а Земля рухається під ним на південь зі швидкістю дев'яносто миль за годину. Якби в цьому поїзді хтось робив досліди з рухомими тілами, то впевнився б, що всі Ньютонові закони, як і раніше, справедливі. Наприклад, граючи в поїзді у настільний теніс, можна з'ясувати, що траєкторія м'ячика підлягає Ньютоновим законам, як і тоді, коли б хто грав на нерухомій поверхні. Тож не можна достеменно сказати, що саме рухається — потяг чи Земля.

А що нема абсолютного мірила спокою, то ніхто не може встановити, чи дві різночасні події сталися в одній точці простору, чи в різних. Припустімо, наприклад, що в поїзді тенісний м'ячик відскакує від стола вгору і падає вниз, ударяючись двічі, через секунду, об стіл у тому самому місці. Спостерігачеві, що стоїть при колії, два відскоки здаватимуться такими, що відбу-

лися на відстані десь сорока метрів один від одного, бо саме такий шлях проїде поїзд за час між двома ударами м'ячика об стіл. Отже, неможливість абсолютного спокою означає, що якийсь події годі приписати абсолютне місце в просторі, хоч Аристотель тримався протилежної думки. Положення подій у просторі й відстані здаватимуться різними пасажирові поїзда та людині при колії, і немає жодної причини віддавати перевагу положенню відносно котрогось зі спостерігачів.

Ньютона дуже непокоїло те, що немає абсолютного положення, чи, як його називали, абсолютного простору, бо це не узгоджувалося з його ідеєю абсолютного Бога. Фактично він відмовився визнати неможливість абсолютного простору, дарма що вона випливала з його законів. Багато хто дуже гостро критикував Ньютона за цю ірраціональну віру, а найбільше єпископ Берклі — філософ, який уважав, що всі матеріальні об'єкти, простір і час — то ілюзія. Дізнавшись про думку Берклі, славнозвісний доктор Джонсон вигукнув: «Я спростую її отак!» — і вдарив носком у великий камінь.

І Аристотель, і Ньютон вірили в абсолютний час. Інакше кажучи, вони гадали, що можна однозначно виміряти інтервал часу між двома подіями і що результат буде однаковий, хоч би хто вимірював, аби послуговувався добрим годинником. Час був цілком відокремлений і незалежний від простору. Саме в такому підході більшість людей убачала здоровий глузд. Однак нам довелося змінити свою думку про час і простір. Очевидно, наші уявлення, засновані на здоровому глузді стосуються більше до яблук чи планет, тобто до об'єктів, що рухаються більш-менш повільно, і будуть зовсім недоречні щодо речей, які переміщуються зі швидкістю, близькою до світлової.

Те, що світло поширюється зі скінченною, хоч і дуже високою швидкістю, вперше виявив 1676 року данський астроном Оле Кристенсен Ремер. Він спостеріг, що супутники Юпітера, рухаючись навколо своєї планети, з'являються позаду неї не через однакові проміжки часу, як слід очікувати, якщо швидкість руху супутників стала. Земля і Юпітер рухаються навколо Сонця, а тому відстань між ними змінюється. Ремер завважив: що далі ми від Юпітера, то пізніше для нас настають затемнення його супутників. Він пояснив це тим, що світло від супутни-

ка іде до нас довше, коли ми перебуваємо далі. Проте результати його вимірювань змін відстані від Землі до Юпітера були не дуже точні, тому й значення швидкості світла, що його обчислив Ремер, становило 140000 миль за секунду, тоді як відоме нам тепер значення — 186000 миль за секунду. Однак досягнення Ремера було видатне, бо він зумів не тільки довести, що світло поширюється зі скінченною швидкістю, а й виміряти її, та ще й за одинадцять років перед публікацією Ньютонових «Математичних основ». Належної теорії поширення світла не було аж до 1865 року. Саме тоді британському фізику Джеймсу Клеркові Максвелу вдалося поєднати часткові теорії, що ними описували електричну та магнетну сили. Відповідно до рівнянь Максвелла, в об'єднаному електромагнетному полі можуть існувати хвилеподібні збурення, що ширяться з фіксованою швидкістю, як-от брижі на поверхні ставка. Якщо довжина (відстань між двома сусідніми гребенями) цих хвиль становить один метр і більше, то такі хвилі тепер називають радіохвилями. Серед коротших хвиль розрізняють мікрохвилі (завдовжки кілька сантиметрів) та інфрачервоні хвилі (завдовжки більш ніж одна десятитисячна сантиметра)⁸. Довжина хвилі видимого світла становить від сорока до вісімдесяти мільйонних сантиметра. Ще коротшу довжину мають хвилі ультрафіолетового, Рентгенового й гама-проміння.

Теорія Максвелла передбачила, що і радіохвилі, і світлові хвилі мають поширюватися з певною фіксованою швидкістю. А що теорія Ньютона заперечила ідею абсолютного спокою, то, кажучи про фіксовану швидкість світла, треба було зазначити, відносно чого її виміряно.

З огляду на це з'явилася ідея про існування речовини з назвою «етер», що заповнювала собою все, навіть «порожній» простір. Світлові хвилі мають поширюватися в етері так само, як звукові хвилі в повітрі, а отже їхня швидкість — це швидкість відносно етеру. Спостерігачі, рухаючись із різною швидкістю відносно етеру, бачитимуть, що світло так само приходить до них з різною швидкістю, але швидкість світла щодо етеру залишиться фіксованою. Зокрема, якщо Земля рухається навко-

⁸ За різними класифікаціями, від 0,7, 0,75 або 0,78 мкм. — *Прим. ред.*

ло Сонця в етері, то швидкість світла, виміряна в напрямі руху Землі відносно етеру (коли ми наближаємося до джерела світла), має бути вища, ніж швидкість світла, виміряна під прямим кутом до цього руху (коли ми не наближаємося до джерела світла). 1887 року Альберт Майкельсон (який згодом став першим американцем, відзначеним Нобелівською премією з фізики) і Едвард Морлі провели в Кейсівській школі прикладних наук у Клівленді дуже точний експеримент. Вони порівнювали швидкість світла, виміряну в напрямі руху Землі, зі швидкістю, виміряною перпендикулярно до нього. На свій превеликий подив, вони виявили, що ці значення однаковісінькі!

З 1887 до 1905 року зроблено кілька спроб (найвідоміша — голандського фізика Гендрика Лоренца) пояснити результат експерименту Майкельсона — Морлі тим, що, рухаючись в етері, об'єкти стискаються, а годинники сповільнюються. Однак 1905 року в своїй знакомитій праці невідомий доти клерк швейцарського патентного бюро Альберт Айнштайн зауважив, що ідея етеру взагалі непотрібна, якщо відмовитися від ідеї абсолютного часу. За кілька тижнів таку саму думку висловив і провідний французький математик Анрі Пуанкаре. Айнштайнові аргументи були ближчі до фізики, ніж аргументи Пуанкаре, що розглядав цю проблему як математичну. Зазвичай саме Айнштайна вважають за творця нової теорії, але й ім'я Пуанкаре пов'язують з опрацюванням її значної частини⁹.

Засадничий постулат теорії відносності, як її назвали, такий: наукові закони мають бути однакові для всіх спостерігачів, що вільно рухаються, незалежно від їхньої швидкості. Це твердження було справедливе для Ньютонових законів руху, але відтепер його поширили й на теорію Максвела та швидкість світла: всі спостерігачі, хоч з якою швидкістю вони рухаються, матимуть однаковий результат вимірювання швидкості світла. З цього простого принципу випливає кілька значних висновків. Найвідоміші з них, очевидно, еквівалентність маси й енергії, виражена у славнозвісному рівнянні Айнштайна $E = mc^2$ (де E — енергія, m — маса, c — швидкість світла), і закон, відповідно до якого ніщо не може ру-

⁹ А. Пуанкаре (1854–1912) неодноразово висували на здобуття Нобелівської премії з фізики, зокрема за праці в галузі теорії відносності. — *Прим. ред.*

хатися швидше за світло. Через еквівалентність енергії й маси енергія, що її набуває об'єкт унаслідок руху, має доповнювати його масу. Інакше кажучи, що більша швидкість руху об'єкта, то важчим він стає. Правда, цей ефект вагомий тільки для об'єктів, які рухаються зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Наприклад, маса об'єкта, що рухається зі швидкістю 10 відсотків від швидкості світла лише на 0,5 відсотка більша від нормальної, тоді як на швидкості 90 відсотків від швидкості світла маса рухомого об'єкта зростає більш як удвічі проти нормальної маси. І що більше швидкість об'єкта наближається до швидкості світла, то хутчіше зростає маса, а отже на подальше прискорення потрібна чимраз більша енергія. Насправді ж об'єкт ніколи не зможе рухатися зі швидкістю світла, бо тоді його маса стала б нескінченно велика, а щоб досягти цього, потрібно була б, з огляду на еквівалентність маси й енергії, нескінченна кількість енергії. Через це всякий нормальний об'єкт, підлягаючи теорії відносності, приречений рухатися зі швидкістю, завжди меншою за швидкість світла. І тільки світло чи інші хвилі, що не мають власної маси, можуть переміщуватися зі швидкістю світла.

Не менш важливе досягнення теорії відносності полягає в тому, що вона докорінно змінила наші уявлення про час і простір. Згідно з теорією Ньютона, якщо світловий імпульс послано з однієї точки до другої, то різні спостерігачі, вимірюючи час переміщення світла, дістануть однаковий результат (бо ж час абсолютний), але відстань, яку подолає світло, вони можуть оцінити по-різному (бо ж простір не абсолютний). А що швидкість світла — це лише відстань, яку долає світло, поділена на витрачений час, то різні спостерігачі дістануть різні значення швидкості світла. Проте, відповідно до теорії відносності, всі спостерігачі мають бути одностайні щодо швидкості поширення світла. І якщо вони не дійшли згоди про відстань, яку пододало світло, то й згоди про витрачений час поміж них не буде. (Час — це відстань, щодо якої поміж спостерігачів немає згоди, поділена на швидкість, щодо якої вони дійшли згоди). Інакше кажучи, теорія відносності поклала край ідеї абсолютного часу! Виявилося, що кожний спостерігач повинен мати свій вимір часу, зафіксований власним годинником, і що виміри однаковими годинниками в різних спостерігачів не конче збігаються.

Усякий спостерігач може визначити, де й коли відбулася подія, способом радіолокації, пославши світловий імпульс або радіохвилю. Якась частина імпульсу відіб'ється й повернеться назад, тож спостерігач виміряє проміжок часу, за який до нього дійде відбитий сигнал. Отже, тут час події — це середина інтервалу між моментами, коли імпульс був посланий і коли відбитий сигнал повернувся до спостерігача. Відстань до події дорівнює половині часу проходження імпульсу туди й назад, помноженій на швидкість світла. (Під подією тут ми розуміємо те, що відбувається в певній точці простору в певний момент часу). Сказане вище пояснює часопросторова діяграма (рис. 2.1).

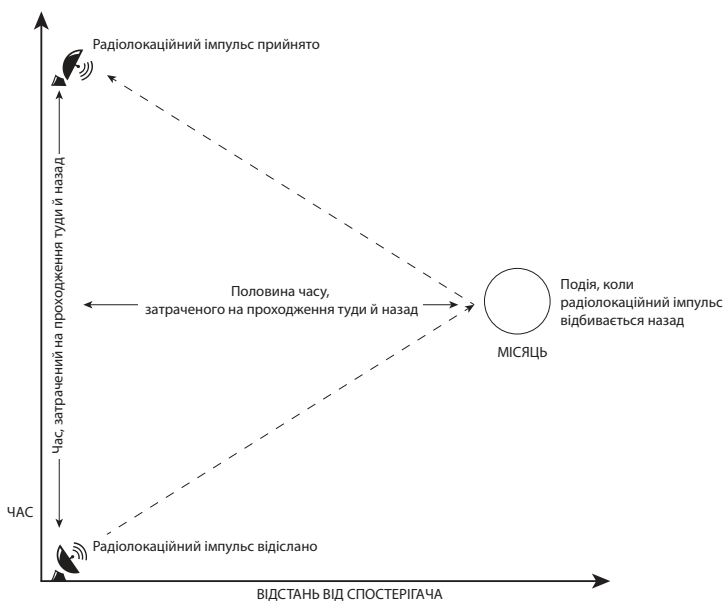


Рис. 2.1. Час вимірюється по вертикалі, а відстань від спостерігача вимірюється горизонтально. Спостерігачів шлях у просторі та часі відображається як вертикальна лінія зліва. Шляхи світлових променів до і від події — діагональні лінії.

За допомогою цього методу спостерігачі, рухаючись один відносно одного, припишуть тій самій події різний час і місце

в просторі. Жоден з результатів вимірювань, що їх робили різні спостерігачі, не може бути правильніший за інші, однак усі результати взаємопов'язані. Кожний зі спостерігачів зможе точно визначити час і місце, що їх припише події всякий інший спостерігач, але тільки тоді, коли знатиме швидкість іншого спостерігача відносно себе.

Тепер ми використовуємо тільки цей метод, щоб точно вимірювати відстані, бо час ми можемо вимірювати точніше, ніж довжину. Навіть метр означено як відстань, яку долає світло за 0,000000003335640952 секунди, якщо вимірювати час цезієвим годинником. (Саме ж число відповідає історичному означенню метра як відстані між двома позначками на платиновому стрижні, що його зберігають у Парижі). Ми також можемо по-слуговуватися й новою, зручнішою одиницею довжини — світловою секундою, що являє собою відстань, яку долає світло за одну секунду. У теорії відносності ми тепер означуємо відстань через час і швидкість світла, звідки автоматично випливає, що, вимірюючи швидкість світла, всі спостерігачі дістануть однаковий результат (1 метр за 0,000000003335640952 секунди). Тож нема потреби запроваджувати поняття етеру, бо виявити, чи існує він насправді, як засвідчив експеримент Майкельсона — Морлі, годі. Однак теорія відносності змушує нас докорінно змінити уявлення про час і простір. Нам доводиться визнати, що час зовсім не відокремлений і незалежний від простору, а творить разом з ним об'єкт, званий простором-часом, або часопростором.

Усім відомо, що положення будь-якої точки в просторі можна описати трьома числами, або координатами. Наприклад, можна сказати, що певна точка в кімнаті міститься за сім футів від однієї стіни, за три фути від другої стіни і за п'ять футів від підлоги. Або що точка лежить на певній широті, довготі й висоті над рівнем моря. Отже, в пригоді нам можуть стати будь-які три прийнятні координати, хоч, треба пам'ятати, вони завжди мають обмежене застосування. Ніхто, приміром, не визначатиме положення Місяця віддалями в милях на північ і на захід від площі Пікаділі і висотою у футах над рівнем моря. Натомість можна було б зазначити відстані від Сонця й від площини, де лежать орбіти планет, а також кут між лінією, що сполучає Місяць із Сонцем, і лінією, що з'єднує Сонце з якоюсь близькою зорею,

наприклад Альфою Кентавра (Центавра). Хоч ці координати навряд чи допоможуть описати положення Сонця в нашій Галактиці чи положення нашої Галактики в місцевій групі галактик. Але цілий Всесвіт можна уявно розділити на перекривні шматки. У кожному шматку можна використовувати інший набір з трьох координат, описуючи положення певної точки.

Подія — це те, що відбувається в певній точці простору в певний момент часу. Отже, її можна схарактеризувати чотирма числами, або координатами. До того ж ці координати знов-таки довільні; можна скористатися з будь-яких трьох чітко означених просторових координат і з будь-якої міри часу. В теорії відносності немає ніякої реальної відмінності між просторовими й часовими координатами, як і немає ніякої реальної різниці між будь-якими двома просторовими координатами. Можна легко перейти до нового набору координат, у якому, приміром, перша просторова координата буде комбінацією першої і другої попередніх просторових координат. Наприклад, положення якоїсь точки на Землі можна визначити не віддалями в милях на північ і на захід від площі Пікадилі, а віддалями від неї на північний схід і на північний захід. Так само в теорії відносності можна перейти й до нової часової координати, яка дорівнюватиме сумі попередньої часової координати (в секундах) і просторової координати (в світлових секундах) на північ від Пікадилі.

Часто доцільно використовувати чотири координати події, щоб описати її положення в чотиривимірному просторі, який зветься часопростором. Хоч уявити собі чотиривимірний простір годі. Особисто я заледве уявляю собі тривимірний простір! Однак зображати двовимірний простір, як-от поверхня Землі, досить легко. (Поверхня Землі двовимірна, бо положення будь-якої точки можна задати двома координатами — широтою і довготою.) Я переважно використовуватиму діаграми, у яких час напрямлений вертикально, а один з просторових вимірів — горизонтально. Інші два просторові виміри я оминатиму або інколи зображатиму один з них у перспективі. (Приклад такої часопросторової (просторочасової) діаграми можна побачити на рисунку 2.1).

Наприклад, на рисунку 2.2 вісь вимірюваного в роках часу має вертикальний напрям, а вісь вимірюваної в милях відстані

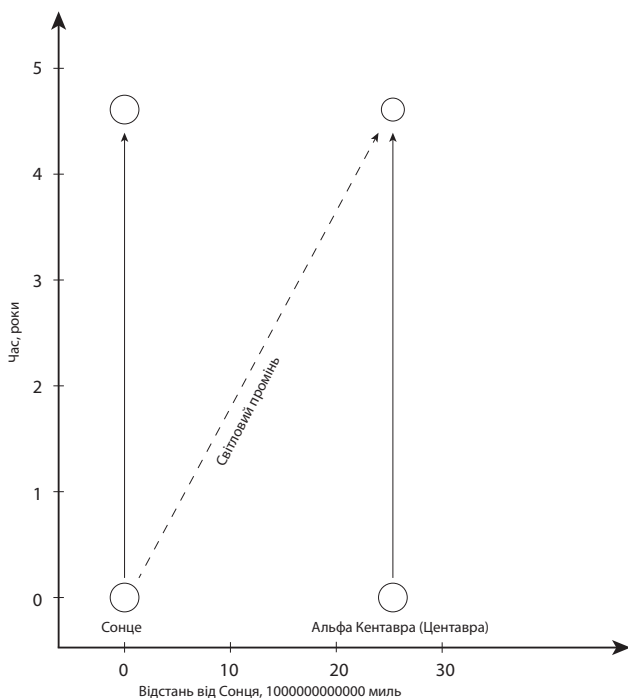


Рис. 2.2.

вздовж лінії від Сонця до Альфи Кентавра — горизонтальний. Траєкторії руху Сонця й Альфи Кентавра в часопросторі показано на діаграмі вертикальними лініями: одна — ліворуч, друга — праворуч. Промінь світла від Сонця йде навскіс і досягне Альфи Кентавра за чотири роки.

З рівнянь Максвелла, як ми вже знаємо, випливає, що швидкість світла — стала й незалежна від швидкості джерела величина. Це підтверджено точними вимірюваннями. Отже, імпульс світла, випромінений у певний момент у певному місці ширитиметься навсбіч, утворюючи світлову сферу, до того ж її розмір і положення не залежатимуть від швидкості джерела. Після однієї мільйонної частки секунди світло утворить сферу з радіусом 300 метрів; після двох мільйонних часток секунди радіус сфери становитиме 600 метрів тощо. Це подібно до бриж від ки-

нутого у воду каменя. Вони розбігаються по поверхні ставка колом, яке раз у раз більшає. Якщо скласти стосом миттєві фотографії розбіжних бриж, то щораз ширше коло на кожному з них буде частиною конуса з вершиною в тому місці, де камінь торкнувся води (рис. 2.3).

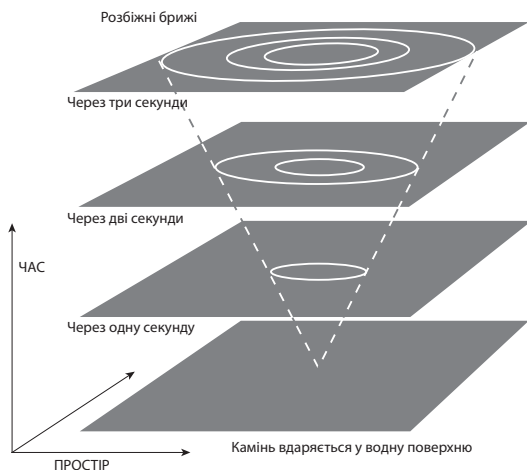


Рис. 2.3.

Тож і світло, ширячись від якоїсь події, утворює в чотиривимірному часопросторі тривимірний конус. Цей конус називають світловим конусом майбутнього події. Так само можна накреслити й другий конус, що зветься світловим конусом минулого і становить набір подій, через які світловий імпульс здатний досягти цієї події (рисунок 2.4).

Якщо сталася подія Р, то решту подій у Всесвіті можна розділити на три класи. Ті події, яких може досягти від події Р частинка або хвиля, рухаючись зі швидкістю, не більшою за швидкість світла, належать до майбутнього події Р. Вони лежать у середині або на поверхні щораз більшої сфери світла, випромінюваного від події Р, а отже всередині або на світловому конусі майбутнього події Р на часопросторовій діаграмі. Те, що відбувається в Р, може вплинути тільки на майбутні події Р, бо ніщо не може рухатися швидше за світло.

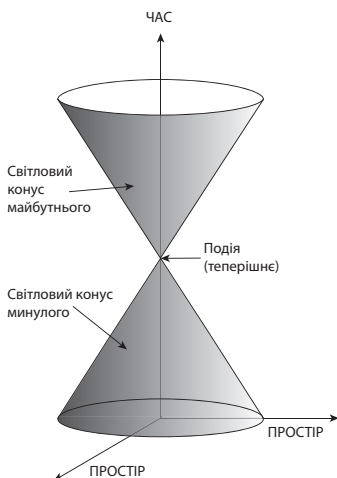


Рис. 2.4.

Так само минуле події P ми можемо означити як сукупність усіх подій, що від них можна досягти події P зі швидкістю, не більшою за світлову. Отже, ця сукупність подій може впливати на те, що відбудеться в P . Про події, які не належать до майбутнього чи минулого P , кажуть, що вони відбуваються деінде відносно P .

Те, що відбувається деінде, не може ні впливати на подію P , ні зазнати її впливу. Наприклад, якщо Сонце просто в цей самий момент перестане світити, події на Землі в цей самий час не зазнають ніякого впливу, бо відбуваються деінде відносно тої події, коли Сонце згасло (рис. 2.5).

Ми дізнаємося про це аж за вісім хвилин — саме стільки часу потрібно світлу, щоб подолати відстань від Сонця до нас. Тільки після цього події на Землі опиняться в світловому конусі майбутнього події, коли згасло Сонце. Саме тому ми не знаємо, що відбувається цієї миті десь у Всесвіті: світло, яке дійшло до нас від далеких галактик, було випромінене мільйони років тому, а світло від найдалшого видимого об'єкта йшло до нас майже вісім мільярдів років. Тож, дивлячись на Всесвіт, ми бачимо його фактично в минулому.

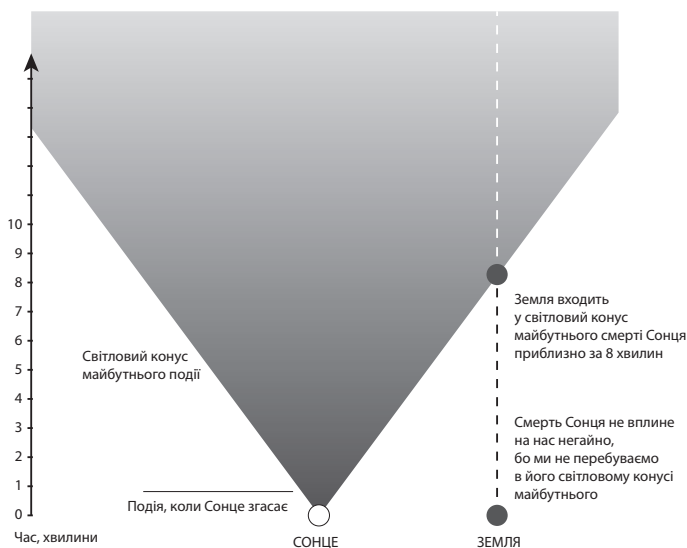


Рис. 2.5.

Знехтувавши, як Айнштайн і Пуанкаре 1905 року, гравітаційні ефекти, ми матимемо так звану спеціальну теорію відносності. Для кожної події в часопросторі ми можемо побудувати світловий конус (сукупність усіх можливих у часопросторі шляхів світла, випроміненого від цієї події), а що швидкість світла однакова для будь-якої події й у будь-якому напрямі, то всі світлові конуси будуть ідентичні й зорієнтовані в одному напрямі. Крім того, ця теорія твердить: ніщо не може рухатися швидше за світло. Це означає, що траєкторія будь-якого об'єкта в часі й просторі становить лінію, яка лежить усередині світлового конуса для будь-якої події на ній (рис. 2.6). Спеціальна теорія відносності успішно пояснила, що швидкість світла однакова для всіх спостерігачів (як показав експеримент Майкельсона — Морлі), і правильно описала те, що відбувається, коли тіла рухаються зі швидкістю, близькою до світлової. Однак вона суперечить Ньютоновій теорії гравітації, згідно з якою об'єкти тяжіють один до одного з силою, що залежить від відстані між ними. Це означає, що якби одне тіло зрушилося, то сила притягання між ними

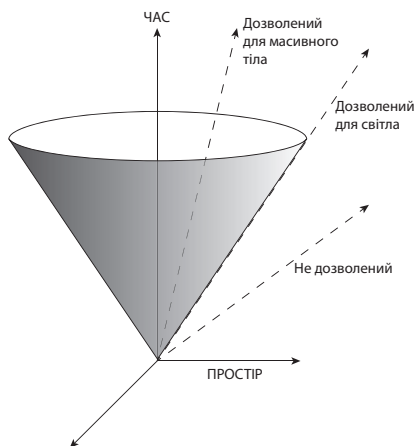


Рис. 2.6.

миттю змінилася б. Інакше кажучи, швидкість поширення гравітаційних ефектів має бути нескінченна, а не така, що дорівнює швидкості світла чи менша від неї, як цього вимагає спеціальна теорія відносності. З 1908 до 1914 року Айнштайн зробив кілька невдалих спроб винайти теорію гравітації, яка б узгоджувалася зі спеціальною теорією відносності. Нарешті, 1915 року він запропонував те, що ми тепер називаємо загальною теорією відносності.

Айнштайн зробив революційне припущення: гравітація — це не звичайна сила, а наслідок того, що часопростір не плоский, як уважали раніше, а викривлений, або «здеформований» розподілом маси й енергії в ньому. Сила, звана гравітацією, не змушує такі тіла, як Земля, рухатися викривленою орбітою; вони просто рухаються у викривленому просторі найбільше відповідним до прямого шляхом, який називають геодезичною. Геодезична — це найкоротший (або найдовший) шлях між двома близькими точками. Наприклад, поверхня Землі — двовимірний викривлений простір. Геодезична на Землі називається великим колом, і це найкоротший маршрут між двома точками (рис. 2.7). А що геодезична — найкоротший шлях між будь-якими двома аеропортами, то саме такий маршрут задають диспетчери авіакомпаній пілотам. Відповідно до загальної теорії відносності, тіла завжди рухають-

ся прямими лініями в чотиривимірному часопросторі, але в нашому тривимірному просторі нам здається, що вони рухаються вигнутими траєкторіями. (Це все одно, що дивитися на літак, який летить над горбастою місцевістю. Хоч він і рухається по прямій у тривимірному просторі, але його тінь на двовимірній поверхні Землі рухається криволінійною траєкторією.)

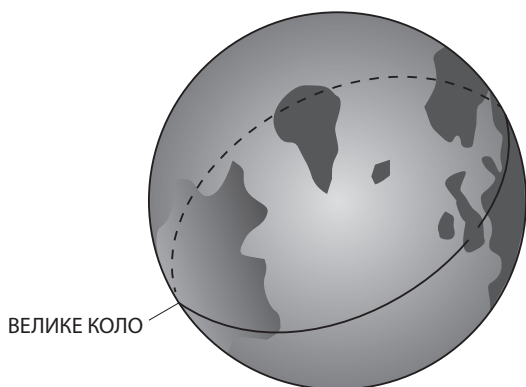


Рис. 2.7.

Маса Сонця так викривляє часопростір, що нам у тривимірному просторі здається, ніби Земля рухається круговою орбітою, хоч насправді вона рухається прямолінійно в чотиривимірному часопросторі.

Фактично, орбіти планет, передбачені загальною теорією відносності, майже збігаються з передбаченими Ньютовою теорією гравітації. Однак у випадку Меркурія — найближчої до Сонця планети, яка, зазнаючи найсильнішого гравітаційного впливу, має досить витягнуту орбіту — загальна теорія відносності передбачає, що довга вісь еліпса повинна обертатися навколо Сонця зі швидкістю близько одного градуса за десять тисяч років. Хоч цей ефект і незначний, проте його помітили ще до 1915 року, він став одним із перших підтверджень Айнштейнаної теорії. Останніми роками за допомогою радара були виміряні ще менші відхилення орбіт інших планет від Ньютонових передбачень, і всі вони узгоджуються з передбаченнями загальної теорії відносності.

Промені світла теж мають рухатися по геодезичних у часопросторі. Те, що простір викривлений, знов-таки означає, що світло більше не шириться в ньому прямолінійно. Загальна теорія відносності передбачає, що світлові промені згинатимуться в гравітаційних полях. Наприклад, світлові конуси точок поблизу Сонця будуть трохи загнуті досередини під дією маси Сонця. Це означає, що світло від далекої зорі, яке проходить поблизу Сонця, відхилиться на невеличкий кут, і спостерігач на Землі бачитиме цю зорю в іншому місці (рис. 2.8). Певна річ, якби світло від зорі завжди проходило біля Сонця, ми не змогли б сказати, чи то відхиляється світло, чи то зірка і справді там, де ми її бачимо. Але через те, що Земля обертається навколо Сонця, різні зорі опиняються за ним, і їхнє світло відхиляється. Отже, вони змінюють своє видиме положення відносно інших зірок. Зазвичай цей ефект дуже важко помітити, бо сонцеве світло не дає бачити зір, що з'являються на небосхилі поблизу Сонця. Однак така можливість з'являється під час сонцевого затемнення, коли Місяць затуляє собою сонцеве світло. 1915 року, в самісінський розпал Першої світової війни, годі було перевірити Айнштайнове передбачення щодо відхилення світла. І тільки 1919 року в Західній Африці британська експедиція, спостерігаючи затемнен-

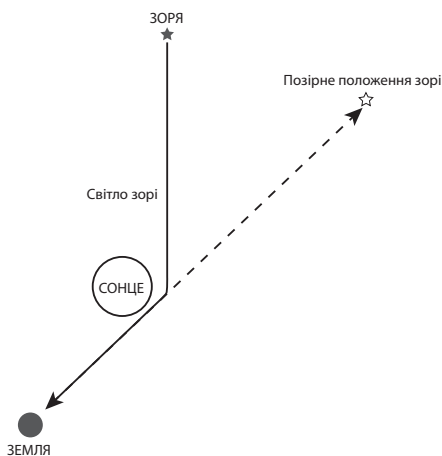


Рис. 2.8.

ня, підтвердила, що світло справді відхиляється від Сонця, як і передбачала теорія. Те, що британські науковці довели правильність німецької теорії, було сприйняте як великий повоєнний акт примирення між двома країнами. Але, хоч це й видається іронічним, подальша експертиза фотографій, зроблених під час цієї експедиції, виявила помилки такого ж рівня, як і сам ефект, що його намагалися виміряти. Вимірювання, що їх зробили англієць, були або щасливим збігом обставин, або (і таке часто трапляється в науці) випадком, коли дістають те, що хочуть дістати. Щоправда, відхилення світла точно підтвердила згодом низка інших спостережень.

Ще одне передбачення загальної теорії відносності полягає в тому, що поблизу такого масивного тіла, як Земля, час спливає повільніше. Це можна пояснити зв'язком між енергією світла і його частотою (тобто числом хвиль світла за секунду): що більша енергія, то вища частота. Світло, поширюючись угору в гравітаційному полі Землі, втрачає енергію, і тому його частота зменшується. (Це означає, що проміжок часу між двома сусідніми гребенями хвилі збільшується.)¹⁰ Спостерігачеві, який перебуває на висоті, здаватиметься, що внизу все відбувається повільніше. Це передбачення перевірили 1962 року за допомогою двох дуже точних годинників, установлених на верхній і нижній частині водогінної вежі. Виявилося, що годинник, ближчий до поверхні Землі, іде повільніше, а це цілком узгоджується з загальною теорією відносності. З огляду на появу надточних систем навігації, що діють на основі сигналів від супутників, різниця в ході годинників на різних висотах має тепер велике прак-

¹⁰ Що частота світла зменшується, коли світло поширюється угору, – твердження хибне. Справді, «що вища енергія, то більша частота». Але про яку енергію йдеться у квантовій фізиці? Про повну енергію! Наприклад, якщо камінь летить угору, то його повна, тобто кінетична плюс потенціальна, енергія не змінюється, а тим самим не змінюється і частота квантовомеханічної хвилі, пов'язаної з каменем. Світло, що поширюється угору, випромінюється з меншою частотою, тому що час поблизу Землі спливає повільніше. Даючи хибне пояснення червоного зсуву (поряд з правильним), Гокінг повторює помилку багатьох великих і видатних фізиків, зокрема нобелівських лавреатів Макса Борна, Річарда Фейнмана, Віталія Гінзбурга, які, на жаль, теж, пояснюючи, що таке червоний зсув, порушували «принцип Айнштейна»: «Пояснення повинно бути якомога просте, але не простіше». — Прим. Ю. Степановського.

тичне значення. Якщо знехтувати передбачення загальної теорії відносності, то хіба в розрахунках положення може становити кілька миль!

Ньютонові закони руху поклали край ідеї абсолютного положення в просторі. Теорія відносності звільнила нас від абсолютного часу. Розгляньмо пару близнюків. Припустімо, що один з них пішов жити на верховину гори, а другий лишився на рівні моря. Тоді перший близнюк старішатиме швидше, тож якби вони знову зустрілися, він був би старший за іншого. Щоправда, різниця у віці буде дуже мала, проте вона була б набагато більша, якби один з близнюків пустився в довгу подорож на космічному кораблі зі швидкістю, близькою до світлової. Коли б він повернувся, то був би набагато молодший від того, що лишився на Землі. Це так званий парадокс близнюків, однак парадокс для того, хто підсвідомо сприймає ідею абсолютного часу. В теорії відносності немає ніякого унікального абсолютного часу. Замість цього кожна людина має свої особисті міри часу, які залежать від того, де вона перебуває і як рухається.

До 1915 року вважали, що час і простір — це незмінна арена, на яку все, що відбувається там, аж ніяк не впливає. Так було і в спеціальній теорії відносності. Тіла рухалися, сили притягали й відштовхували, а час і простір просто тривають і не зазнають впливу. Було природно думати, що простір і час вічні.

Однак у загальній теорії відносності ситуація зовсім інша. Час і простір тепер динамічні величини: рух тіла чи дія сили змінює кривину часу й простору, а структура часопростору і собі впливає на те, як рухаються тіла і діють сили. Час і простір не тільки впливають, а й самі зазнають впливу від усього, що відбувається у Всесвіті. Як без уявлень про час і простір годі вести мову про події у Всесвіті, так і в загальній теорії відносності безглуздо говорити про час і простір за межами Всесвіту.

У подальші десятиріччя таке нове розуміння часу й простору мало перевернути наші уявлення про Всесвіт. Давню ідею про майже незмінний Всесвіт, що, можливо, існував завжди й існуватиме вічно, заступили уявлення про динамічний, розширюваний Всесвіт, що, найпевніше, виник у скінченний час у минулому й дійде краю в скінченний час у майбутньому. Цим революційним поглядам присвячено дальший розділ. Вони стали вихід-

ним пунктом моєї роботи в галузі теоретичної фізики. Ми з Роджером Пенроузом показали, що, згідно із загальною теорією відносності Айнштейна, Всесвіт повинен мати початок і, можливо, кінець.

Розділ 3

РОЗШИРНИЙ ВСЕСВІТ

Якщо в ясну, безмісячну ніч поглянути на небо, то найяскравішими об'єктами, певно, будуть планети Венера, Юпітер, Марс та Сатурн. Також буде видно велику кількість зір, подібних до нашого Сонця, але набагато віддаленіших. Насправді деякі з цих зафіксованих зір, як виявляється, через рух Землі навколо Сонця трохи змінюють своє положення відносно одна одної, тож фактично вони зовсім не зафіксовані! Це тому, що вони відносно близько до нас. Земля обертається навколо Сонця, і ми бачимо їх з різних положень на тлі віддаленіших зір. Тому ми в змозі безпосередньо виміряти відстані до цих зір; і що вони ближчі, то більше видається, що вони рухаються. Найближча від Землі зоря, Проксима Кентавра, розташована на відстані близько чотирьох світлових років (її світлу знадобиться приблизно 4 роки, щоб досягти Землі), або близько 23 мільйонів мільйонів миль. Більшість інших зір, яких видно простим оком, перебувають у межах кількох сотень світлових років від нас. Наше Сонце, наприклад, на відстані лише 8 світлових хвилин! Видимі зірки розкидані по всьому нічному небу, але особливо зосереджені в одній смужі, яку ми називаємо Чумацьким Шляхом. Далекого 1750 року деякі астрономи припускали, що виникнення Чумацького Шляху можна пояснити тим, що більшість видимих зір утворює одну дископодібну конфігурацію, приклад того, що ми тепер називаємо спіральною галактикою. Лише через декілька десятиліть астроном сер Вільям Гершел підтвердив цю ідею, прискіпливо каталогізуючи положення та відстані до величезної кількості зір. Проте повне визнання ідея здобула тільки на початку XX століття.

Наша сучасна картина Всесвіту бере початок лише від 1924 року, коли американський астроном Едвін Габл продемонстрував, що наша Галактика не єдина. В дійсності існує ве-

лика кількість інших, розділених величезними ділянками порожнього простору. Щоб довести це, йому потрібно було визначити відстані до цих інших галактик, розташованих так далеко від нас, що справді видаються зафіксованими, на відміну від близьких зір. Тож Габл мусив використовувати непрямі методи для вимірювання відстаней. Позірна яскравість зорі залежить від двох факторів: скільки світла вона випромінює (світність) і як далеко вона від нас. Що стосується близьких зір, ми можемо виміряти їхню позірну яскравість і відстань до них, і так розрахувати їхню світність. І навпаки, якщо нам відома світність зір в іншій галактиці, ми можемо визначити відстань до неї, вимірюючи їхню позірну яскравість. Габл помітив, що певні типи зір, достатньо близьких, щоб провести вимірювання, завжди мають однакову світність; тому, аргументував він, якби ми знайшли подібні зорі в іншій галактиці, то могли б припустити, що вони мають таку ж саму світність, і так розрахувати відстань до цієї галактики. Якщо б ми могли це проробити для численних зір тої самої галактики, і наші розрахунки завжди давали б ту саму відстань, то могли б бути достатньо впевнені у своїй оцінці.

Так Габл розрахував відстані до дев'яти різних галактик. Тепер ми знаємо, що наша Галактика лише одна з сотень мільйонів, які можна побачити в сучасні телескопи, а кожна галактика, своєю чергою, містить декілька сотень мільярдів зір. Рис. 3.1 зображує одну зі спіральних галактик. І наша, як ми вважаємо, має подібний вигляд для когось з іншої галактики. Ми живемо в Галактиці, яка обертається, і становить приблизно сто тисяч світлових років у поперечнику; зорі в її спіральних рукавах обертаються навколо центра приблизно раз за декілька сотень мільйонів років. Наше Сонце — просто звичайна, середньорозмірна жовта зоря, розташована біля внутрішнього краю одного зі спіральних рукавів. Ми-таки далеко відійшли від часів Аристотеля та Птолемея, коли вважали, що Земля — центр Всесвіту!

Зорі так далеко, що здаються нам лише цятками світла. Ми не можемо розгледіти їхній розмір чи форму, тож як нам розрізнити на віддалі різні типи зір? Для величезної більшості зір є тільки одна примітна властивість, яку можна спостерігати — колір їхнього світла. Ньютон виявив, що коли сонцеве світло про-

*Рис. 3.1.*

ходить крізь шматок скла трикутної форми, так звану призму, то воно розкладається на складові кольори (спектр), наче у веселці. Налаштувавши телескоп на певну зорю чи галактику, так само можна спостерігати спектр світла від зорі чи галактики. Різні зорі мають різні спектри, але відносна яскравість різних кольорів завжди така, яку слід очікувати від світла, що випромінює об'єкт, розпечений до червоного. (Насправді, світло, випромінюване будь-яким непрозорим об'єктом, що світиться червоногарячим, має характерний спектр — тепловий — який залежить тільки від його температури. Це означає, що ми в змозі визначити температуру зорі за спектром її світла). До того ж, виявляється, певних дуже специфічних кольорів узагалі нема в спектрі зір, і вони можуть різнитися від зорі до зорі. Позаяк нам відомо, що кожен хімічний елемент поглинає характерний набір дуже специфічних кольорів, то, порівнюючи їх з тими, яких не вистачає у спектрі зорі, можна достеменно визначити, які елементи наявні в зоревій атмосфері.

У 1920-х роках, коли астрономи почали досліджувати спектри зір в інших галактиках, то виявили дещо дуже своєрідне: ті ж самі характерні набори забраклих кольорів, як і для зір на-

шої Галактики, але всі вони однаковою мірою були зміщені до червоного краю спектру. Щоб зрозуміти, що це означає, спершу слід розібратися з ефектом Доплера. Як ми бачили, видиме світло складається з коливань, або хвиль, у електромагнетному полі. Довжина хвилі світла (або відстань між сусідніми гребенями хвилі) надзвичайно мала — від 4 до 7 десятимільйонних часток метра¹¹. Хвилі світла різної довжини людське око сприймає як різні кольори: найдовші хвилі належать до червоного краю спектру, а найкоротші — до синього. Тепер уявімо джерело світла, що перебуває на незмінній відстані від нас, таке як зоря, що випромінює хвилі світла сталої довжини. Очевидно, що довжина хвиль, які ми приймаємо, буде така ж, як у випромінених (гравітаційне поле галактики не буде достатньо сильне, щоб мати значний вплив). Припустімо тепер, що джерело починає рухатися в наш бік, і коли випускає наступний гребінь хвилі, то він буде до нас ближчий, а відстань між гребенями хвилі буде менша, ніж коли зірка була нерухома. Це означає, що довжина хвилі, яку ми приймаємо, коротша, ніж коли зоря була нерухома. Відповідно, якщо джерело рухається від нас, довжини хвиль, які ми приймаємо, будуть більші. У разі світла, отже, це означає, що зорі, які віддаляються від нас, матимуть спектри, кольори яких зміщені до червоного краю спектру (червоний зсув), а ті, які наближаються до нас матимуть спектр із синім зсувом. Це співвідношення між довжиною хвилі та швидкістю, яке і називають ефектом Доплера, можна спостерігати у повсякденному житті. Прислухайтесь до машини, яка проїжджає по дорозі: з її наближенням, мотор звучить на вищому тоні (що відповідає коротшій довжині хвилі та вищій частоті звукових хвиль), а коли авто минає нас і їде далі — мотор звучить нижче. Світлові та радіохвилі поведуться так само. Справді, поліція використовує ефект Доплера для вимірювання швидкості автівок, вимірюючи довжину радіохвилі, які від них відбиваються.

Довівши, що інші галактики існують, усі наступні роки Габл присвятив каталогізації відстаней до них і спостереженню їхніх спектрів. У ті часи більшість людей вважали, що довоколишні галактики рухаються зовсім випадково, тому спек-

¹¹ Точніше, від 380 до 780 нанометрів. — *Прим. перекл.*

трів, зміщених до синього краю сподівалися виявити стільки ж, скільки і зміщених до червоного. Яким же було здивування, коли виявилось, що спектри більшості галактик зміщені до червоного краю, тобто майже всі вони віддалялися від нас. Ще дивовижнішим було відкриття Габла, опубліковане 1929 року: навіть величина червоного зміщення не випадкова, а прямо пропорційна відстані до галактики. Або, іншими словами, що далі галактика від нас, то швидше вона віддаляється! І це означало, що Всесвіт не може бути статичний, як раніше вважали, а насправді розширюється і відстані між різними галактиками весь час зростають.

Відкриття того, що Всесвіт розширюється, було однією з великих інтелектуальних революцій ХХ століття. Оглядаючись назад, ми навіть дивуємося, чому ніхто не додумався до цього раніше. Ньютон та інші мали б зрозуміти, що статичний Всесвіт раніше чи пізніше почне стискатись під впливом гравітації. А тепер, навпаки, вважаємо, що Всесвіт розширюється. Якщо б розширення відбувалось достатньо повільно, сила тяжіння зрештою б його зупинила, і потім почалося б стиснення. Однак, якщо б Всесвіт розширювався зі швидкістю, більшою за певну критичну, сила тяжіння завжди була б замала, щоб це зупинити, і Всесвіт продовжував би розширюватися вічно. Це трохи схоже на запуск ракети вгору з поверхні Землі. Якщо швидкість досить низька, зрештою сила тяжіння зупинить ракету і вона почне падати вниз. Однак, якщо ракета запущена зі швидкістю, більшою за певну критичну (близько 7 миль за секунду), гравітація не буде достатньо сильна, щоб її повернути, і ракета продовжуватиме повільно віддалятися від Землі. Розширення Всесвіту могли передбачити на основі Ньютонової теорії тяжіння у ХІХ, ХVІІІ і навіть наприкінці ХVІІ століть. Однак віра у статичний Всесвіт була така сильна, що вона збереглась до початку ХХ століття. Навіть Айнштайн, коли сформулював загальну теорію відносності у 1915 році, був такий впевнений у статичності Всесвіту, що змодифікував свою теорію, щоб це уможливити, ввівши так звану «космологічну константу» у свої рівняння. Айнштайн ввів нову «антигравітаційну» силу, що, на відміну від інших сил, не походила від якогось окремого джерела, а була вбудована в саму тканину простору-часу. Він заявив, що простір-час має пи-

тому тенденцію до розширення, що могло б точно урівноважити притягання всієї матерії речовини Всесвіту, так що наслідком буде статичний Всесвіт. Здається, лише одна людина готова була сприйняти загальну теорію відносності буквально: тоді як Айнштайн та інші фізики шукали способи обійти її передбачення про нестатичний Всесвіт, російський фізик і математик Александр Фрідман, навпаки, взявся його пояснити.

Фрідман зробив два дуже прості припущення про Всесвіт: що він виглядає однаково, хоч би в якому напрямку ми дивилися, і що це було б також справедливо, якщо б ми спостерігали з будь-якого іншого місця. Виходячи лише з цих двох ідей, Фрідман показав, що нам не слід сподіватися, що Всесвіт статичний. Справді, 1922 року, за декілька років до відкриття Габла, Фрідман передбачив саме те, що Габл відкрив!

Припущення, що Всесвіт виглядає однаково в будь-якому напрямку, явно не відповідає дійсності. Наприклад, як ми бачили, інші зорі нашої Галактики утворюють чітку смугу світла через нічне небо — Чумацький Шлях. Однак, якщо розглядати віддалені галактики, здається, що їх кількість більш-менш однакова. Отже, Всесвіт таки здається приблизно однаковим у кожному напрямку, за умови, якщо розглядати у великому, проти відстаней між галактиками, масштабі, та нехтувати відмінностями в малих масштабах. Тривалий час це була достатня підстава для припущення Фрідмана, як «грубого» наближення до реального Всесвіту. Але згодом, завдяки щасливій випадковості, виявилось, що припущення Фрідмана насправді напрочуд точне.

1965 року двоє американських фізиків з «Бел телефон лабораторієс» (Bell Telephone Laboratories) у штаті Нью-Джерсі, Арно Пенціас та Роберт Вілсон тестували надчутливого мікрохвильового детектора. (Мікрохвилі точно такі ж, як світлові, але з довжиною хвилі близько 1 сантиметра.) Пенціас та Вілсон занепокоїло, що їхній детектор сприймав більше шумів, ніж мало бути. Ці шуми, видавалося, не надходили з якогось певного напрямку. Спершу вони виявили пташиний послід у своєму детекторі, а потім перевірили на інші можливі несправності, згодом не підтверджені. Вони знали, що коли детектор не направлений прямо вгору, будь-який шум з атмосфери буде сильніший, адже промені світла, що поширюються близько до горизонту,

проходять через значно більше газове середовище, ніж ті, що падають прямо згори. Додатковий же шум був однаковий, незалежно від того, куди направляли детектора, тож він мав надходити з-поза меж атмосфери. Він також не змінювався вдень чи вночі та впродовж року, хоч Земля оберталася навколо своєї осі та навколо Сонця. Це означало, що проміння мало надходити з-поза меж Сонцевої системи, і навіть з-за меж Галактики, бо інакше воно б змінювалось, враховуючи, що з рухом Землі детектор направлявся б у різних напрямках.

По суті, ми знаємо, що на шляху до нас, проміння має проходити через більшу частину спостережуваного Всесвіту, а що воно виявляється однакове в різних напрямках, то й сам Всесвіт має бути однаковий у всіх напрямках, принаймні у великому масштабі. Тепер нам відомо, що хоч би який напрямок ми розглядали, цей шум ніколи не змінюється більш ніж на крихітну частку: так Пенціяс та Вілсон мимоволі натрапили на рідке точне підтвердження першого припущення Фрідмана. А що Всесвіт не точнісінько такий самий у кожному напрямку, а лише в середньому у великих масштабах, то мікрохвилі також не можуть бути цілком однакові в усіх напрямках. Мають бути невеликі варіації між різними напрямками. Їх уперше виявив 1992 року супутник КОБІ, деь на рівні приблизно однієї стотисячної. І хоча ці відмінності невеликі, вони дуже важливі, й це пояснено у восьмому розділі.

Приблизно в той же час, як Пенціяс і Вілсон досліджували шуми в своєму детекторі, інші два американські фізики з сусіднього Принстонського університету, Боб Діке та Джим Піблс також проявляли інтерес до мікрохвиль. Вони перевіряли припущення колишнього учня Фрідмана Георгія Гамова про те, що ранній Всесвіт мав би бути дуже гарячий, густий та розпечений до білого. Діке та Піблс навели аргументи, що ми все ще спроможні бачити світіння раннього Всесвіту, бо світло від дуже віддалених його частин мало б нас досягати тільки тепер. Однак через розширення Всесвіту це світло має бути так сильно зміщене до червоного краю, що ми виявлятимемо його як мікрохвильове проміння. Діке та Піблс ще готувались до його пошуків, коли Пенціяс та Вілсон дізналися про їхню роботу і зрозуміли, що вже його знайшли. За це Пенціяс та Вілсон у 1978 році отри-

мали Нобелівську премію, що, здається, не зовсім справедливо щодо Діке та Піблса, не кажучи вже про Гамова!

Отже, на перший погляд, усі свідчення того, що Всесвіт виглядає однаково, хоч би в якому напрямку ми дивилися, ніби вказують — є щось особливе в нашому положенні у Всесвіті. Зокрема, може здатись, що раз ми спостерігаємо, що всі інші галактики віддаляються від нас, то Земля має бути центром Всесвіту. Однак існує інше пояснення: Всесвіт може виглядати однаково в усіх напрямках і якщо спостерігати його з будь-якої іншої галактики. Це, як ми вже знаємо, було друге припущення Фрідмана. В нас немає наукових доказів ні за, ні проти цього припущення. Ми віримо в нього тільки через скромність, адже було б украй дивно, якби Всесвіт виглядав однаково в усіх напрямках навколо нас, але не навколо інших місць у Всесвіті! У моделі Фрідмана всі галактики природно віддаляються одна від одної. Це схоже на повітряну кулю, з намальованими на ній цятками, яку постійно надувають. У міру того, як куля розширюється, відстань між будь-якими цятками збільшується, але нема цятки, яку можна було б назвати центром розширення. Крім того, що далі цятки одна від одної, то швидше віддалятимуться одна від одної. Аналогічно в моделі Фрідмана: швидкість, з якою будь-які дві галактики віддаляються одна від одної, пропорційна до відстані між ними. Отже, він передбачив, що червоне зміщення галактики має бути прямо пропорційне до її відстані від нас — точнісінько так, як виявив Габл. Попри успіх його моделі та передбачення спостережень Габла, Фрідманова праця залишалася значною мірою невідомою на Заході, аж поки у відповідь на відкриття рівномірного розширення Всесвіту схожі моделі не відкрили 1935 року американський фізик Гавард Робертс і британський математик Артур Вокер.

Хоча Фрідман відкрив лише одну, та насправді існує три види моделей, що підлягають його двом фундаментальним припущенням. У першій моделі (яку Фрідман і запропонував) Всесвіт розширюється досить повільно, так що гравітаційне притягання між різними галактиками спричинює сповільнення і зрештою припинення розширення. Потім галактики почнуть рухатись назустріч одна одній і Всесвіт стискатиметься. На рис. 3.2 показано, як з часом змінюється відстань між сусід-

німи галактиками. Вона зростає від нуля до певного максимуму, а потім знову зменшується до нуля. У другому виді розв'язку Всесвіт розширюється так швидко, що гравітаційне притягання не може його зупинити, хіба трохи сповільнить. На рис. 3.3 зображено, як віддаляються галактики в цій моделі. Відстань починається з нуля і врешті галактики віддаляються одна від одної з постійною швидкістю. Існує, зрештою, і третій вид розв'язку, коли Всесвіт розширюється тільки ледь швидше, ніж треба, щоб уникнути повторного колапсу. В цьому разі віддалення, показане на рис. 3.4, також починається з нуля, а продовжується вічно. Однак швидкість, з якою галактики віддаляються одна від одної стає все меншою, хоча ніколи не сягає нуля.

Модель Фрідмана першого виду примітна тим, що в ній Всесвіт не безкрайній у просторі, хоча простір не має ніякої межі. Гравітація така сильна, що простір вигнутий довкола самого себе, що робить його певною мірою схожим на земну поверхню. Якщо хтось подорожує у певному напрямку по земній поверхні, то ніколи не наштовхнеться на непрохідну перепону і не вивалиться через край, а зрештою прийде туди, звідки вийшов. У першому виді моделі Фрідмана простір такий же, однак з трьома вимірами замість двох як у разі земної поверхні. Четвертий вимір, час, теж має обмежену протяжність, але він подібний до лінії з двома кінцями, або межами, початком і кінцем. Пізніше ми побачимо, що коли поєднати загальну теорію відносності з квантовомеханічним принципом невизначеності, то, можливо, що і простір, і час скінчені, при цьому не мають ні країв, ні меж.

Ідея, що можна було б обійти колом Всесвіт і опинитись у вихідній точці, має успіх у науковій фантастиці, але не має якогось практичного значення, бо, як можна показати, Всесвіт реколапсує до нульового розміру раніше, ніж хтось зможе обійти його довкола. Вам треба було б рухатися швидше за світло, щоб потрапити туди, звідки ви вийшли, перш ніж Всесвіт припинить своє існування — а це неможливо!

У першому виді моделі Фрідмана, коли Всесвіт розширюється і реколапсує, простір вигинається всередину себе, подібно до земної поверхні. З цього випливає, що він скінчений за розміром. На відміну від другого виду моделі, де Всесвіт розширюється вічно, і простір вигинається в інший бік, подібно до по-

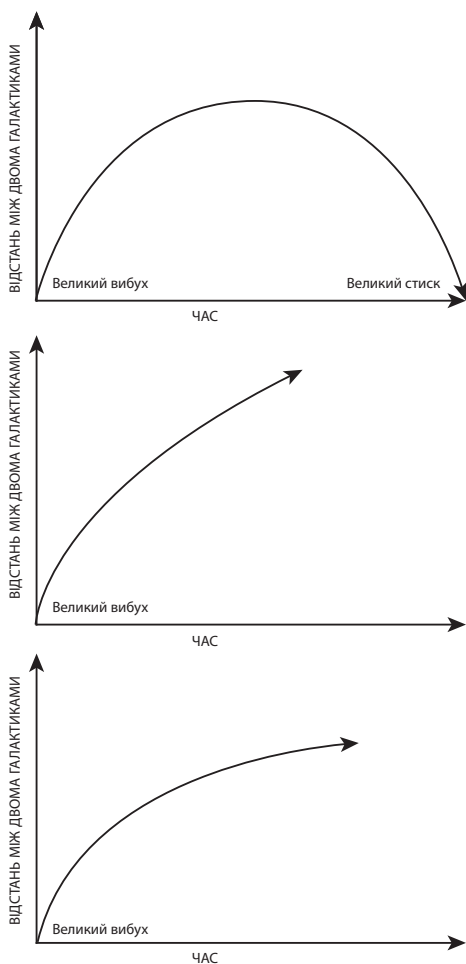


Рис. 3.2., 3.3., 3.4.

верхні сідла. В цьому разі простір нескінченний. Нарешті, у третьому виді моделі Фрідмана, з критичною швидкістю розширення, простір плоский, а отже теж нескінченний.

Але яка з моделей Фрідмана описує наш Всесвіт? Чи він врешті перестане розширюватись і почне стискатися, чи буде

розширюватися вічно? Щоб відповісти на це питання, ми повинні знати нинішню швидкість розширення Всесвіту та середню густину. Якщо густина менша за певне критичне значення, визначене швидкістю розширення, то гравітаційне притягання буде занадто слабе, щоб зупинити розширення. Якщо ж густина більша за критичне значення, гравітація в якийсь момент у майбутньому зупинить розширення і спричинить реколапс Всесвіту.

Нинішню швидкість розширення ми можемо визначити, і до того ж дуже точно, вимірявши швидкості, з якими інші галактики віддаляються від нас, використовуючи ефект Доплера. Проте відстані до галактик нам не дуже відомі, бо їх ми можемо виміряти тільки опосередковано. Тож усе, що нам відомо — Всесвіт розширюється на 5–10% кожен мільярд років. Однак наша невпевненість щодо теперішньої густини Всесвіту ще більша. Якщо додати маси всіх зір, що ми бачимо в нашій та інших галактиках, навіть для найнижчої оцінки швидкості розширення сума буде менша, ніж одна сота густини, необхідної, щоб зупинити розширення. Однак і наша, й інші галактики мають містити велику кількість «темної матерії», яку неможливо безпосередньо побачити, але ми знаємо, що вона має там бути, спостерігаючи вплив її гравітаційного притягання на орбіті зір у галактиках. Крім того, більшість галактик розташовані у скупченнях, і аналогічно ми можемо зробити висновок про наявність ще більшої кількості міжгалактичної «темної матерії» у цих скупченнях за впливом на рух галактик. Коли додати масу всієї цієї темної матерії, навіть тоді ми отримаємо лише близько однієї десятої від кількості, необхідної, щоб зупинити розширення. Проте ми допускаємо, що там може бути якась інша форма матерії, розподілена майже рівномірно по всьому Всесвіту, якої ми ще не виявили і яка ще може підвищити середню густину Всесвіту до критичного значення, необхідного, щоб зупинити розширення. Отже, наявні докази свідчать, що Всесвіт, певно, буде розширюватися вічно, але в одному ми можемо бути цілком впевнені: навіть якщо Всесвіт зазнає реколапсу, цього не станеться щонайменше в найближчі десять мільярдів років, бо принаймні приблизно стільки часу він розширюється. Але це не повинно нас надто хвилювати: на той час, якщо ми не переселимося за межі

Сонцевої системи, людства вже давно не буде — воно згасне разом з нашим Сонцем!

Всі Фрідманові розв'язки мають ту особливість, що в якийсь момент у минулому (від десяти до двадцяти мільярдів років тому) відстань між сусідніми галактиками мала дорівнювати нулеві. В той момент, який ми називаємо Великим вибухом, густина Всесвіту та кривина простору-часу мали б бути нескінченні. Позаяк математика фактично не може мати справу з нескінченними числами, це означає, що загальна теорія відносності, на якій базуються розв'язки Фрідмана, передбачає існування точки у Всесвіті, в якій сама теорія не виконується. Така точка — приклад того, що математики називають сингулярністю. По суті, всі наші наукові теорії сформульовані на припущенні, що простір-час гладкі та майже плоскі, а тому вони не виконуються в сингулярності Великого вибуху, в якій кривина простору-часу нескінченна. Це означає, що навіть якби до Великого вибуху і відбувались якісь події, ніхто їх не зможе використати, щоб визначити, що станеться згодом, бо передбачуваність втрається в момент Великого вибуху.

Відповідно, якщо ми знаємо лише те, що відбулося після Великого вибуху, то що трапилось до нього, ми визначити не зможемо. Що стосується нас, події до Великого вибуху не можуть мати жодного наслідку, тому вони не повинні бути частиною наукової моделі Всесвіту. Тож нам слід вилучити їх з цієї моделі і сказати, що відлік часу починається в момент Великого вибуху.

Багатьом людям не подобається ідея, що час має початок, певно, через те що вона наводить на думку про божественне втручання. (Католицька церква, з іншого боку, вхопилася за модель Великого вибуху й 1951 року офіційно проголосила її відповідною до Біблії.) Тому були спроби уникнути висновку, що Великий вибух відбувся. Пропозицію, що дістала найбільшу підтримку, названо теорією стаціонарного стану. Її запропонували 1948 року два біженці з окупованої нацистами Австрії, Герман Бонді та Томас Гольд, та англієць Фред Гойл, який під час війни разом з ними працював над радарми. Ідея полягала в тому, що тоді як галактики віддалялись одна від одної, нові галактики постійно формувались у проміжках між ними з нової

матерії, що постійно створювалась. Отже, Всесвіт виглядати-ме приблизно однаково в усі часи і з усіх точок простору. Теорія стаціонарного стану потребувала модифікацій загальної теорії відносності, щоб уможливити постійне створення матерії, але необхідна швидкість була така низька (приблизно одна частинка на кубічний кілометр за рік), що вона не суперечила експериментові. Це була добра наукова теорія, в сенсі, описаному в розділі 1: проста та давала певні передбачення, які можна було перевірити через спостереження. Одним з цих передбачень було те, що кількість галактик або подібних об'єктів у будь-якому заданому об'ємі простору має бути однакова, хоч коли б і звідки у Всесвіті ми спостерігали. Наприкінці 1950-х — на початку 1960-х у Кембриджі група астрономів під керівництвом Мартіна Райла (який також працював із Бонді, Гольдом та Гойлом над радарми протягом війни) провела спостереження джерел радіохвиль з космосу. Ця кембридзька група показала, що більшість з цих радіоджерел має міститися за межами нашої Галактики (насправді багато з них можуть бути ідентифіковані як належні іншим галактикам), а також, що слабких джерел було набагато більше, ніж сильних. Вони пояснили це тим, що слабкі джерела віддаленіші, а сильні — ближчі до нас. Потім виявилось, що звичайних джерел в одиниці об'єму простору більше у віддалених областях, ніж у близьких. Це могло означати, що ми перебуваємо в центрі великої області Всесвіту, де джерел менше, ніж деінде. Або ж це може означати, що джерела були численніші у минулому, коли радіохвилі вирушили до нас, ніж тепер. Обидва пояснення суперечать передбаченням теорії стаціонарного стану. Крім того, відкриття мікрохвильового проміння Пенціасом та Вілсоном у 1965 році також показало, що Всесвіт мав бути набагато густіший у минулому. Тож від теорії стаціонарного стану довелося відмовитись.

Двоє російських науковців, Євгеній Ліфшиц та Ісаак Халатніков, у 1963-му зробили ще одну спробу уникнути висновку, що Великий вибух таки був, а разом з тим і початок часу. Вони припустили, що Великий вибух, певно, лише особливість моделей Фрідмана, які, зрештою, тільки наближення до реального Всесвіту. Можливо, з усіх моделей, які приблизно відповідали реальному Всесвітові, тільки у Фрідманових виникає сингуляр-

ність Великого вибуху. В його моделях галактики прямо віддаляються одна від одної, тож не дивно, що в певний момент часу всі вони були в тому ж самому місці. У реальному Всесвіті, однак, галактики не віддаляються одна від одної точно по прямій, а мають також невеликі бічні швидкості. Тому насправді вони зовсім не мають бути в тому ж самому місці, а лише дуже близько одна до одної. Можливо, що нинішній розширний Всесвіт виник не в сингулярній точці Великого вибуху, а в ранішу фазу стиснення. Коли Всесвіт колапсував, можливо, не всі частинки в ньому зіткнулися, а пролетіли і потім розійшлися в різні сторони, створюючи нинішнє розширення Всесвіту, приблизно як у моделях Фрідмана, лише з урахуванням неоднорідностей і випадкових швидкостей галактик у реальному Всесвіті. Вони показали, що такі моделі можуть брати початок з Великого вибуху, навіть якщо вже галактики не завжди рухатимуться прямо одна від одної, але стверджували, що це можливо лише для певних виняткових моделей, де всі галактики рухалися точно належним чином. Вони доводили, що позаяк нескінченно більше, як видавалося, моделей Фрідманового типу без сингулярності Великого вибуху, ніж з нею, то слід зробити висновок, що в дійсності Великого вибуху не було. Пізніше вони, однак, усвідомили, що був набагато ширший клас моделей Фрідманового типу, які мали сингулярності, й у яких галактикам нема необхідності рухатись якимось по-особливому. Тому 1970 року вони відмовились від свого твердження.

Праця Лівшица і Халатнікова цінна, бо показала, що Всесвіт міг мати сингулярність, Великий вибух, якщо загальна теорія відносності правильна. Однак вона не розв'язала головного питання: чи передбачає загальна теорія відносності те, що наш Всесвіт повинен був мати Великий вибух і початок часу? Відповідь на це питання 1965 року була отримана завдяки зовсім іншому підходові британського математика і фізика Роджера Пенроуза. Виходячи з поведінки світлових конусів у загальній теорії відносності й того, що гравітація завжди притягальна, він показав, що зоря, колапсуючи під дією свого власного тяжіння, обмежена областю, поверхня якої зрештою стискається до нульового розміру. А що поверхня області стискається до нуля, то те ж саме має відбутися і з об'ємом. Вся речовина зорі буде стис-

нута до області з нульовим об'ємом, так що густина речовини та кривина простору-часу стануть нескінченні. Іншими словами, виникає сингулярність у певній області простору-часу, відома як чорна діра.

На перший погляд, результат Пенроуза застосовний лише до зір, і не дає ніякої відповіді на питання, чи мав у своєму минулому цілий Всесвіт сингулярність Великого вибуху. Однак на той час, коли Пенроуз запропонував свою теорему, я був аспірантом і відчайдушно шукав якусь проблему, щоб завершити свою дисертацію. Двома роками раніше, лікарі мені поставили діагноз «бічний аміотрофічний склероз», широко відомий як «хвороба Лю Геріга» чи «захворювання рухового нейрона», і дали зрозуміти, що жити мені лишилося рік-два. За цих обставин мені не здавалося, що робота над дисертацією мала великий сенс — я не сподівався прожити так довго. Та два роки проминули, а мій стан не так уже й погіршився. Насправді мої справи йшли доволі добре: я заручився з дуже гарною дівчиною, Джейн Вайлд. Але щоб одружитись, потрібна була робота, а щоб знайти роботу — ступінь доктора з філософії.

У 1965 році я прочитав про теорему Пенроуза, що будь-яке тіло, зазнаючи гравітаційного колапсу, має врешті сформувати сингулярність. Згодом я зрозумів, що якщо в його теоремі змінити напрямок часу на зворотний, так щоб колапс обернувся на розширення, то умови його теореми все ще будуть справедливими, якщо тепер у великих масштабах Всесвіт був би приблизно подібний до Фрідманової моделі. Згідно з теоремою Пенроуза, кінцевим станом будь-якої зорі, що колапсує, повинна бути сингулярність; зміна часу на зворотний вказує на те, що будь-який розширний Всесвіт Фрідманового типу має виникати з сингулярності. З технічних причин теорема Пенроуза потребувала, щоб Всесвіт був нескінченний у просторі. Тож, по суті, я міг використовувати її, щоб довести тільки, що сингулярність повинна існувати, якщо розширення Всесвіту відбувається достатньо швидко, щоб уникнути колапсу знов (адже тільки такі моделі Фрідмана були нескінченні у просторі).

Протягом кількох подальших років я розробив нові математичні методи, щоб вилучити цю та інші технічні умови з теорем, які підтвердили, що сингулярності мають виникати. 1970 року

кінцевим результатом стала спільна, моя з Пенроузом, стаття, в якій нарешті доведено, що сингулярність Великого вибуху повинна була існувати, при умові тільки, що загальна теорія відносності правильна і що Всесвіт містить стільки матерії, скільки ми спостерігаємо. Було багато заперечень щодо нашої роботи, почасти з боку росіян через їхню марксистську віру в науковий детермінізм, і частково з боку людей, які сприйняли її так, що загалом ідея сингулярності відворотна і псує красу Айнштайнової теорії. Але насправді ніхто не може сперечатися з математичною теоремою. Так врешті наша робота стала загальноновизнаною, і тепер майже всі вважають, що Всесвіт виник з сингулярності Великого вибуху. Може, це дещо іронічно, бо мій погляд змінився і тепер я намагаюся переконати інших фізиків у тому, що насправді не було ніякої сингулярності на початку Всесвіту — як ми побачимо далі, вона може зникнути, після того як врахувати квантові ефекти.

В цьому розділі ми побачили, як усього лише за пів століття змінилося людське уявлення про Всесвіт, сформоване протягом тисячоліть. Габлове відкриття, що Всесвіт розширюється, і усвідомлення незначності нашої власної планети у безмежності простору, були лише початком. З новими експериментальними та теоретичними доказами ставало дедалі очевидніше, що Всесвіт повинен був мати початок у часі, поки 1970-го року Пенроуз і я остаточно цього не довели, базуючись на Айнштайновій загальній теорії відносності. Це доведення показало, що загальна теорія відносності не повна: вона не може сказати нам, як виник Всесвіт, адже передбачає, що всі фізичні теорії, зокрема й вона сама, не виконуються на початку Всесвіту. Однак загальна теорія відносності не претендує бути більш ніж частковою теорією, так що теореми про сингулярність насправді стверджують, що мав бути час у дуже ранньому Всесвіті, коли той був такий малий, що більше не можна було б нехтувати дрібномасштабними ефектами іншої великої теорії XX століття, квантової механіки. Тому на початку 70-х нам довелося в своїх пошуках розуміння Всесвіту перейти від нашої теорії надзвичайно великого до нашої теорії надзвичайно крихітного. Ця теорія, квантова механіка, буде описана далі, перш ніж ми повернемося до зусиль об'єднати дві часткові теорії в єдину квантову теорію гравітації.

Розділ 4

ПРИНЦИП НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Успіх наукових теорій, а особливо Ньютонової теорії тяжіння, на початку дев'ятнадцятого сторіччя підштовхнув французького науковця маркіза де Лапласа до твердження, що Всесвіт цілком визначений. Лаплас висловив припущення про існування набору наукових законів, які дозволять людям передбачити все, що відбуватиметься у Всесвіті, якщо тільки знати повний стан цього Всесвіту в якийсь час. Наприклад, якщо знати положення та швидкості Сонця і планет у якийсь один момент, ми могли б застосувати Ньютонові закони для визначення стану Сонцевої системи в будь-який інший момент. Тут детермінізм здається досить очевидним, але Лаплас на цьому не спинився, припустивши, що подібні закони керують й усім іншим, зокрема людською поведінкою.

Із доктриною наукового детермінізму категорично не погоджувалися багато людей, які вважали, що та зазіхає на Божу свободу втручатися в світ, але до початку XX століття вона залишалася звичайним науковим припущенням. Однією з перших ознак того, що від цього погляду треба відмовитися, стали розрахунки британських науковців лорда Рейлі (Релея) та сера Джеймса Джинса, які вказали на те, що гарячий об'єкт, або тіло на кшталт зорі, повинен випромінювати енергію з нескінченною інтенсивністю. Згідно з законами, у які вірили в той час, гаряче тіло мало випромінювати електромагнетні хвилі (такі як радіохвилі, хвилі видимого діяпазону або Рентгенові) рівномірно на всіх частотах. Наприклад, гарячі тіла повинні випромінювати таку ж кількість енергії на частотах від одного до двох трильйонів хвиль за секунду, як і від двох до трьох трильйонів хвиль за секунду. А позаяк діяпазон частот необмежений, це означатиме, що повна випромінювана енергія буде нескінченна.

Щоб уникнути цього відверто безглузлого результату німецький науковець Макс Планк у 1900 році припустив¹², що світло, Рентгенові промені та інші хвилі не можуть випромінюватися з довільною інтенсивністю, а лише певними пакетами, які він назвав квантами¹³. Навіть більше, кожен квант має певну кількість енергії — що вища частота хвилі, то більшу, тож на досить високих частотах випромінювання одного кванта потребуватиме більше енергії, ніж є в наявності. Відповідно, випромінювання на високих частотах буде зменшене, тож інтенсивність, з якою тіло втрачатиме енергію, буде скінченна.

Квантова гіпотеза дуже добре пояснила спостережену інтенсивність випромінювання з гарячих тіл, але її значення для детермінізму стало зрозуміле лише 1926 року, коли інший німецький науковець, Вернер Гайзенберг, сформулював свій знаменитий принцип невизначеності. Щоб передбачити майбутні положення і швидкість частинки, потрібно вміти точно вимірювати її теперішні положення і швидкість. Очевидний спосіб це зробити — спрямувати на цю частинку світло. Частинка розсіє якісь зі світлових хвилі, і це вкаже на її положення. Однак неможливо визначити положення частинки точніше, ніж відстань між гребенями хвилі, тож потрібно застосовувати короткохвильове світло, щоб точно виміряти положення частинки. Тепер, згідно з Планковою кван-

¹² Гокінг повторює дуже поширену, втім некоректну версію, що її звичайно майже всі викладачі розповідають студентам, але яка не відповідає справжньому розвитку подій. Річ у тім, що про «безглуздий результат», «ультрафіолетову катастрофу» (сам термін «ультрафіолетова катастрофа» вперше вжив Пауль Ернест у 1911 р.), заговорили після статті Джинса, яка вийшла 1905 р., тож вона аж ніяк не могла вплинути на роботу Планка 1900 р. Початкова стаття Релея з цієї теми вийшла у 1900 р., але ні про яку «ультрафіолетову катастрофу» в ній не йшлося, і Планк у своїх статтях 1900 р. не покликався на Релея. Мотивація Планка щодо введення «квантів» була інша. — *Прим. Ю. Степановського.*

¹³ У читача може скластися враження, нібито Планк відкрив кванти світла. Кванти світла у 1905 р. відкрив Айнштайн. Планк, як і всі добре освічені фізики того часу, знав, що ніякі кванти світла існувати не можуть. Навіть 1913 р., рекомендуючи Айнштайна у Пруську академію наук, він писав: «Теорію квантів світла не слід ставити йому у провину». Гіпотеза Планка стосувалася іншого: енергія деяких фізичних систем набуває дискретних значень, тобто квантується. Тепер ми знаємо, що систем, енергія яких квантується, безліч, це всі атоми, молекули, атомні ядра тощо. — *Прим. Ю. Степановського.*

товою гіпотезою, неможливо використовувати як завгодно малу кількість світла; треба взяти хоча б один квант. Цей квант порушуватиме рух частинки й змінить її швидкість непередбачуваним чином. Ба більше, що точніше вимірюється положення частинки, то коротші потрібні світлові хвилі для цього й, відповідно, більша енергія одного кванта. Тож швидкість частинки буде порушена на більшу величину. Іншими словами, що точніше ви намагаєтесь виміряти положення частинки, то менш точно можете виміряти її швидкість, і навпаки. Гайзенберг показав, що добуток невизначеності положення частинки, невизначеності її швидкості та маси частинки не може бути менший за якусь певну величину, відому як стала Планка. Навіть більше, це обмеження не залежить ні від способу визначення положення чи швидкості частинки, ні від типу частинки: Гайзенбергові принцип невизначеності — фундаментальна, неуніка властивість світу.

Принцип невизначеності глибоко вплинув на те, як ми дивимося на світ. Навіть через вісімдесят з лишком років цей вплив не оцінили повною мірою багато філософів, і він досі привід для багатьох дискусій. Принцип невизначеності покінчив із Лапласовою мрією про наукову теорію, модель Всесвіту, який був би цілком визначений: безсумнівно, неможливо точно передбачити майбутні події без здатності точно виміряти навіть теперішній стан Всесвіту! Ми можемо уявити собі, що є набір законів, які цілком визначають плин подій для якоїсь надприродної істоти, що могла б спостерігати нинішній стан Всесвіту, не порушуючи його. Однак такі моделі Всесвіту нас, простих смертних, не особливо цікавлять. Здається, краще застосувати принцип економії, відомий як Окамове лезо, і відсікти всі ті елементи теорії, що не можуть бути спостережені. Цей підхід підштовхнув Гайзенберга, Ервіна Шредингера та Пола Дирака в 1920-х роках переформулювати механіку в нову теорію, названу квантовою механікою, основу на принципі невизначеності. Згідно з цією теорією, частинки більше не мали окремих, чітко визначених положень і швидкостей, яких не можна було спостерегти. Натомість вони мали квантовий стан — комбінацію положення та швидкості.

Загалом квантова механіка не передбачає одного певного результату спостереження. Натомість вона передбачає цілу низку різних можливих результатів і вказує ймовірність кожного

з них. Інакше кажучи, якщо виконати однакові виміри великої кількості подібних систем, кожна з яких запущена однаково, виявиться, що результат виміру в якійсь кількості випадків буде А, в іншій — Б, і так далі. Можна передбачити приблизну кількість разів, коли випаде результат А або Б, але неможливо передбачити конкретний результат якогось окремого виміру. Таким чином квантова механіка впроваджує в науку неунікний елемент непередбачуваності або випадковості. Айнштайн палко це заперечував, попри важливу роль, яку відіграв у розвитку цих ідей. Айнштайн здобув Нобелівську премію за внесок у квантову теорію. Проте він ніколи не прийняв, що Всесвітом керує випадок; його почуття відбилися у знаменитому вислові: «Бог не грає в кості». Однак більшість інших науковців були готові прийняти квантову механіку, бо вона цілком узгоджена з експериментом. Справді, це винятково успішна теорія, що лежить в основі майже всієї сучасної науки та техніки. Вона визначає поведінку транзисторів і мікросхем, неодмінних компонентів таких електронних пристроїв, як телевізори та комп'ютери, на ній основана сучасна хемія та біологія. Єдині галузі природничих наук, з якими квантова механіка ще належно не поєднана — це гравітація й великомасштабна структура Всесвіту.

Хоч світло й складається з хвиль, згідно з Планковою квантовою гіпотезою, в певному сенсі воно поводить ся так, наче складається з частинок: воно може випромінюватися або поглинатися тільки пакетами, або квантами¹⁴. Однаковою мірою, з Гайзенбергового принципу невизначеності впливає, що частинки поведуться в якомусь сенсі як хвилі: вони не мають точного положення, а «розмазані», з певним розподілом імовірності. Теорія квантової механіки спирається на цілковито новий тип математики, що більше не описує об'єктивний світ у термінах частинок і хвиль; а лише спостереження світу, який може бути описаний в цих термінах. Тут, отже, є дуальність між хвилями й частинками: для деяких цілей ліпше думати про частинки як хвилі, а для інших — про хвилі як частинки. Важливий наслідок цього те, що можна спостерігати так звану інтерференцію двох груп хвиль чи частинок. Іншими

¹⁴ Див. попередню примітку. — *Прим. ред.*

словами, гребені однієї групи хвиль можуть збігатися з западинами іншої групи. В такому разі дві групи хвиль компенсують одна одну замість того, щоб скласти в сумі потужнішу хвилю, як можна було б очікувати (рис. 4.1).

Добре відомий приклад інтерференції у разі світла — різні кольори, що їх часто видно на мильних бульбашках. Це викликано відбиттям світла від двох боків тонкої водяної плівки, що утворює бульбашку. Біле світло складається зі світлових хвиль всеможливих довжин, або кольорів. Гребені хвиль певної довжини, що відбиваються від одного боку мильної плівки, збігаються з западинами хвиль, що відбиваються від іншого боку. Кольорів, відповідних хвилям цієї довжини, у відбитому світлі немає, і воно таким чином здається забарвленим. Інтерференція може також відбутися і з частинками, через дуальність, внесену квантовою механікою. Знаменитий приклад — так званий двощілинний експеримент (рис. 4.2).

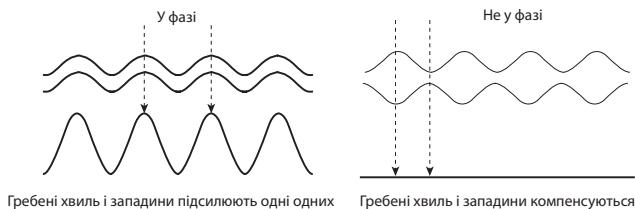


Рис. 4.1.

Розгляньмо перегородку з двома вузькими паралельними щілинами в ній. З одного боку перегородки є джерело світла якогось певного кольору (тобто хвиль певної довжини). Більша частина світла наштовхнеться на перегородку, але невелика кількість пройде через щілини. Тепер припустімо, що поставлено екран з протилежного до джерела світла боку перегородки. На будь-яку точку екрана падатимуть хвилі з двох щілин. Однак, загалом, відстань, яку світло має подолати від джерела до екрана через дві щілини, буде різна. Це означатиме, що хвилі з щілин не будуть у фазі, коли дістануться екрана: в якихось місцях вони гаситимуть одна одну, а в інших — підсилюватимуть. Як результат — характерна картина зі світлих і темних смуг.

Дивовижно, якщо замінити джерело світла джерелом частинок, таких як електрони з якоюсь певною швидкістю (це озна-

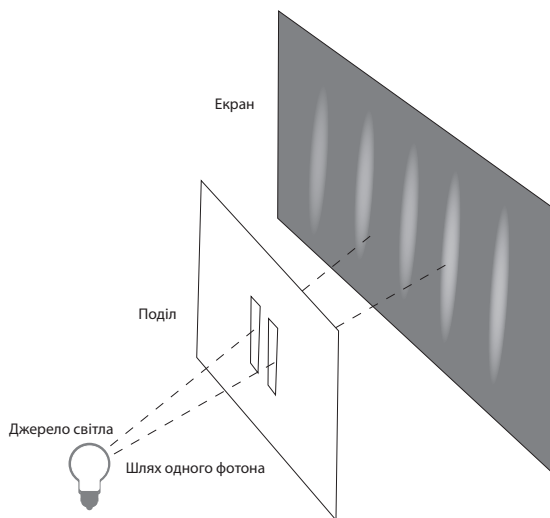


Рис. 4.2.

чає, що відповідні хвилі мають якусь певну довжину), дістанемо такі самісінькі смуги. І це здається ще дивнішим, бо якщо мати лише одну щілину, то смуг не буде, просто однорідний розподіл електронів по екрану¹⁵. Отже, можна подумати, що відкриття іншої щілини просто збільшить кількість електронів, що ударяться у кожну точку екрана, але через інтерференцію насправді в деяких місцях їхня кількість зменшується. Якщо електрони пропускати через щілини по одному, то, можна очікувати, що кожен пройдёт через ту чи іншу щілину і таким чином поводитиметься так, ніби щілина, через яку він пройшов була там лише одна — даючи однорідний розподіл на екрані. Насправді ж, однак, навіть якщо пропускати електрони по одному, все одно з'являються смуги. Кожен електрон, отже, повинен водночас проходити через *обидві* щілини!

Явище інтерференції частинок стало вирішальним для нашого розуміння будови атомів, основних одиниць хемії й біології та структурних елементів, із яких зроблені ми та все навко-

¹⁵ Значна більшість електронів попаде у вузький проміжок на екрані з максимумом у центрі, що в одній площині з центром щілини. — Прим. ред.

ло нас. На початку минулого століття вважали, що атоми швидше схожі на планети, які обертаються навколо Сонця, бо електрони (частинки з негативним електричним зарядом) рухаються навколо центрального ядра, що несе позитивний заряд. Як припускали, притягання між позитивно та негативно зарядженими частинками утримувало електрони на їхніх орбітах так само, як гравітаційне притягання між Сонцем та планетами утримувало планети на їхніх орбітах. Та проблема полягала в тому, що закони механіки й електрики до появи квантової механіки передбачали, що електрони втрачатимуть енергію й тому падатимуть по спіралі, аж поки зіткнуться з ядром. А це означатиме, що атом, а достоту — вся матерія, повинна швидко сколапсувати до стану з дуже високої густиною. Часткове розв'язання цієї проблеми знайшов данський науковець Нільс Бор у 1913 році. Він припустив, що електрони рухаються по орбіті не на будь-якій відстані від центрального ядра, а лише на деяких певних відстанях. Якщо також припустити, що лише один чи два електрони можуть рухатися по орбіті на будь-якій із цих відстаней, це розв'яже проблему колапсу атома, бо електрони могли б рухатися по спіралі не далі, ніж щоб заповнити орбіти з найменшими відстанями і з найменшою енергією.

Ця модель досить добре пояснила структуру найпростішого атома — атома водню, що має лише один електрон, який обертається навколо ядра. Але не було ясно, як її поширити на складніші атоми. Ба більше, ідея про обмежену кількість дозволених орбіт видавалася дуже довільною. Нова теорія квантової механіки розв'язала цю проблему. Вона виявила, що електрон, який рухається по орбіті навколо ядра, можна розглядати як хвилю з довжиною, залежною від його швидкості. Для певних орбіт їхня довжина відповідатиме цілому (а не дробному) числу довжин хвиль електрона. Для цих орбіт гребені хвилі будуть в тому ж самому положенні на кожному обході, тож хвилі додаватимуться: такі орбіти відповідатимуть Боровим дозволеним орбітам. Однак для орбіт, чий довжини не становлять цілого числа довжин хвиль, в міру того як електрони обергатимуться, кожен гребінь хвилі буде врешті скомпенсований западиною; такі орбіти не будуть дозвалені.

Добрий спосіб уявити дуальність хвиль і часток — це так звана сума за історіями, яку ввів американський науковець Ри-

чард Файнмен (Фейнман). При такому підході не припускають, що частинка повинна мати одну історію, або шлях, у просторі-часі, як би це було за класичною, неквантовою теорією. Натомість, припускають, що вона рухається від точки А до точки Б кожним можливим шляхом. Із кожним шляхом пов'язана пара чисел: одне представляє величину хвилі, інше — положення в циклі (тобто, на гребені, або западині). Ймовірність проходження від точки А до точки Б вираховують додаванням хвиль для всіх шляхів. Загалом, якщо порівняти низку сусідніх шляхів, фази, або положення в циклі, значно відрізнятимуться. А це означає, що хвилі, пов'язані з цими шляхами, будуть майже точно одна одну взаємно компенсувати. Однак у разі деяких сусідніх шляхів фази не будуть сильно відрізнятися. Хвилі для таких шляхів не будуть взаємно компенсуватися. Такі шляхи відповідають Боровим дозволеним орбітам.

Із цими ідеями, в конкретній математичній формі, було відносно просто вирахувати дозволені орбіти в складніших атомах і навіть молекулах, що складаються з якоїсь кількості атомів, утримуваних електронами разом на орбітах, що охоплюють більш як одне ядро. А що структура молекул та їхні взаємодії між собою лежать в основі всієї хемії та біології, то квантова механіка загалом дозволяє нам передбачити майже все, що бачимо навколо, у межах, встановлених принципом невизначеності. (Однак на практиці розрахунки, потрібні для систем, що містять більш як кілька електронів, такі складні, що ми не в змозі їх виконувати).

Айнштайнова загальна теорія відносності, видається, керує великомасштабною структурою Всесвіту. Вона належить до теорій, що їх називають класичними; тобто вона не враховує принципу невизначеності квантової механіки, що варто було б для узгодження з іншими теоріями. Причина, чому це не призводить до якихось незбіжностей із спостереженнями в тому, що всі гравітаційні поля, вплив яких ми зазвичай відчуваємо, дуже слабкі. Однак, згідно з теоремами сингулярності, розглянутими вище, гравітаційне поле має ставати дуже сильним принаймні у двох ситуаціях: чорні діри й Великий вибух. У таких сильних полях ефекти квантової механіки мають бути важливі. А отже, в якомусь сенсі, класична загальна теорія відносності, передбача-

ючи точки нескінченної густини, передбачає свою неспроможність, так само, як класична (тобто неквантова) механіка передбачила свою неспроможність, припускаючи, що атоми мають сколапсувати до нескінченної густини. Ми досі не маємо повної послідовної теорії, що об'єднала б загальну теорію відносності та квантову механіку, але ми знаємо низку особливостей, що їй варто мати. Наслідки, які вони матимуть для чорних дір та Великого вибуху будуть описані в подальших розділах. Однак наразі нам треба перейти до недавніх спроб звести до купи наше розуміння інших сил природи в одну, об'єднану квантову теорію.

Розділ 5

ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ ТА СИЛИ ПРИРОДИ

На думку Аристотеля, вся матерія у Всесвіті складалася з чотирьох основних елементів — землі, повітря, вогню та води. На ці елементи діяли дві сили: сила тяжіння, схильність землі та води опускатися, та левітація, схильність повітря та вогню підніматися. Такий поділ вмісту Всесвіту на матерію та сили, використовують і сьогодні.

Аристотель вважав, що матерія неперервна, тобто можна ділити шматок матерії на все менші та менші шматочки без жодного обмеження: ніхто ніколи не стикався з крупинкою матерії, якої не можна було б ділити далі. Деякі греки, однак, такі як Демокрит, стверджували, що матерія за своєю природою зерниста і що все складається з величезної кількості різноманітних всеможливих атомів. (Слово «атом» грецькою означає «неподільний».) Протягом століть дискусія тривала без будь-яких реальних доказів з обох сторін, але 1803 року британський фізик та хемік Джон Далтон зауважив: те, що хемічні сполуки завжди поєднуються в певному співвідношенні, можна пояснити об'єднанням атомів, які утворюють елементи, так званими молекулами. Проте ще до початку минулого століття дискусія між цими двома науковими школами не була остаточно розв'язана на користь атомістів. Один з найважливіших фізичних доказів надав Айнштайн. У статті, написаній 1905 року, за кілька тижнів до знаменитої роботи зі спеціальної теорії відносності, Айнштайн вказував, що так званий броунівський рух — нерегулярний, хаотичний рух дрібних частинок пилу, завислих у рідині — може бути пояснений як наслідок зіткнення атомів рідини з частинками пилу.

До того часу вже були підозри, що зрештою ці атоми не були неподільні. За кілька років до того член Триніті-коледжу

(Кембридж) Дж. Дж. Томсон продемонстрував існування частинки матерії, названої електроном, що мала масу меншу за одну тисячну частку найлегшого атома. Він використав пристрій, дещо схожий на сучасний кінескоп телевізора: розпечений метал нитки випускав електрони, а через те, що вони мають негативний електричний заряд, електричне поле може бути використане для пришвидшення їх до вкритого фосфором екрана. Коли вони вдаряються в екран, то породжують спалахи світла. Незабаром стало зрозуміло, що ці електрони повинні виходити зсередини самих атомів, а 1911 року новозеландський фізик Ернест Резерфорд, нарешті, показав, що атоми речовини мають внутрішню структуру: вони складаються з дуже маленького, позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертається деяка кількість електронів. Він вивів це, аналізуючи, як альфа-частинки (позитивно заряджені частинки, що їх випускають радіоактивні атоми) відхиляються, коли зіштовхуються з атомами.

Спочатку вважали, що ядро атома складене з електронів і різного числа позитивно заряджених частинок, названих протонами (з грецької — «перший», бо їх вважали фундаментальними одиницями, з яких складалася матерія). Але 1932 року колега Резерфорда в Кембриджі, Джеймс Чедвік, виявив, що ядро містить іншу частинку, названу нейтроном, яка була майже така сама за масою, як протон, але без електричного заряду. Чедвік отримав Нобелівську премію за відкриття, і був обраний керівником коледжу Гонвіл-енд-Кіз (це коледж, в якому я тепер працюю). Пізніше він пішов у відставку з посади керівника через розбіжності з іншими колегами. Після того, як молодші колеги повернулися з війни, більшість з них проголосувала за зміщення старших працівників з посад, які ті обіймали протягом тривалого часу, що викликало запеклі суперечки. Ці події відбулися ще до мене; я приєднався до коледжу 1965 року в самому кінці затятої боротьби, коли подібні розбіжності змусили іншого керівника, [згодом] нобелянта, сера Невіла Мота, піти у відставку.

Ще десь тридцять¹⁶ років тому вважали, що протони і нейтрони були «елементарні» частинки, але експерименти, в яких

¹⁶ Мається на увазі, на час виходу (1988 р.) першого видання цієї книжки. — Прим. ред.

протони зіштовхувалися з іншими протонами або електронами на високих швидкостях, вказали, що вони насправді складаються з дрібніших частинок. Ці частинки назвав кварками фізик Мюррей Гел-Ман з Каліфорнійського технологічного інституту, який 1969 року отримав Нобелівську премію за свою роботу над ними. Назва походить від загадкової цитати Джеймса Джойса: «Три кварки для Мастера Марка!». Слово *quark* (кварк) має вимовлятися як *quart* (кварт), але з *к* на кінці, а не *т*, та зазвичай вимовляється як рима до *lark* (жайворонки, жарт).

Існує певна кількість різних сортів кварків: є шість «ароматів», які ми називаємо верхній (від англ. *up*), нижній (від англ. *down*), дивний (від англ. *strange*), чарівний (від англ. *charmed*), найнижчий (від англ. *bottom*), найвищий (від англ. *top*).¹⁷ Перші три аромати відомі з 1960-х років, але чарівний кварк відкрито лише у 1974-му, найнижчий — у 1977-му і найвищий — у 1995-му. Кожен з ароматів може бути трьох «кольорів»: червоного, зеленого та синього. (Слід зазначити, що ці терміни — просто позначки: кварки набагато менші за довжину хвилі видимого світла і тому не мають ніякого кольору у звичному сенсі. Просто сучасні фізики, видається, використовують образніші способи називання нових частинок і явищ — вони вже більше не обмежуються грецькою!) Протон чи нейтрон складається з трьох кварків, по одному кожного кольору. Протон містить два верхніх кварки і один нижній; нейтрон — два нижніх та один верхній. Можна створити частинки, що містять інші кварки (дивний, чарівний, найнижчий і найвищий), але всі вони мають набагато більшу масу і дуже швидко розпадаються на протони та нейтрони.

Тепер ми знаємо, що ні атоми, ні протони та нейтрони всередині них не неподільні. Отже, постає питання: які є насправді елементарні частинки, основні будівельні блоки, з яких все скла-

¹⁷ Зазвичай кварки просто називають за першою англійською буквою: *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t*. Початкові назви для двох останніх кварків — *beauty* (красивий), *truth* (істинний) вийшли з ужитку, теперішні назви — *bottom* і *top*, що в перекладі українською означають, відповідно, нижній/денний/спідній і верхній/горішний. Тобто назви або збігатимуться з назвами перших двох кварків (*up*, *down*) — верхній і нижній, або неоднозначні — денний/спідній і горішний, тому запропоновано українські відповідники «найнижчий» і «найвищий». Тим паче, що автор англійських назв Хаїм Харарі обрав їх тому, що вони «логічні партнери для верхнього і нижнього кварків». — *Прим. ред.*

дається? Позаяк довжина хвилі світла набагато більша, ніж розмір атома, ми не можемо сподіватися «побачити» частини атома звичайним способом. Нам потрібно використовувати щось з набагато меншою довжиною хвилі. Як ми переконалися в попередньому розділі, квантова механіка стверджує, що насправді всі частинки — хвилі, і що вища енергія частинки, то менша довжина відповідної хвилі. Так що найкраща відповідь, яку ми можемо дати, залежить від того, які високі енергії частинок ми маємо в своєму розпорядженні, бо від цього залежить, який малий масштаб відстаней ми можемо побачити. Ці енергії частинок зазвичай вимірюють в одиницях, які називають електронвольтами. (В експериментах Томсона з електронами ми бачили, що він використовував електричне поле для пришвидшення електронів. Енергія, яку електрон набуває від електричного поля в один вольт, і є електронвольт). У дев'ятнадцятому столітті, коли люди знали, як використовувати лише низькі енергії величиною кілька електронвольт, що породжені хемічною реакцією, такою як горіння, вважали, що атоми були найменшою одиницею. В експерименті Резерфорда альфа-частинки мають енергію мільйонів електронвольт. Зовсім недавно ми дізналися, як використовувати електромагнетні поля, щоб передати частинкам енергію спершу на мільйони, а потім і мільярди електронвольт. Отже, ми знаємо, що частинки, яких вважали «елементарними» тридцять¹⁸ років тому, по суті, складаються з дрібніших частинок. Можливо, коли ми досягнемо ще вищих енергій, виявиться, що, своєю чергою, ті складаються з іще менших частинок? Це, звісно, можливо, але є деякі теоретичні підстави вважати, що ми вже знаємо або дуже близькі до знання кінцевих будівельних блоків природи.

Використання дуальності хвиль і частинок обговорено в останньому розділі. Все у Всесвіті, зокрема світло і гравітація, може бути описане в термінах частинок. Ці частинки мають властивість, так званий спін. Один із способів міркування про спіни — уявляти частинки, що як маленькі дзиги обертаються навколо осі. Однак це може ввести в оману, бо квантова механіка стверджує, що частинки не мають чітко визначеної осі. Насправді спіни частинки повідомляє про те, як частинка виглядає

¹⁸ У 50-і роки минулого століття. — Прим. ред.

з різних напрямів. Частинка зі спіном 0 подібна до крапки: вона виглядає однаково з усіх боків (рис. 5.1-i). З іншого боку, частинки зі спіном 1 подібні до стріли: її вигляд різний з різних напрямів (рис. 5.1-ii). Частинка матиме той же вигляд, тільки якщо зробить повний оберт (на 360 градусів). Частинка зі спіном 2 виглядає як двонаправлена стрілка (рис. 5.1-iii), при цьому вона виглядає однаково, якщо повернути на півоберт (на 180 градусів). Аналогічно, частинки з вищими спінами виглядають так само через менші частини повного обороту. Все це видається досить простим, але існують частинки, що так само не виглядатимуть навіть через один оберт: їх треба повернути на два повні оберти! Кажуть, що такі частинки мають спін $1/2$.

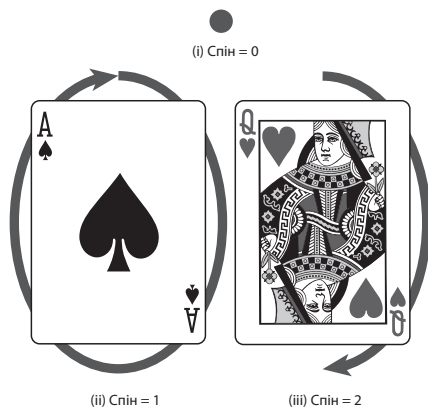


Рис. 5.1.

Всі відомі частинки у Всесвіті можна розділити на дві групи: частинки зі спіном $1/2$, що утворюють матерію у Всесвіті, й частинки зі спіном 0, 1, і 2, що, як ми побачимо, спричиняють сили між частинками матерії. Частинки матерії підлягають так званому принципіві заборони Паулі. Принцип відкрив 1925 року австрійський фізик Вольфганг Паулі, за що отримав Нобелівську премію в 1945 році. Він був справжнісінький фізик-теоретик: про нього говорили, що навіть його присутність у тому самому місті призводила до провалу експериментів! Принцип заборони Паулі стверджує, що дві однакові частинки не можуть існувати

в однаковому стані; тобто, вони не можуть мати те ж саме положення і ту ж саму швидкість, у межах, заданих принципом невинизначеності. Принцип Паулі ключовий, бо пояснює, чому частинки речовини не колапсують до стану дуже високої густини під впливом сил, створюваних частинками зі спіном 0, 1 і 2: якщо частинки матерії мають дуже близькі положення, то вони повинні мати різні швидкості, тобто вони не будуть залишатися в такому положенні надовго. Якби світ був створений без принципу заборони, кварки не сформували б окремі, чітко визначені протони і нейтрони. І вони, своєю чергою, не змогли б, разом з електронами, утворити окремі, чітко визначені атоми. Вони б усі сколапсували і утворили б більш-менш однорідну, густу «юшку».

Правильного уявлення про електрон та інші частинки зі спіном $1/2$ не було до 1928 року, коли свою теорію запропонував Пол Дирак, який пізніше був обраний лукасівським професором математики в Кембриджі (те саме професорство, яке свого часу посідав Ньютон, а тепер я)¹⁹. Теорія Дирака була перша теорія такого роду, що узгоджувалася і з квантовою механікою, і спеціальною теорією відносності. У ній математично пояснено, чому електрон має спін $1/2$, тобто чому при одноразовому повному обороті він не набуває такого ж самого вигляду, а при дворазовому — набуває. Вона передбачила також, що електрон повинен мати партнера — антиелектрон, або ж позитрон. Відкриття позитрона в 1932 році підтвердило теорію Дирака, а в 1933-му він отримав Нобелівську премію з фізики. Тепер ми знаємо, що кожна частинка має античастинку, з якою вона може анігілювати. (У разі силовосних частинок²⁰, або частинок-носіїв взаємодії, античастинки точно такі ж, як самі частинки). Могли б існувати цілі антислова й антилюди, що складаються з античастинок. Але, якщо зустрінете антисебе, не ручкайтеся! Бо ви обидва зникнете у сліпучому спалаху світла. Надзвичайно важливе питання: чому

¹⁹ У 1979 — 2009 рр. — *Прим. ред.*

²⁰ Англійський термін *force-carrying particle* перекладено як силовосна частинка. В науковій літературі (українською мовою) такі частинки зазвичай називають переносники/носії взаємодії (англ. *force carrier* — букв. *носії сили*, нім. *Austauschteilchen* — букв. *обмінна частинка*, рос. *переносчик взаимодействия*). Тут віддано перевагу ближчому до оригінального відповідникові. — *Прим. ред.*

видається, що навколо нас набагато більше частинок, ніж античастинок. Ми до нього ще повернемося в цьому розділі.

Як покладають у квантовій механіці, всі сили, або взаємодії, між частинками речовини переносять частинки з цілочисловим спіном, рівним 0, 1 або 2. Частинка речовини, наприклад електрон або кварк, випускає силову частинку. Відрух від цього випромінювання змінює швидкість частинки речовини. Потім силову частинку зіштовхується з іншою частинкою речовини і поглинається нею. Це зіткнення змінює швидкість другої частинки так само, як ніби між цими двома частинками речовини діє сила. Силові частинки мають одну важливу властивість: вони не підкоряються принципу заборони Паулі. Це означає, що нема ніяких обмежень на кількість обмінюваних частинок, тому вони можуть спричинити велику силу. Але якщо маса силових частинок велика, то їм буде важко виникати та обмінюватися на великих відстанях. Отже, сили, що вони переносять, будуть короткодійні. З іншого боку, якщо силові частинки не мають власної маси, то сили будуть далекодійні. Силові частинки, якими обмінюються частинки речовини, називають віртуальними, бо, на відміну від «реальних», їх не можна безпосередньо виявити за допомогою детектора частинок. Однак ми знаємо, що вони існують, бо створюють вимірну дію: вони — причина сил між частинками речовини. За деяких умов частинки зі спінами 0, 1, 2 також існують і як реальні, тоді їх можна виявити безпосередньо. Тоді вони постають перед нами тими, що класичні фізики називали б хвилями, скажімо, світловими або гравітаційними. Вони можуть іноді випускатися при взаємодії між собою частинок речовини, що обмінюються віртуальними силовими частинками. (Наприклад, електрична сила відштовхування між двома електронами виникає за рахунок обміну віртуальними фотонами, які ніколи не можна виявити безпосередньо, але якщо один електрон пролітає повз іншого, то можуть випускатися реальні фотони, які ми виявляємо як світлові хвилі.)

Силові частинки можна розділити на чотири категорії залежно від величини сили, яку вони переносять, і з якими частинками вони взаємодіють. Слід підкреслити, що такий поділ на чотири класи штучний: так зручно для розроблення часткових теорій, але за цим нема нічого глибшого. Врешті, більшість фізиків

сподівається, що вдасться створити єдину теорію, яка пояснить усі чотири сили як різні сторони єдиної сили. Справді, багато хто скаже, що це головна мета сучасної фізики. Останнім часом зроблено результативні спроби об'єднати три з чотирьох категорій сил — і я опишу їх у цьому розділі. Питання про об'єднання з останньою категорією, гравітацією, ми залишимо на потім.

Отже, перша категорія — гравітаційна сила. Ця сила універсальна, тобто кожна частинка відчуває силу тяжіння, відповідно до своєї маси, або енергії. Гравітація набагато слабша проти трьох інших сил; така слабка, що ми б взагалі її не помічали, якби не дві її специфічні властивості: вона може діяти на великих відстанях і вона завжди притягальна.

Це означає, що дуже слабкі гравітаційні сили між окремими частинками в двох великих тілах, таких як Земля і Сонце, можуть в сумі дати значну силу. Три інші сили або короткодійні, або іноді відштовхують, іноді притягують, тому вони мають тенденцію компенсуватися. Згідно з квантовомеханічним підходом до гравітаційного поля, силу між двома частинками речовини переносить частинка зі спіном 2, яку називають гравітоном. Останній не має власної маси, тому сила, яку він переносить, далекодійна. Гравітаційну силу між Сонцем і Землею приписують обмінні гравітонами між частинками, з яких складаються ці два тіла. Хоча обмінювані частинки віртуальні, вони, безперечно, створюють вимірний ефект — визначають орбіту Землі навколо Сонця! Реальні гравітони утворюють те, що класичні фізики називали б гравітаційними хвилями, але вони дуже слабкі, і їх так важко спостерегти, що досі ще не виявили.

Друга категорія — електромагнетна сила, що діє між електрично зарядженими частинками, такими як електрони і кварки, але не між незарядженими частинками, такими як гравітон. Вона набагато сильніша за гравітаційну: електромагнетна сила, що діє між двома електронами, приблизно в мільйон мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з сорока двох нулями) разів більша від гравітаційної. Але існують два види електричного заряду — позитивний і негативний. Відштовхувальна сила діє між двома позитивними зарядами, як і між двома негативними, а притягальна сила діє між позитивним і негативним. Великі тіла, наприклад Земля чи Сонце, містять майже рівні кіль-

кості позитивних і негативних зарядів. Отже, притягальні та відштовхувальні сили між окремими частинками майже компенсують одна одну, і залишається дуже мала сумарна електромагнетна сила. Однак на малих масштабах атомів і молекул електромагнетні сили домінують. Електромагнетне притягання між негативно зарядженими електронами та позитивно зарядженими протонами в ядрі, змушує електрони обертатися навколо ядра атома, точно так само, як гравітаційне притягання змушує Землю обертатися навколо Сонця. Електромагнетне притягання описують як спричинене обміном великим числом віртуальних безмасових частинок зі спіном 1, яких називають фотонами. Знову ж, фотони, якими обмінюються, — це віртуальні частинки. Однак коли електрон переходить з однієї дозволеної орбіти на іншу, ближчу до ядра, вивільняється енергія і випускається реальний фотон, що можна при відповідній довжині хвилі спостерігати як видне світло людським оком, або ж за допомогою якого-небудь детектора фотонів, наприклад фотоплівки. Однаковою мірою, якщо реальний фотон зіштовхується з атомом, електрон може перейти з орбіти, ближчої до ядра, на дальшу від нього. При цьому використовується енергія фотона, тому вона поглинається.

Третя категорія — так звана слабка ядерна сила, яка відповідає за радіоактивність і діє на всі частинки речовини зі спіном $1/2$, але не на частинки зі спіном 0, 1, 2, такі як фотони і гравітони. Слабка ядерна сила була не дуже добре зрозуміла до 1967 року, коли Абдус Салам з Імперського коледжу Лондона, і Стівен Вайнберг з Гарвардського університету одночасно запропонували теорію, що об'єднала цю взаємодію з електромагнетною силою, точно як Максвел об'єднав електрику і магнетизм приблизно за сто років до того. Вони припустили, що, на додаток до фотона, існують ще три інші частинки зі спіном 1, відомі разом як масивні векторні бозони, що переносять слабку силу. Вони були названі W^+ (дабл'ю-плюс), W^- (дабл'ю-мінус) і Z^0 (зед-нуль), і кожна мала масу близько 100 GeV (GeV означає гігаелектронвольт, або мільярд електронвольт). Теорія Вайнберга — Салама виявляє властивість, відому як спонтанне порушення симетрії: коли ті, що видаються низкою зовсім різних частинок при низьких енергіях, насправді всі виявляються тим же типом частинки, тільки в різних станах. При високих енергіях усі

ці частинки поведуться аналогічно. Ефект швидше схожий на поведінку кульки на колесі рулетки. При всіх високих енергіях (тобто при швидкому обертанні колеса) кулька поводить, по суті, однаково — обертається і обертається по колу. Але коли колесо сповільнюється, енергія кульки зменшується, і врешті-решт вона падає в одну з тридцяти семи канавок на колесі. Іншими словами, при низьких енергіях може існувати тридцять сім станів, в яких може бути кулька. Якби ми чомусь могли спостерігати за кулькою тільки при низьких енергіях, то вважали б, що існує тридцять сім різних типів кульок!

Згідно з теорією Вайнберга — Салама, при енергіях, значно вищих за 100 ГеВ, три нові частинки і фотон поведуться аналогічним чином, а при нижчих енергіях, тобто в більшості звичайних ситуацій, ця симетрія між частинками буде порушена. W^+ , W^- і Z^0 набували б великих мас, а створювані ними сили мали б дуже малий радіус дії. Коли Вайнберг і Салам висунули свою теорію, їм мало хто повірив, а пришвидшувачі частинок не були достатньо потужні, щоб досягти енергії 100 ГеВ, необхідної для народження реальних W^+ , W^- і Z^0 частинок. Однак роки десь через десять інші передбачення теорії щодо нижчих енергій так добре узгодилися з експериментом, що 1979 року Вайнберг і Салам були удостоєні Нобелівської премії разом з Шелдоном Глешоу (теж з Гарварду), який запропонував схожу єдину теорію електромагнетних і слабких ядерних сил. Нобелівському комітетові не довелося пекти рака за можливу помилку, бо 1983 року в ЦЕРНі (Європейському центрі ядерних досліджень) відкрито трьох масивних партнерів фотона з правильно передбаченими значеннями маси та іншими властивостями. Карло Рубія, що очолював команду з декількох сотень фізиків, яка зробила це відкриття, отримав Нобелівську премію 1984 року разом з інженером ЦЕРНу Симоном Ван дер Меєром, що розробив систему накопичення античастинок, яка була використана. (У наші дні дуже важко залишити свій слід в експериментальній фізиці, хіба що ви вже на вершині!)

Четверта категорія — сильна ядерна сила (взаємодія)²¹, що утримує разом кварки в протоні та нейтроні, а протони і нейтро-

²¹ В англійській мові вживають сполуки *strong force*, *strong interaction* і *weak force*, *weak interaction*, які українською звичайно називають (в обох випад-

ни — в атомному ядрі. Вважають, що цю силу переносить ще одна частинка зі спіном 1, названа глюоном, що взаємодіє тільки з глюонами та кварками. Сильна ядерна сила має одну незвичну властивість, названу конфайнментом (утримуванням): частинки завжди пов'язуються разом у комбінаціях, що не мають кольору. Не можна мати одного кварка самого по собі, бо він матиме колір (червоний, зелений або синій). Натомість, червоний кварк має бути з'єднаний із зеленим і синім «низкою» глюонів (червоний + зелений + синій = білий). Такий триплет утворює протон або нейтрон. Є інша можливість: коли кварк і антикварк об'єднуються в пару (червоний + античервоний, або зелений + антизелений, або синій + антисиній = білий). Такі комбінації складають частинки, відомі як мезони; вони нестабільні, бо кварк і антикварк можуть анігілювати один з одним, утворюючи електрони та інші частинки. Аналогічно, конфайнмент запобігає наявності окремого, самого по собі глюона, бо глюони теж мають колір. Замість цього, має бути набір глюонів, щоб їхні кольори в сумі давали білий. Такий набір утворює нестабільну частинку, названу глюболом.

Через те, що конфайнмент запобігає спостереженню поодинокого кварка або глюона, може здатися, що саме поняття про кварки і глюони як частинки дещо метафізичне. Однак є ще

ках) «сильною взаємодією» і «слабкою взаємодією». «Слабку силу» вживають у нас рідко, а «сильну силу» не вживають узагалі. Але при цьому часто вживані сполуки на кшталт «чотири фундаментальні сили» і коли доходить до їх переліку, перші дві (гравітацію і електромагнетну) називають зазвичай силами, а дві інші (слабку і сильну) — зазвичай взаємодіями. Щоб уникнути такого асиметричного вжитку тут *strong force* перекладено як «сильна сила», *weak force* — «слабка сила». При цьому слід зауважити, що загалом тепер частіше говорять про чотири фундаментальні взаємодії, і відповідно гравітаційну, електромагнетну, слабку, сильну взаємодії. Проте, зважаючи на наявність у провідних наукових мовах паралельних термінів, доцільно їх мати і в українській: *сильна взаємодія* / *сильна [ядерна] сила* / *кольорова сила*. Для порівняння: в англійській — *strong interaction* / *strong force* / *nuclear strong force* / *colour force*; в німецькій — *starke Wechsel starke wirkung* (*сильна взаємодія*) / *starke Kraft* (*сильна сила*), *Gluonenkraft*, *Farbkraft*; у французькій — *interaction forte* (*сильна взаємодія*) / *force forte* (*сильна сила*), *force de couleur*. Відповідно: *weak interaction* / *weak force* / *nuclear weak force*; *schwache Wechselwirkung* / *schwache Kernkraft* / *β-Wechselwirkung*; *interaction faible* / *force faible* / *force nucléaire faible*. — Прум. ред.

одна властивість сильної ядерної сили, названа асимптотичною свободою, що робить поняття кварків і глюонів добре означеним. За звичайних енергій сильна ядерна сила дійсно сильна і щільно пов'язує кварки разом. Проте, як показують експерименти на потужних пришвидшувачах, при високих енергіях сильна взаємодія набагато слабкіша, а кварки та глюони поведуться як майже вільні частинки. На рис. 5.2 показано фотографію зіткнення високоенергетичних протона і антипротона. Успіх об'єднання електромагнетних і слабких ядерних сил привів до низки спроб об'єднати ці дві сили з сильною ядерною в так званій теорії великого об'єднання (або ТВО). Ця назва швидше перебільшення: сумарні теорії і не такі всі великі, і не цілком об'єднані, бо в них не входить гравітація. І при цьому вони насправді не повні теорії, бо містять низку параметрів, значення яких не можна передбачити з теорії, а їх треба вибирати, щоб узгодити з експериментом. Проте вони можуть бути кроком до повної, цілком єдиної теорії. Основна ідея теорій великого об'єднання полягає в такому: як уже згадано вище, сильна ядерна сила стає слабкіша при високих енергіях. З іншого боку, електромагнетні та слабкі сили, які не є асимптотично вільні, при високих енергіях сильнішають. За яко-



Рис. 5.2. Протон і антипротон зіштовхуються при високій енергії, утворюючи кілька майже вільних кварків.

їсь дуже великої енергії, так званої енергії великого об'єднання, всі ці три сили матимуть таку саму величину і стали б просто різними сторонами єдиної сили. Теорії великого об'єднання також передбачають, що при цій енергії різні частинки речовини зі спіном $1/2$, такі як кварки і електрони, всі будуть, по суті, однакові, тим самим досягаючи ще одного об'єднання.

Значення енергії великого об'єднання не дуже добре відоме, але воно, напевно, має становити щонайменше тисячу мільйонів мільйонів Гев. У пришвидчувачах нинішнього покоління можуть зіштовхуватися частинки з енергіями близько 100 Гев, а в планованих машинах ця величина зросте до декількох тисяч Гев. Але машина, яка була б досить потужна, щоб пришвидшувати частинки до енергії великого об'єднання, мала б бути така велика, як Сонцева система, і навряд чи буде профінансована за умов нинішнього економічного клімату. А отже неможливо безпосередньо експериментально перевірити теорії великого об'єднання. Однак, як і в разі електрослабкої єдиної теорії, існують низькоенергетичні наслідки, які перевірити можна.

Найцікавіший з них — передбачення, що протони, які становлять більшу частину маси звичайної речовини, можуть спонтанно розпадатися на легші частинки, такі як антиелектрони. Причина в тому, що, можливо, при енергії великого об'єднання немає істотної різниці між кварком і антиелектроном. Три кварки всередині протона зазвичай не мають достатньої енергії для перетворення на антиелектрони, але один з кварків може зовсім випадково дістати одного разу енергію, достатню для такого переходу, бо принцип невизначеності означає, що енергія кварків усередині протона не може бути точно фіксована. Протон міг би тоді розпастися. Ймовірність того, що кварк дістане достатню енергію, така мала, що, можливо, чекати цього доведеться принаймні мільйон мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з тридцятьма нулями) років. Це набагато більше за час, що минув з моменту Великого вибуху, який не перевищує десяти мільярдів років чи близько того (одиниця з десятьма нулями). Отже, можна було б подумати, що можливість спонтанного розпаду протона не можна перевірити експериментально. Можна, однак, збільшити шанси виявити розпад протона, спостерігаючи велику кількість речовини, що містить дуже велике число протонів. (Якщо спостеріга-

ти, наприклад, один з тридцятьма одним нулем протонів протягом року, можна було б сподіватися виявити, згідно з найпростішою теорією великого об'єднання, більш ніж один розпад протона.)

Деякі такі експерименти вже виконано, але жоден не дав певних доказів протонного або нейтронного розпаду. В одному з експериментів використано вісім тисяч тон води, і його проводили в соляній шахті Мортон в штаті Огайо (щоб уникнути інших подій, що відбуваються, будучи спричинені космічними променями, і які можна прийняти за розпад протона). А що протягом експерименту не виявлено жодного спонтанного розпаду протона, то можна вирахувати, що ймовірний час життя протона має бути більший за десять мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів років (одиниця з тридцятьма одним нулем). Це більше, ніж дає найпростіша теорія великого об'єднання, але є і складніші теорії, які передбачають довше життя. Для їх перевірки будуть потрібні ще чутливіші експерименти з іще більшими кількостями речовини.

І хоча дуже важко спостерегти спонтанний розпад протона, може виявитися, що саме наше існування — це наслідок зворотного процесу, утворення протонів, або, ще простіше, кварків, на самій початковій стадії, коли кварків було не більше, ніж антикварків, і це найприродніший спосіб уявити початок Всесвіту. Речовина на Землі здебільша складається з протонів і нейтронів, які, своєю чергою, складаються з кварків, але в ній немає ні антипротонів, ні антинейтронів, що складаються з антикварків, за винятком тих кількох, що фізики створили на великих пришвидчувачах частинок. Ми маємо докази завдяки космічним променям, що те ж саме справедливо і для всієї речовини в нашій Галактиці: у ній немає ні антипротонів, ні антинейтронів, за винятком тієї невеликої кількості, що утворюються як пари частинка-античастинка у високоенергетичних зіткненнях. Якби в нашій Галактиці були великі ділянки антиречовини, то можна було б очікувати сильного випромінювання від меж розділу областей речовини і антиречовини, де багато частинок стикалися б зі своїми античастинками, анігілюючи одна з одною і виділяючи високоенергетичне випромінювання.

У нас немає прямих доказів щодо того, чи речовина інших галактик складається з протонів і нейтронів, чи з антипротонів і

антинейтронів, але має бути або перше, або друге: в межах однієї галактики не може бути суміші, бо в цьому разі ми б спостерігали потужне випромінювання в результаті їхньої анігіляції. Тому ми вважаємо, що всі галактики складаються з кварків, а не з антикварків; видається неймовірним, щоб одні галактики могли складатися з речовини, а інші — з антиречовини.

Чому кварків має бути так набагато більше, ніж антикварків? Чому їхні кількості не однакові? Нам, звісно, пощастило, що кількості не рівні, бо якби вони були однакові, то майже всі кварки і антикварки занігілювали б один з одним у ранньому Всесвіті, залишивши його заповненим промінням, але навряд чи залишивши хоч якусь речовину. Не було б тоді ні галактик, ні зір, ні планет, на яких могло б розвиватися людське життя. На щастя, теорії великого об'єднання можуть пояснити, чому Всесвіт тепер має містити більше кварків, ніж антикварків, навіть якщо на самому початку їх було порівну. Як ми вже знаємо, теорії великого об'єднання дозволяють кваркам при високих енергіях перетворюватися на антиелектрони. Вони також дозволяють і зворотні процеси, коли антикварки перетворюються на електрони, а електрони і антиелектрони — в антикварки та кварки. Був момент у дуже ранньому Всесвіті, коли він був такий гарячий, що енергія частинок була достатньо висока для цих перетворень. Але чому це мало привести до того, що кварків стало більше, ніж антикварків? Причина криється в тому, що закони фізики не зовсім однакові для частинок і античастинок.

До 1956 року вважали, що закони фізики підлягають кожній з трьох симетрій, названих С, Р і Т. Симетрія С означає, що закони однакові для частинок і античастинок. Симетрія Р означає, що закони фізики однакові для будь-яких ситуацій і їх дзеркального відображення (дзеркальним відображенням частинки, що закручується в правоспрямованому напрямі, буде така, що закручується в лівоспрямованому). Симетрія Т означає, що якщо зміниться на зворотний напрям рух усіх частинок і античастинок, то система має повернутися назад до того, що було в раніші часи; іншими словами, закони однакові в прямому і зворотному напрямках часу. У 1956 році два американських фізики, Цзундао Лі і Чженьнін Янг, припустили, що слабка сила насправді не підкоряється симетрії Р. Іншими словами, через слабку силу

Всесвіт може розвиватися інакше, ніж його дзеркальне відображення. У тому ж році Цзяньсюн Ву, їхня колега, довела, що це припущення правильне. Вишикувавши в магнетному полі ядра радіоактивних атомів так, щоб вони всі оберталися в одному напрямку, вона показала, що в одному напрямку електронів випускається більше, ніж в іншому. Наступного року Лі та Янг за свою ідею отримали Нобелівську премію. Також виявлено, що слабкі сили не підкоряються і симетрії C . Тобто світ, що складається з античастинок, поводить інакше, ніж наш світ. Проте видавалося, що слабка сила підлягає комбінованій CP -симетрії. Тобто Всесвіт розвивався б так само, як його дзеркальне відображення, якщо, крім того, кожна частинка була б замінена її античастиною! Але 1964 року ще два американці, Дж. В. Кронін і Вел Фітч, виявили, що в розпаді частинок, названих K -мезонами, порушується навіть CP -симетрія. Кронін і Фітч зрештою отримали за свою роботу Нобелівську премію в 1980 році. (Багато премій присуджено за виявлення того, що Всесвіт не такий простий, як можна було подумати!).

Існує математична теорема, яка стверджує: будь-яка теорія, що підлягає квантовій механіці та теорії відносності, повинна завжди підлягати комбінованій симетрії CPT . Іншими словами, Всесвіт має поводитися так само, якщо замінити частинки античастинками, взяти дзеркальне відображення, а також зворотний напрям часу. А Кронін і Фітч показали, що якщо замінити частинки античастинками і взяти дзеркальне відображення, але не обернути напрям часу, то Всесвіт не буде поводитися так само. Отже, закони фізики мають змінитися, якщо обернути напрям часу — вони не підлягають симетрії T .

Незаперечно, ранній Всесвіт не підлягає симетрії T : коли час тече вперед, Всесвіт розширюється, а якби він потік назад, то Всесвіт стискався б. А що існують сили, які не підлягають симетрії T , то звідси випливає, що в міру розширення Всесвіту під дією цих сил антиелектрони могли б перетворюватися на кварки частіше, ніж електрони на антикварки. Потім, коли Всесвіт розширювався і охолоджувався, антикварки і кварки анігілювали б, але що кварків було б більше, ніж антикварків, невеликий надлишок кварків залишився б. Саме з них і складається матерія, яку ми бачимо сьогодні, і з якої утворені ми самі. Отже,

саме наше існування можна розглядати як підтвердження теорії великого об'єднання, правда, тільки як якісне; невизначеності такі, що ніхто не може передбачити, ні скільки кварків залишиться після анігіляції, ні навіть чи будуть ці частинки кварками чи антикварками. (Однак, якби у надлишку були антикварки, ми б просто назвали їх кварками, а кварки — антикварками.)

Теорії великого об'єднання не охоплюють гравітаційну силу. Це не має великого значення, бо гравітація — така слабка сила, що її ефектами можна просто знехтувати, коли ми маємо справу з елементарними частинками або атомами. Однак той факт, що вона далекодійна й завжди притягальна, означає, що її дії всі сумуються. Отже, для досить великої кількості частинок речовини гравітаційні сили можуть переважати всі інші сили. Ось чому еволюцію Всесвіту визначає саме гравітація. Навіть для об'єктів розміром як зорі притягальна сила гравітації може переважити всі інші сили і привести до колапсу зорі. Моя робота у 70-х роках зосереджена на чорних дірах, які можуть виникнути в результаті такого колапсу зорі, та інтенсивних гравітаційних полях навколо них. Саме вона навела на перші думки про те, як квантова механіка і загальна теорія відносності можуть впливати одна на одну — пробліск форми квантової теорії гравітації, поки ще не розробленої.

Розділ 6

ЧОРНІ ДІРИ

Термін «чорна діра» виник зовсім недавно. Його запровадив 1969 року американський науковець Джон Вілер, щоб графічно описати поняття, яке появилось близько двохсот років тому, коли існували дві теорії про світло: згідно з першою теорією, якій віддавав перевагу Ньютон, світло складалося з частинок; згідно з другою — з хвиль. Тепер ми вже знаємо, що насправді обидві теорії правильні. Згідно з корпускулярно-хвильовим дуалізмом квантової механіки, світло можна розглядати і як хвилю, і як частинку. Теорія, яка стверджувала, що світло складається з хвиль, не пояснювала, як воно реагуватиме на силу тяжіння. Але якщо світло складається з частинок, то можна було б очікувати, що гравітація діє на них так само, як на гарматні ядра, ракети та планети. Спочатку люди гадали, що частинки світла рухаються нескінченно швидко, і тому сила тяжіння не може сповільнити їхнього руху. Проте Ремер відкрив, що світло поширюється з кінцевою швидкістю, тому гравітація може істотно впливати.

Виходячи з цього припущення, викладач Кембридзького університету Джон Мічел опублікував 1783 року статтю в часописі «Філософські праці Лондонського королівського товариства», в якій зазначив, що достатньо масивна і компактна зоря матиме таке сильне гравітаційне поле, що світло не зможе вивратися: будь-яке світло, випромінене поверхнею зорі, перш ніж змогло б сильно віддалитись, затягне назад її гравітаційне притягання. Мічел припустив, що може бути сила-силенна таких зір. Хоч ми не в змозі бачити їх, бо їхнє світло не доходить до нас, однак ми відчуватимемо їхнє гравітаційне притягання. Тепер такі об'єкти ми називаємо чорними дірами, адже вони саме такі: чорні порожнини в космосі. Через кілька років, вочевидь,

незалежно від Мічела подібну пропозицію висунув французький науковець маркіз де Лаплас. Доволі цікаво, що Лаплас згадає її тільки у першому та другому виданнях своєї книжки «Система світу» і випускає в подальших, можливо, він вирішив, що це була божевільна ідея. (Крім того, корпускулярна теорія світла потрапила в неласку в XIX столітті. Тоді здавалося, що все можна пояснити за допомогою хвильової теорії, а відповідно до неї було неочевидно, що сила тяжіння взагалі впливає на світло).

Насправді це не послідовно — розглядати світло як гарматні ядра в Ньютоновій теорії гравітації, бо швидкість світла стала²². (Гарматне ядро, яке летить угору від Землі, буде сповільнюватися під дією сили тяжіння, врешті-решт зупиниться і почне падати назад; тоді як фотон продовжуватиме рухатись угору зі сталою швидкістю. Тож як впливає Ньютонова сила тяжіння на світло?) Послідовна теорія про те, як сила тяжіння впливає на світло, з'явилася допіру тоді, коли 1915 року Айнштайн запропонував загальну теорію відносності. Та минуло ще чимало часу, поки зрозуміли її наслідки для масивних зір.

Щоб збагнути, як може утворитися чорна діра, потрібно спершу зрозуміти життєвий цикл зорі. Зоря утворюється тоді, коли велика кількість газу (здебільшого водню) починає стягуватися завдяки своєму гравітаційному притяганняю. Вона стискається, атоми газу дедалі частіше зіштовхуються один з одним, на щораз більшій швидкості — газ нагрівається. Врешті газ стає такий гарячий, що атоми водню при зіткненні вже не відскакують один від одного, а зливаються, утворюючи гелій. Тепло, що виді-

²² Стала швидкість світла чи ні, залежатиме від того, як ми вимірюємо відстані. Коли Айнштайн обчислював у 1915 р. відхилення світла гравітаційним полем Сонця, він вважав, що швидкість світла поблизу Сонця менша, ніж віддалік. Тому світло й відхиляється (як у призмі). Сам Гокінг у своїх наукових працях використовує так звану метрику Шварцшильда, з якої випливає формула, як швидкість світла залежить від відстані R до центру кулеподібної маси $c(R) = c(1 - R_g/R)$ де R_g — так званий радіус Шварцшильда, що збігається з радіусом чорної діри, якщо маса, про яку йдеться, міститься під цим радіусом, c — це звичайна швидкість світла, коли нема гравітації. Як бачимо, при $R = R_g$ швидкість світла дорівнює нулеві. А позаяк ніщо не можна розігнати до швидкості світла (навіть рівної нулеві!), то ніщо й не може вирватися з чорної діри (якщо не враховувати квантових ефектів, як це зробив Гокінг). — Прим. Ю. Степановського.

ляється під час цієї реакції, схожої на керований вибух водневої бомби, викликає світіння зорі. Це додаткове тепло також підвищує тиск газу, поки він не урівноважить гравітаційне притягання і газ не перестане стискатися. Це трохи схоже на повітряну кулю, де є баланс між тиском повітря всередині, яке намагається збільшити розміри кулі, та натягом гуми, що намагається зробити кулю меншою. Зорі залишатимуться в такому стабільному стані ще довго, допоки тепло від ядерних реакцій урівноважуватиме гравітаційне притягання. Однак врешті-решт у зорі вичерпається водень та інше ядерне паливо. Звучить як парадокс, але що більше палива зоря має від самого початку, то швидше воно закінчується. Річ ось у чому: що масивніша зоря, то гарячіша вона має бути, щоб урівноважити своє гравітаційне притягання. А що гарячіша, то швидше вона використає паливо. Нашому Сонцю, ймовірно, вистачить палива ще приблизно на п'ять мільярдів років, однак масивніші зорі можуть вичерпати своє паливо вже через сотню мільйонів років — за менше часу, ніж існує наш Всесвіт. Коли в зорі закінчується паливо, вона холодне і стискається. А що стається з нею опісля, вперше збагнули наприкінці 1920-х років.

1928 року індійський аспірант Субраманьян Чандрасекар вирушив до Англії, де навчався в Кембриджі у британського астронома сера Артура Едингтона, фахівця із загальної теорії відносності. (Кажуть, що на початку 1920-х років один журналіст сказав Едингтонові, що чув, нібито лише троє людей у всьому світі розуміють загальну теорію відносності. Едингтон задумався, а тоді відповів: «Я намагаюся згадати, хто цей третій».) Під час морської подорожі з Індії Чандрасекар розрахував, якої величини могла бути зоря, щоб і далі опиратися силі власного тяжіння після того, як витратить усе своє паливо. Ось до якого висновку він дійшов: коли зоря зменшується, частинки речовини наближаються одна до одної, а згідно з принципом Паулі, вони мусять мати дуже різні швидкості. Це змушує їх віддалятися одна від одної і це приводить до того, що зоря збільшується. Так зоря зберігає постійний радіус, утримуючи рівновагу між гравітаційним притяганням і відштовхуванням, яке виникає з принципу Паулі — так само як раніше тепло зрівноважувало гравітацію.

Утім Чандрасекар зрозумів, що відштовхування, яке може забезпечити принцип Паулі, має певну межу. Теорія відносності об-

межує максимальну різницю у швидкостях частинок речовини в зорі швидкістю світла. Це означає, що коли зоря стане достатньо щільною, відштовхування, спричинене принципом Паулі, буде слабше за гравітаційне притягання. Чандрасекар вирахував, що холодна зоря, маса якої у півтора раза перевищує масу Сонця, не зможе опиратися силі власного тяжіння. (Цю масу тепер називають Чандрасекаровою границею). Таке ж відкриття зробив приблизно в той же час російський науковець Лев Давидович Ландау.

Це мало неабиякі наслідки для подальшої долі масивних зір. Якщо маса зорі менша за Чандрасекарову границю, вона може врешті-решт перестати стискатися і зупиниться в одному можливому кінцевому стані, такому як «білий карлик», з радіусом кілька тисяч миль і густиною сотень тон на кубічний дюйм. Білий карлик підтримується внаслідок відштовхування електронів у його речовині, згідно з принципом Паулі. Ми спостерігаємо велику кількість таких білих карликів. Один із перших виявлених — зоря, що рухається по орбіті навколо Сиріуса, найяскравішої зорі на нічному небі.

Ландау зазначив, що зоря може мати ще один кінцевий стан, також з граничною масою приблизно рівною одній чи двом масам Сонця, але при цьому набагато менша, ніж навіть білий карлик. Ці зорі, згідно з принципом Паулі, підтримуються внаслідок відштовхування між нейтронами і протонами, а не між електронами. Через це такі зорі називали нейтронними. Їхній радіус дорівнює всього десять миль, а густина — сотні мільйонів тон на кубічний дюйм. У той час, коли нейтронні зорі вперше передбачили, не було жодного способу, щоб їх можна було спостерегти. Виявили їх значно пізніше.

З іншого боку, зорі, маса яких перевищує Чандрасекарову границю, мають велику проблему, коли закінчується їхнє паливо. У деяких випадках вони вибухають або позбуваються достатньої кількості речовини, зменшуючи свою масу до нижчої за граничну і так уникають катастрофічного гравітаційного колапсу. Але важко повірити в те, що так відбувається завжди, хоч би яка велика була зоря. Як вона знатиме, що має скинути вагу? Та й навіть якщо кожній зорі вдасться позбутися достатньої маси, щоб уникнути колапсу, що трапиться, якщо ви додасте більше маси до білого карлика чи нейтронної зорі, щоб вони

перевищили границю? Чи вона колапсуватиме до нескінченної густини? Едингтона приголомшило таке припущення і він відмовлявся вірити висновкам Чандрасекара. Едингтон вважав, що зоря просто не може сколапсувати в одну точку. Так гадало більшість науковців: сам Айнштайн написав статтю, у якій стверджував, що зорі не скорочуватимуться до нульового розміру. Ворожість інших науковців, особливо Едингтона, його колишнього вчителя і чільного фахівця зі структури зір, переконала Чандрасекара відмовитися від подальших досліджень у цьому напрямі й узятися натомість за інші проблеми в астрономії, як-от рух зоревих скупчень. Проте, коли він 1983 року був відзначений Нобелівською премією, то це було, принаймні почасти, за ранні роботи про граничну масу холодних зір.

Чандрасекар показав, що принцип Паулі не може зупинити колапс зорі, маса якої перевищує Чандрасекарову границю. Однак відповідь на питання, що ж станеться з такою зорею, згідно з загальною теорією відносності, уперше дав молодий американець Роберт Опенгаймер 1939 року. Втім він дійшов висновку, що не буде ніяких спостережних наслідків, які могли б виявити тогочасні телескопи. Невдовзі вибухнула Друга світова війна, і сам Опенгаймер активно долучився до проєктування атомної бомби. Після війни проблема гравітаційного колапсу була значною мірою забута, бо більшість науковців зацікавилися тим, що відбувається в масштабах атома та його ядра. Інтерес до великомасштабних проблем астрономії і космології, однак, відродився у 1960-х роках завдяки великому збільшенню числа і діапазону астрономічних спостережень, викликаних застосуванням сучасних технологій. Тоді ж багато хто перевірив праці Опенгаймера і продовжив їх.

Завдяки праці Опенгаймера ми тепер маємо таку картину. Гравітаційне поле зорі змінює траєкторії світлових променів у просторі-часі відносно тих, які б вони мали, якби зорі не було. Світлові конуси, що позначають шляхи, якими рухаються у просторі й часі спалахи світла, що їх випромінюють верхівки конусів, дещо ввігнуті у бік поверхні зорі. Про це свідчить і викривлення світлових променів від далеких зір, яке можна спостерігати під час затемнення Сонця. Коли зоря стискається, гравітаційне поле біля її поверхні сильнішає, а світлові конуси вгинаються

ще більше. Світлу стає важче покинути поверхню зорі, тому далекому спостерігачеві світло здається тьмянішим і червонішим. Врешті-решт зоря стягується до критичного радіуса, і гравітаційне поле біля її поверхні стає таке сильне, що світло не може покинути зорю, адже світлові конуси занадто сильно ввігнуті (рис. 6.1). Згідно з теорією відносності, ніщо не може рухатися швидше за світло. Якщо світло не може вирватися з поверхні зорі, то щось інше — й поготів. Гравітаційне поле тягне все назад. Отож маємо послідовність подій, область простору-часу, з якої ніщо не може вирватися і досягти віддаленого спостерігача. Ця область — те, що ми тепер називаємо чорної дірою. Її межа, названа горизонтом подій, збігається з траєкторіями світлових променів, що просто не в змозі вирватися з чорної діри.

Для того щоб зрозуміти, що б ви побачили, якби спостерігали за тим, як зоря колапсує і утворює чорну діру, мусите пам'ятати, що згідно з теорією відносності абсолютного часу не існує. Кожен спостерігач по-своєму вимірює час. Через гравітаційне поле зорі час для когось, хто на її поверхні, відрізнятиметься від часу для когось, хто на відстані від неї.

Уявімо собі безстрашного астронавта на поверхні колапсівної зорі, що колапсує з нею всередину і щосекунди посилає, за своїм годинником, сигнал на космічний корабель, що обертається навколо зорі. Якоїсь миті, наприклад об 11:00, зоря стягнеться до радіуса, меншого за критичний, і гравітаційне поле стане таким сильним, що ніщо не зможе з нього вирватися, тож сигнали більше не досягатимуть корабля. З наближенням до 11:00 його товариші, спостерігаючи з корабля, виявлятимуть, що інтервали між послідовними сигналами від астронавта все довші й довші, однак цей ефект буде дуже малий до 10:59:59. Між сигналами, що їх астронавт послав о 10:59:58 і 10:59:59, мине трішки більше за секунду, а от сигналу від 11:00 вони мали б чекати вічно. Світлові хвилі, що випромінюються з поверхні зорі між 10:59:59 і 11:00 за годинником астронавта, розтягнуться за міркою корабля на нескінченний проміжок часу. Часовий інтервал між прибуттям послідовних хвиль на корабель ставатиме щораз довшим, тому світло від зорі здаватиметься чимраз червонішим і слабшим. Врешті-решт зоря стане такою тьмяною, що її не можна буде бачити з космічного корабля: залишиться

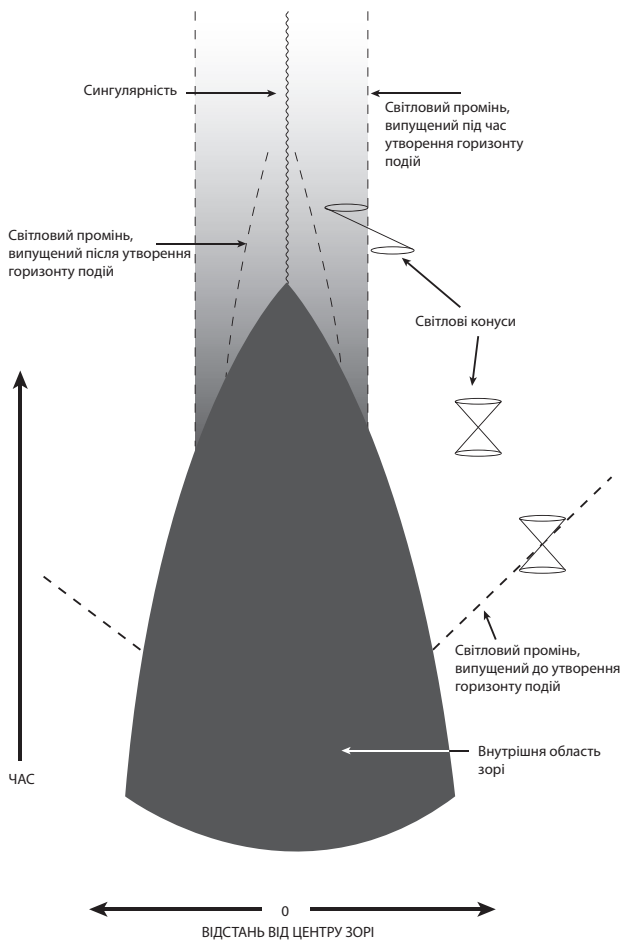


Рис. 6.1.

тільки чорна діра у просторі. Зоря, проте, продовжуватиме діяти такою ж силою тяжіння на космічний корабель, який буде, як і раніше, обертатися довкола чорної діри. Утім такий сценарій не зовсім реалістичний, хоч і через іншу проблему. Що далі від зорі ви перебуваєте, то слабша її сила тяжіння. Тому на ноги нашого астронавта-сміливця завжди діятиме сильніша гравіта-

ційна сила, ніж на його голову. Ця різниця в силах розтягуватиме нашого астронавта як спагеті або розірве його на шматки ще до того, як зоря стиснеться до критичного радіуса, коли утворюється горизонт подій! Утім ми вважаємо, що у Всесвіті є значно більші об'єкти, як-от центральні області галактик, які також можуть зазнати гравітаційного колапсу й утворити чорні діри; якийсь астронавт на одній з них не буде розірваний на шматки ще до того, як виникне чорна діра. Він, по суті, не відчуватиме нічого особливого, коли досягне критичного радіуса, і взагалі може не помітити, як мине точку неповернення. Проте область продовжуватиме колапсувати, і через декілька годин різниця між гравітаційними силами, що діятимуть на голову та ноги астронавта, так зросте, що знов-таки розірве його на шматки.

Робота, яку Роджер Пенроуз і я виконали у 1965–1970 роках показала, що згідно із загальною теорією відносності в чорній дірі мусить існувати сингулярність нескінченної густини та кривини простору-часу. Щось схоже на Великий вибух на початку часу, тільки цього разу це кінець часу для колапсівного тіла й астронавта. У такій сингулярності зазнають краху всі закони науки і наша здатність прогнозувати майбутнє. Однак непрогнозованість жодним чином не вплине на спостерігача, що перебуватиме поза чорною дірою, адже із сингулярності його не зможе досягти ані світло, ані якийсь інший сигнал. З огляду на цей чудовий факт Роджер Пенроуз висунув гіпотезу космічної цензури, яку можна перефразувати так: «Бог не терпить голої сингулярності». Іншими словами, сингулярності, спричинені гравітаційним колапсом, відбуваються тільки в місцях на кшталт чорних дір, де горизонт подій поштиво ховає їх від стороннього ока. Строго кажучи, це так звана слабка гіпотеза космічної цензури: вона захищає спостерігачів, які перебувають поза чорною дірою, від наслідків краху прогнозованості, що відбувається у сингулярності, але вона жодним чином не може зарадити бідолашному астронавтові, який падає в діру.

Є деякі розв'язки рівнянь загальної теорії відносності, що дозволяють нашому астронавтові побачити голу сингулярність: він може уникнути зіткнення із сингулярністю, а натомість провалитися крізь «червоточину» і вийти в іншій області Всесвіту. Це дало б великі можливості для мандрів у просторі й часі, але,

на жаль, виявляється, всі ці розв'язки вкрай нестабільні. Найменше збурення, наприклад, як присутність астронавта, може змінити їх так, що астронавт не зможе побачити сингулярності, аж поки не зіткнеться з нею, і його час не добіжить кінця. Іншими словами, сингулярність завжди буде в його майбутньому, і ніколи — в минулому. Сильна версія гіпотези космічної цензури стверджує, що в реалістичному розв'язку сингулярності завжди будуть або повністю у майбутньому (як сингулярності гравітаційного колапсу) або повністю у минулому (як Великий вибух). Я твердо вірю в космічну цензуру, тому побився у заклад із Кіпом Торном і Джоном Прескілом з Каліфорнійського технологічного інституту, що вона завжди буде справедлива. Однак я програв через технічні деталі, бо були пред'явлені приклади розв'язків для сингулярності, яку було видно здалеку. Отож мені довелося брязнути гаманцем і, згідно з умовою суперечки, прикрити їхню наготу. Але я можу претендувати на моральну перемогу. Голі сингулярності були нестабільні: через найменше збурення вони або зникнуть, або сховаються за горизонтом подій. Тому вони не можуть трапитися у реалістичних ситуаціях.

Горизонт подій — межа області простору-часу, з якої неможливо вирватися — діє швидше як однобічна мембрана довкола чорної діри: об'єкти на кшталт необачних астронавтів можуть провалитися крізь горизонт подій у чорну діру, але ніщо не може вийти з чорної діри через горизонт подій. (Не забувайте, що горизонт подій — це траєкторія у просторі-часі світла, яке силкується вирватися з чорної діри, а ніщо не може рухатися швидше за світло.) Горизонт подій досить добре можна описати так, як поет Данте описав вхід до пекла: «Хто йде сюди, покинь усі надії!». Усе і всяк, що падає через горизонт подій, незабаром досягне області нескінченної густини та кінця часу.

Загальна теорія відносності прогнозує, що важкі рухомі об'єкти спричиняють випромінювання гравітаційних хвиль — брижів у кривині простору, що рухаються зі швидкістю світла. Вони схожі на світлові хвилі, брижі електромагнетного поля, однак їх набагато важче виявити. Вони можуть бути спостережені завдяки ледь помітній зміні відстані, що вони спричиняють між об'єктами, які вільно рухаються. Декілька детекторів, які будують у США, Європі та Японії, вимірюватимуть зміщення на одну тисячамільйон-

мільйонмільйонну частку [милі] (одиниця з 21 нулем), або ж менше за [розмір] ядра атома, поділений на десять миль.

Як і світло, гравітаційні хвилі несуть енергію від об'єктів, що їх випромінюють. Тому можна припускати, що система масивних об'єктів врешті-решт заспокоїться і перейде в стаціонарний стан, адже випромінювання гравітаційних хвиль забере енергію всякого руху. (Це швидше схоже на те, як кинути у воду поплавець: спочатку він багаторазово гойдатиметься вгору-вниз, але позаяк брижі забирають його енергію, він перейде у стаціонарний стан.) Наприклад, рух Землі по своїй орбіті довкола Сонця спричиняє гравітаційні хвилі. Через втрату енергії орбіта Землі буде змінюватися, так що поступово вона стає щораз ближчою до Сонця, зрештою зіткнеться з ним і перейде у стаціонарний стан. Швидкість втрати енергії в разі Землі та Сонця дуже низька — вистачить хіба що на маленький електрообігрівач. Тобто в Землі це забере десь тисячу мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів років, щоб зіткнутися з Сонцем. Тож нема чого прямо тепер хвилюватися! Зміна орбіти Землі занадто повільна, щоб її заміряти, але ось уже кілька років спостерігають за таким самим явищем у системі PSR 1913 + 16 (PSR означає “пульсар,” особливий тип нейтронної зорі, що випромінює регулярні радіоімпульси). Ця система складається з двох нейтронних зір, що обертаються одна навколо одної. Енергія, яку вони втрачають через випромінювання гравітаційних хвиль, змушує їх рухатися по спіралі назустріч одна одній. Дж. Г. Тейлор і Р. А. Галс за це підтвердження загальної теорії відносності здобули 1993 року Нобелівську премію. Ці нейтронні зорі зіткнуться десь через триста мільйонів років. Просто, перш ніж це станеться, вони так швидко обертатимуться, що випромінюватимуть достатню кількість гравітаційних хвиль для детекторів на кшталт ЛІГО (LIGO — Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — лазерно-інтерферометрична гравітаційно-хвильова обсерваторія).

Під час гравітаційного колапсу зорі з утворенням чорної діри рухи будуть набагато швидші, тому інтенсивність, з якою енергія відноситься, буде набагато вища. Отож мине не надто багато часу до того, як вона опиниться в стаціонарному стані. Як цей кінцевий етап виглядатиме? Можна припустити, що це залежатиме від усіх складних властивостей зорі — не тільки її маси та швидкості

обертання, а й різних густин різних частин зорі та складних рухів газів усередині неї. А якщо б чорні діри були такі ж різноманітні, як об'єкти, що з них вони утворилися, то було б страшенно важко щось спрогнозувати щодо чорних дір загалом.

Утім 1967 року канадський науковець Вернер Ізраель (який народився у Берліні, виріс у Південній Африці та захистив докторську дисертацію в Ірландії) зробив справжнісіньку революцію в дослідженні чорних дір. Ізраель показав, що згідно із загальною теорією відносності необертні чорні діри мають бути дуже прості; вони ідеально сферичної форми, їхній розмір залежить тільки від їхньої маси, а будь-які дві такі чорні діри з однаковою масою ідентичні. Їх можна, по суті, описати окремим розв'язком рівнянь Айнштейна, відомим ще з 1917 року і знайденим Карлом Шварцшильдом невдовзі після відкриття загальної теорії відносності. Спочатку багато хто, зокрема й сам Ізраель, стверджували, що позаяк чорні діри мають бути ідеально сферичні, то будь-яка з них може утворитися тільки в результаті колапсу ідеально сферичного об'єкта. Отож будь-яка реальна зоря — яка ніколи не буває ідеально сферична — може сколапсувати тільки з утворенням голої сингулярності.

Було, однак, інше тлумачення результату Ізраеля, з яким виступили, зокрема, Роджер Пенроуз і Джон Вілер. Вони заявили: що швидкі рухи, пов'язані з колапсом зорі, означатимуть, що випромінєні нею гравітаційні хвилі, роблять її форму все сферичнішою, і до того моменту, коли вона опиниться в стаціонарному стані, буде точно сферична. Згідно з цим твердженням, будь-яка необертна зоря, хоч з якою складною формою чи внутрішньою структурою, врешті після гравітаційного колапсу буде як ідеально сферична чорна діра, розмір якої залежатиме тільки від її маси. Подальші розрахунки підтвердили цей погляд, який незабаром став загальноновизнаним.

Ізраелів результат стосувався тільки чорних дір, утворених з необертних тіл. 1963 року новозеландець Рой Кер знайшов сукупність розв'язків рівнянь загальної теорії відносності, що описували обертні чорні діри. Ці «Керові» чорні діри обертаються зі сталою швидкістю, а їхній розмір і форма залежать тільки від маси та швидкості обертання. Якщо обертання нульове, то чорна діра ідеально кругла, а розв'язок збігається з Шварцшильдо-

вим. Якщо ж обертання не нульове, то чорна діра випинається назовні поблизу екватора (так само як випинаються внаслідок свого обертання Земля чи Сонце), і що швидше вона обертається, то більше випинається. Щоб поширити результат Ізраеля на обертні тіла, припустили, що всяке обертне тіло, яке внаслідок колапсу утворило чорну діру, врешті-решт перейде у стаціонарний стан, описуваний розв'язком Кера.

1970 року мій кембридзький колега-аспірант Брендон Картер зробив перший крок до доведення цього припущення. Він довів, що якщо стаціонарна обертна чорна діра має вісь симетрії — як така собі дзиґа — то її розмір і форма залежатимуть тільки від її маси та швидкості обертання. Тоді 1971 року я довів, що будь-яка стаціонарна обертна чорна діра справді матиме таку вісь симетрії. Зрештою, 1973 року Дейвід Робінсон із Королівського коледжу в Лондоні скористався моїми та Картеровими результатами і показав, що припущення правильне: така чорна діра справді буде розв'язком Кера. Отже, після гравітаційного колапсу чорна діра опиниться в стані, в якому вона може обертатися, та не пульсувати. До того ж її розмір і форма залежатимуть тільки від її маси та швидкості обертання, а не від природи тіла, що утворило чорну діру внаслідок колапсу. Цей результат став відомий висловом: «Чорна діра не має волосся». Теорема про «безволосся» має велике практичне значення, адже вона сильно обмежує можливу кількість типів чорних дір. Тому можна створити детальні моделі об'єктів, що можуть містити чорні діри, і порівняти передбачення моделей зі спостереженнями. Крім того, це означає, що дуже великий обсяг інформації про тіло, що сколапсувало, має бути втрачений, коли утворилася чорна діра, адже опісля ми можемо виміряти хіба що масу та швидкість обертання цього тіла. Значення цього буде видно з дальшого розділу.

Чорні діри — це лише один із небагатьох випадків в історії науки, коли теорію докладно побудували як математичну модель, перш ніж були хоч якісь результати спостережень на підтвердження, що вона правильна. Справді, це раніше був основний аргумент противників чорних дір: як можна вірити в об'єкти, єдиний доказ існування яких — це розрахунки на підставі сумнівної загальної теорії відносності? Однак 1963 року астроном Паломарської обсерваторії в Каліфорнії Маартен

Шмідт виміряв червоний зсув ледь помітного зореподібного об'єкта у напрямі джерела радіохвиль під назвою 3C273 (номер джерела 273 у третьому Кембридзькому каталозі радіоджерел). Він визначив, що той занадто великий, щоб його спричинило гравітаційне поле: якби це був гравітаційний червоний зсув, об'єкт мав би бути такий масивний і близький до нас, що порушив би орбіти планет у Сонцевій системі. Це дозволило припустити, що натомість червоний зсув викликаний розширенням Всесвіту, а це, своєю чергою, означало, що об'єкт був на дуже великій відстані. І щоб його було видно з такої великої відстані, об'єкт мусить бути надзвичайно яскравий, тобто випромінювати величезну кількість енергії. Єдиним, який міг спасти на думку, механізмом, що вироблятиме таку велику кількість енергії, видавався гравітаційний колапс, тільки не однієї зорі, а всієї центральної області галактики. Виявлено низку інших схожих «квазізоревих об'єктів», або ж квазарів, зі значними червоними зсувами. Проте всі вони занадто далеко і через це за ними надто важко спостерігати, щоб забезпечити переконливі докази існування чорних дір.

Ще один аргумент на користь існування чорних дір з'явився 1967 року, коли кембридзька аспірантка Джоселін Бел-Бернел виявила в небі об'єкти, що випромінювали регулярні імпульси радіохвиль. Спочатку Бел та її науковий керівник Ентоні Г'юїш подумали, що вони, можливо, сконтактувалися з позаземною цивілізацією в Галактиці! Справді, я пам'ятаю, на семінарі, на якому оголосили про своє відкриття, вони назвали перші чотири виявлені джерела LGM 1–4 (аббревіатура LGM означає «Little Green Men» — «Маленькі Зелені Чоловічки»). Однак згодом і першовідкривачі, і всі решта дійшли менш романтичного висновку, що ці об'єкти — яким дали назву «пульсари» — це насправді обертні нейтронні зорі, що випромінювали імпульси радіохвиль через складну взаємодію між їхніми магнетними полями та навколишньою матерією. Це була погана новина для авторів космічних вестернів, але дуже обнадійлива для вузького кола тих, хто тоді вірив в існування чорних дір: це був перший безсумнівний доказ того, що нейтронні зорі існують. Нейтронна зоря має радіус близько десяти миль — тільки в кілька разів більший за критичний радіус, при якому зоря перетворюється на

чорну діру. Якщо зоря може стягнутися до такого малого розміру, то цілком можна припустити, що й інші зорі здатні стягнутися до ще меншого розміру і стати чорними дірами.

Як ми можемо сподіватися виявити чорну діру, що за означенням не випромінює світла? Це видається трохи схожим на те, як шукати чорну кішку в темній кімнаті. На щастя, є спосіб. Як зазначив Джон Мічел у своїй піонерській праці 1783 року, чорна діра все ж впливає гравітаційно на поблизу об'єкти. Астрономи виявили чимало систем, де дві зорі обертаються одна навколо одної, притягвані силою тяжіння. Крім того, вони виявили системи тільки з однією видимою зорею, що обертається довкола якогось невидного компаньйона. Однак не можна відразу ж зробити висновок, що цей компаньйон — чорна діра: можливо, це всього лиш занадто слабка зоря, якої не видно. Утім деякі з цих систем, зокрема Лебідь X-1 (рис. 6.2), до того ж потужні джерела Рентгенового проміння. Найкраще пояснення цього явища таке: з поверхні видимої зорі зносилась речовина. Падаючи на невидного компаньйона, вона рухається по спіралі (немов вода, що витікає з ванни), дуже нагрівається, випромінюючи Рентгенове проміння (рис. 6.3). Такий варіант розвитку подій потребує, щоб невидний об'єкт був крихітний, як білий карлик, нейтронна зоря або чорна діра. Найменшу можливу масу невидного об'єкта можна визначити зі спостережуваної орбіти видимої зорі. У разі Лебедя X-1 вона приблизно в шість разів перевищує масу Сонця, а згідно з обчисленнями Чандрасекара, це надто багато для невидного об'єкта, щоб він був білим карликом. Окрім того, це занадто велика маса для нейтронної зорі. Отож, видається, що це має бути чорна діра.

Існують інші моделі, щоб пояснити систему Лебедя X-1, що не містять чорної діри, але всі вони досить надумані. Чорна діра — ось, видається, єдине справді природне пояснення цих спостережень. Попри це, я таки заклався з Кіпом Торном із Каліфорнійського технологічного інституту, що насправді Лебідь X-1 не містить чорної діри! Так я застрахувався. Адже я присвятив багато зусиль чорним дірам — і все буде марно, якщо виявиться, що чорних дір не існує. Але в такому разі я виграв заклад і втішуся — адже чотири роки отримуватиму журнал «Приватний детектив» (Private Eye). Насправді, хоч ситуація з



Рис. 6.2. Яскравіша з двох зір поблизу центра світлин — Лебідь X-1, що, як вважають, складається з чорної діри і звичайної зорі, які обертаються одна навколо одної.

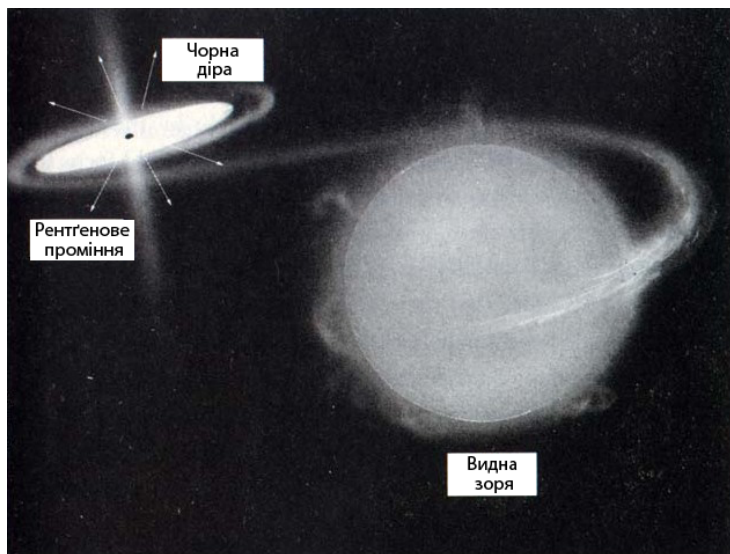


Рис. 6.3.

Лебедем Х-1 практично не змінилася, відколи ми 1975 року заклалися, однак тепер є стільки даних спостережень на користь чорних дір, що я визнав свою поразку. І заплатив передбачений штраф — передплатив Кіпові на рік журнал «Пентгауз» (Penthouse) — щоб пообурювалась його емансипована дружина.

Ми також тепер маємо докази для низки інших чорних дір у системах на кшталт Лебеда Х-1 у нашій Галактиці й у двох сусідніх галактиках — Магеланових Хмарах. Звісно, що чорних дір майже напевно набагато більше; за довгу історію Всесвіту багато зір мали спалити все своє ядерне паливо та сколапсувати. Кількість чорних дір цілком може бути навіть більша, ніж число видних зір — а їх налічується сотня мільярдів тільки в нашій Галактиці. Така величезна кількість чорних дір створює додаткове гравітаційне притягання — і це може пояснити, чому наша Галактика обертається саме з наявною швидкістю, адже маси видних зір недосить, щоб забезпечити її. Ми маємо також деякі докази, що в центрі нашої Галактики є набагато більша чорна діра, маса якої десь у сотню тисяч разів перевищує масу Сонця. Зорі в Галактиці, що проходять занадто близько від цієї чорної діри, будуть розриватися різницею у гравітаційних силах на їхній прилеглий та відлеглий стороні. Їхні рештки та газ, скинутий іншими зорями, полетять у бік чорної діри. Як і у разі з Лебедем Х-1, газ рухатиметься по спіралі та нагріватиметься, хоч і не так сильно. Його температури не вистачить для того, щоб випромінювати Рентгенове проміння, а от щоб стати компактным джерелом радіохвиль та інфрачервоного проміння, що його ми спостерігаємо у центрі галактики, — цілком.

Вважають, що подібні, тільки ще більші чорні діри, маса яких десь у сотню мільйонів разів перевищує масу Сонця, розташовані в центрах квазарів. Наприклад, спостереження, проведені за допомогою телескопа Габла, галактики, відомої як М87, виявили, що там міститься диск газу розміром 130 світлових років уперек, який обертається довкола центрального об'єкта, маса якого у два мільярди разів перевищує масу Сонця. Це може бути тільки чорна діра. Єдине джерело, здатне забезпечити величезну кількість енергії, що її випромінюють ці об'єкти, — це матерія, яка падає у надмасивну чорну діру. Коли матерія рухається по спіралі до чорної діри, вона змушує ту обертатися в тому

ж напрямі, приводячи до створення магнетного поля на кшталт того, що має Земля. Матерія, що падає, створює поблизу чорної діри дуже високоенергетичні частинки. Магнетне поле буде таке потужне, що воно може сфокусувати ці частинки у струмени, викидувані назовні вздовж осі обертання чорної діри, тобто в напрямках її північного та південного полюсів. Такі струмени справді спостережені в низці галактик і квазарів. Можна також розглянути можливість того, що існують чорні діри, з масою набагато меншою, ніж у Сонця. Такі чорні діри не могли б утворитися шляхом гравітаційного колапсу, адже їхні маси менші за Чандрасекарову границю: зорі з такою малою масою можуть опиратися тяжінню навіть після того, як вичерпають ядерне паливо. Чорні діри з малою масою можуть утворитися, тільки якщо матерія стиснеться до величезних густин під дією дуже великих зовнішніх тисків. Такі умови можуть виникнути у величезній водневій бомбі: фізик Джон Вілер якось вирахував, що якщо взяти всю важку воду з усіх світових океанів, то можна було б створити водневу бомбу, яка так сильно стисне речовину в центрі, що утвориться чорна діра. (Звісно, нікого не залишиться, щоб це побачити!) Практичніша можливість полягає в тому, що такі чорні діри з малою масою утворилися в умовах високих температур і тиску в дуже ранньому Всесвіті. Чорні діри могли з'явитися, тільки якщо ранній Всесвіт не був ідеально гладкий і однорідний, бо тільки невелика щільніша, ніж у середньому, область може бути стиснута так, щоб утворилася чорна діра. Натомість ми знаємо, що тоді існували певні неоднорідності, бо інакше матерія у Всесвіті була б до сучасної епохи розподілена ідеально рівномірно, а не згрупована разом у зорі та галактики.

Чи неоднорідності, необхідні, щоб пояснити утворення зір та галактик, привели й до утворення істотного числа «первісних» чорних дір, безумовно, залежить від особливостей умов у ранньому Всесвіті. Тож якби ми змогли визначити, скільки тепер у Всесвіті первісних чорних дір, ми чимало дізналися б про найранніші етапи Всесвіту. Первісні чорні діри, маса яких перевищує мільярд тон (масу великої гори), можна виявити тільки завдяки їхньому гравітаційному впливу на іншу, видну, матерію чи на розширення Всесвіту. Однак у дальшому розділі ми дізнаємося, що чорні діри врешті не зовсім й чорні — вони світять-

ся як гаряче тіло. І що вони менші, то сильніше світяться. Тому, хоч як це парадоксально, менші чорні діри, може статися, легше виявити, ніж великі!

Розділ 7

ЧОРНІ ДІРИ НЕ ТАКІ ВЖЕ Й ЧОРНІ

До 1970 року, коли я досліджував загальну теорію відносності, найбільше мене цікавило: існувала сингулярність Великого вибуху, чи ні. Втім одного вечора в листопаді того року, невдовзі після народження моєї доньки Люсі, я задумався перед сном про чорні діри. А що через стан здоров'я мені важко заснути, то я мав удосталь часу про них поміркувати. На той момент не було чіткого означення, які точки простору-часу лежать усередині чорної діри, а які — ззовні. А я вже обговорював із Роджером Пенроузом ідею про те, щоб означити чорну діру як множину подій, з якої неможливо вирватися на велику відстань. Нині це загальноприйняте означення. Це означає, що межу чорної діри, горизонт подій, утворюють промені світла, які просто не можуть вирватися з чорної діри, навічно зависаючи на її краю (рис. 7.1). Так наче б ви втікали від поліції, але ніяк не могли від неї відірватися, хіба випереджати на один крок!

Раптом я зрозумів, що траєкторії цих променів світла ніколи не зможуть зблизитися. Інакше вони врешті мали б зіткнутися. Так ніби ви б зіштовхнулися ще з кимось, хто б утікав від поліції у протилежному напрямі — тоді вас би обох спіймали! (Чи, як у цьому разі, впали б у чорну діру). Однак якби ці промені світла поглинула чорна діра, то вони б не могли бути на її межі. Отож траєкторії променів світла в горизонті подій повинні завжди бути паралельно одна до одної, тобто на віддалі. Можна висловитися ще й так: горизонт подій, межа чорної діри, це немов край тіні — тіні неминучої загибелі. Якщо ви поглянете на тінь, що її відкидає якийсь об'єкт з великої відстані, наприклад Сонце, то побачите, що промені світла на краю не наближаються один до одного.

Якщо промені світла, що утворюють горизонт подій — межу чорної діри, ніколи не можуть зближуватися, то площа го-

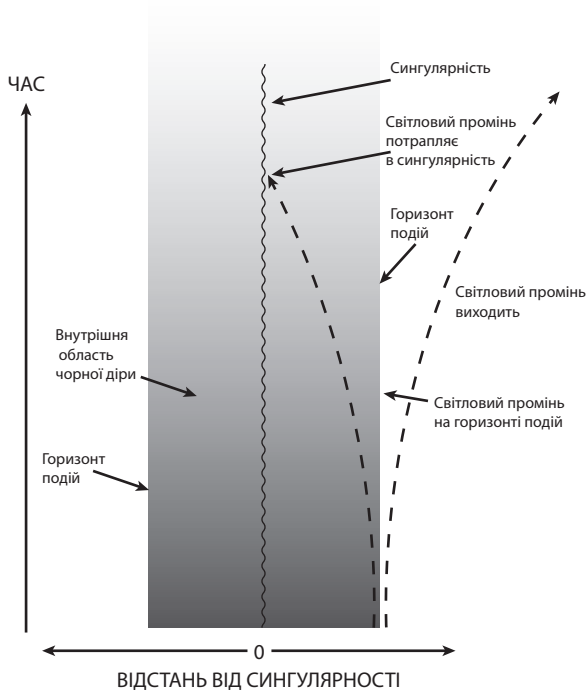


Рис. 7.1.

ризонту подій може залишатися такою самою або з часом збільшуватися, але в жодному разі не зменшуватися, бо це означатиме, що принаймні деякі з променів світла на краю мали б наближатися один до одного. Насправді площа горизонту подій зростатиме щоразу, як у чорну діру падатиме речовина або проміння (рис. 7.2). Або якщо дві чорні діри зіштовхнуться і зіллються разом в одну чорну діру, площа горизонту подій кінцевої чорної діри буде більша за суму площ горизонтів подій вихідних двох чорних дір або дорівнюватиме їй. Те, що площа горизонту подій не може зменшуватися, суттєво обмежує можливу поведінку чорних дір (рис. 7.3). Я був такий збуджений через своє відкриття, що майже не спав тієї ночі. Назавтра я зателефонував Роджерові Пенроузу. Він погодився зі мною. Думаю,

насправді він уже знав про цю властивість площі. Проте Роджер користувався трохи іншим означенням чорної діри. Він не усвідомлював, що за обома означеннями межі чорної діри будуть такі ж самі, а отже і їхні площі, за умови, що чорна діра заспокоїлася в стані, незмінному з часом.

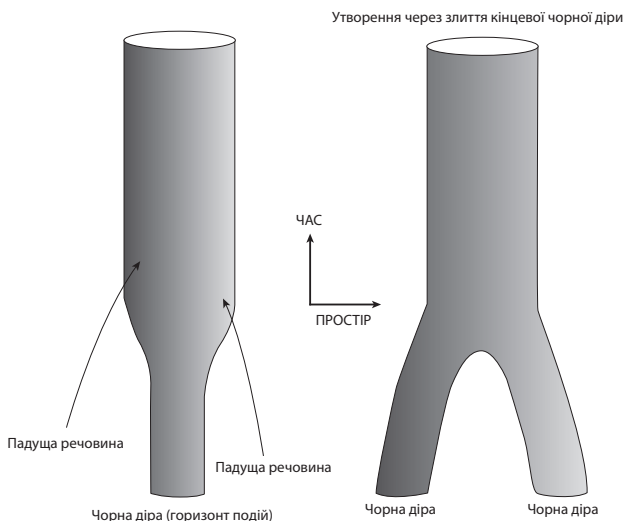


Рис. 7.2. та 7.3.

Властивість незменшення площі чорної діри була вельми схожа на поведінку однієї фізичної величини — ентропії, що являє собою міру безладу системи. Ми знаємо з власного досвіду: якщо все залишити, як є, то безлад дедалі зростатиме. (Варто лише перестати робити вдома ремонт, щоб це побачити!) З безладу можна створити лад (наприклад, пофарбувати будинок), але це потребує витрат сили та енергії й тому зменшує кількість наявної впорядкованої енергії.

Точне формулювання цієї ідеї відоме як другий закон термодинаміки. Він стверджує, що ентропія ізольованої системи завжди зростає, і що коли дві системи з'єднати разом, то ентропія об'єднаної системи буде більша за суму ентропій окремих систем. Наприклад, розглянемо систему молекул газу в короб-

ці. Молекули можна розглядати як маленькі більярдні кулі, що постійно зіштовхуються одна з одною і відбиваються від стінок коробки. Що вища температура газу, то швидше рухаються молекули; а тому вони частіше і сильніше вдаряються об стінки і чинять на них зсередини більший тиск. Припустімо, що спочатку всі молекули за перегородкою в лівій частині коробки. Якщо перегородку забрати, то молекули розлетяться і заповнять обидві половинки коробки. Згодом усі вони випадково могли б опинитись у правій чи знову лівій половині, проте куди ймовірніше, що в обох частинах молекул буде приблизно порівну. Такий стан менш упорядкований, або ж неупорядкованіший, ніж початковий, коли всі молекули були в одній половині. Тому кажуть, що ентропія газу зросла. А тепер припустімо, що в нас є дві коробки: одна з молекулами кисню, а інша — з молекулами азоту. Якщо об'єднати коробки і зняти перегородку, молекули кисню та азоту почнуть змішуватися. Пізніше найімовірнішим станом буде досить однорідна суміш цих молекул в обох коробках. Цей стан буде менш впорядкований, тобто матиме більшу ентропію, ніж початковий стан двох окремих коробок.

Другий закон термодинаміки має трохи інший статус, ніж інші закони науки, як-от Ньютонів закон тяжіння, бо він не завжди виконується, а тільки в значній більшості випадків. Ймовірність того, що всі молекули газу в нашій першій коробці згодом перебуватимуть в одній її половині, — одиниця поділена на багато мільйонів мільйонів, але це може статися. Однак якщо поблизу чорна діра, то, видається, є досить простий спосіб порушити другий закон: просто викинути в неї якусь речовину з великою ентропією, наприклад коробку з газом. Загальна ентропія речовини ззовні від чорної діри зменшиться. Звичайно, можна сказати, що повна ентропія, разом з ентропією всередині чорної діри, не зменшилась — але ми не можемо зазирнути всередину чорної діри, а отже й побачити, скільки ентропії в тамтешній речовині. Було б чудово, якби чорна діра мала якусь властивість, за якою зовнішні спостерігачі могли б визначити її ентропію, і яка б зростала щоразу, як у неї падала б речовина з ентропією. Після описаного вище відкриття, що площа горизонту подій збільшується щоразу, як у чорну діру падає речовина, аспірант із Принстона Джейкоб Бекенштайн висунув пропозицію, що міра ентро-

пії чорної діри — площа горизонту подій. Коли речовина з ентропією падає в чорну діру, площа горизонту подій зростає, тому сума ентропії речовини поза чорними дірами та площі горизонтів ніколи не зменшується.

Здавалось, що ця пропозиція у більшості випадків запобігає порушенню другого закону термодинаміки. Однак вона мала один неусувний недолік. Якщо чорна діра має ентропію, то мусять мати і температуру. Але тіло з якоюсь окремою температурою має випускати проміння з певною інтенсивністю. Всі знають, що якщо нагріти на вогні коцюбу, вона розжовіється і випромінюватиме, проте тіла з нижчою температурою також виділяють проміння; ми зазвичай цього не помічаємо, бо дуже мала його кількість. Це випромінювання необхідне для того, щоб не порушувався другий закон. Отож чорні діри мусять випромінювати. Але за своїм означенням чорні діри — це об'єкти, що не допускають, щоб щось випромінювалось. Тому здавалось, що площу горизонту подій чорної діри не можна розглядати як її ентропію. 1972 року Брендон Картер, мій американський колега Джим Бардин і я написали статтю, в якій вказали, що хоча між ентропією та площею горизонту подій багато схожості, очевидно, є згадана неусувна складність. Мушу зізнатися, що до написання статті мене почасти спонукало роздратування через Бекенштайна, який, на мою думку, неправильно застосував моє відкриття про те, що площа горизонту подій збільшується. Утім зрештою виявилось, що він таки по суті мав рацію, хоч і в спосіб, який він, напевне, й не уявляв.

У вересні 1973 року, будучи у Москві, я обговорював чорні діри з двома провідними радянськими фахівцями — Яковом Зельдовічем і Александром Старобінським. Вони переконували мене, що згідно з принципом невизначеності квантової механіки, обертові чорні діри повинні створювати і випромінювати частинки. Я повірив їхнім аргументам на основі фізичних міркувань, але мені не сподобався математичний спосіб, яким вони розраховували випромінювання. Тому я взявся розробити кращий математичний підхід, що його описав на неформальному семінарі в Оксфорді наприкінці листопада 1973 року. Тоді я ще не провів розрахунків, як багато насправді випромінюється. Я очікував виявити тільки те випромінювання, що його передба-

чили Зельдович і Старобінський для обертових чорних дір. Але коли я провів розрахунки, то, на свій подив і досаду, знайшов, що навіть необертові чорні діри мають, вочевидь, створювати та випромінювати частинки зі сталою інтенсивністю. Спершу я подумав, що це випромінювання свідчить про те, що одне з наближень, яке я застосовував, було неправильне. Я боявся, що якщо про це дізнається Бекенштайн, він використає це як ще один аргумент на користь своєї ідеї про ентропію чорних дір, яка досі була мені не до вподоби. Однак, що більше я про це розмірковував, то більше переконувався, що з наближеннями все гаразд. В тому, що випромінювання справді існує, остаточно мене переконало те, що спектр випромінених частинок був точнісінько такий самий, як випромінений нагрітим тілом, і що чорна діра випромінює частинки з точно відповідною інтенсивністю, щоб не порушувався другий закон термодинаміки. Відтоді інші люди повторили ці розрахунки в багатьох формах. Всі вони підтверджують, що чорна діра повинна випускати частинки та проміння так, наче це гаряче тіло з температурою, яка залежить лише від маси чорної діри: що більша маса, то нижча температура.

Як же може чорна діра виділяти частинки, якщо ми знаємо, що ніщо не здатне вирватися за межі її горизонту подій? Ось яка відповідь — квантова теорія говорить нам, що частинки беруться не зсередини чорної діри, а з «порожнього» простору прямо поблизу горизонту подій чорної діри! Це можна пояснити так: те, що ми вважаємо за «порожній» простір, не може бути цілком порожнім, бо це означатиме, що всі поля, зокрема гравітаційні та електромагнетні, повинні були б дорівнювати точно нулеві. Проте значення поля і швидкість його зміни з часом подібні до положення і швидкості частинки: згідно з принципом невизначеності, що точніше ми знаємо одну з цих величин, то менш точно можемо знати іншу. Тому в порожньому просторі поле не може дорівнювати точно нулеві, бо тоді воно матиме і точне значення (нуль), і точну швидкість зміни (нуль). У величині поля має бути певна мінімальна невизначеність, або ж квантові флюктуації. Ці флюктуації можна розглядати як пари частинок світла чи гравітації, що виникають разом на деякий час, потім розходяться, знову сходяться і анігілюють одна з одною. Ці частинки віртуальні, як ті, що переносять гравітаційну силу Сонця: на від-

міну від справжніх частинок, їх не можна спостерігати безпосередньо за допомогою детектора частинок. Утім непрямі ефекти, як-от невеликі зміни в енергії електронних орбіт в атомах, можна виміряти, а результати зі значним ступенем точності узгоджуватимуться з теоретичними передбаченнями. Принцип невизначеності передбачає також, що існують подібні віртуальні пари частинок речовини, таких як електрони і кварки. Однак у цьому разі один член пари буде частинкою, а інший — античастинкою (античастинки світла і гравітації такі ж, як частинки).

Енергію не можна створити з нічого, тому один із партнерів у парі частинка-античастинка матиме позитивну енергію, а інший — негативну. Той, що має негативну енергію, приречений стати коротковічною віртуальною частинкою, бо реальні частинки в нормальних ситуаціях завжди мають позитивну енергію. Тому вона має знайти свого партнера та анігілювати з ним. Проте реальна частинка поблизу масивного тіла має меншу енергію, ніж та, що віддалік, бо щоб подолати гравітаційне притягання цього тіла і вирватися подалі, потрібна енергія. Зазвичай частинка має позитивну енергію, але всередині чорної діри таке сильне гравітаційне поле, що навіть реальна частинка може там мати негативну енергію. Отже, якщо є чорна діра, віртуальна частинка з негативною енергією може в неї впасти і стати реальною частинкою або античастинкою. Але в такому разі вона більше не повинна анігілювати зі своїм партнером. Її покинутий партнер також може впасти в чорну діру. Або, якщо він матиме позитивну енергію, спекатися близького сусідства чорної діри як реальна частинка або античастинка. Спостерігачеві на відстані здаватиметься, що цю частинку випустила чорна діра. Що менша чорна діра, то коротшу відстань треба подолати частинці з негативною енергією, перш ніж стати реальною частинкою, отже, то більша інтенсивність випромінювання, та позірна температура, чорної діри.

Позитивна енергія спрямованого назовні проміння буде врівноважена потоком частинок із негативною енергією в чорну діру. Згідно з рівнянням Айнштейна $E = mc^2$ (де E — енергія, m — маса, а c — швидкість світла), енергія пропорційна масі. Тому потік від'ємної енергії в чорну діру зменшує її масу. Коли чорна діра втрачає масу, площа її горизонту подій зменшується,

але це зменшення ентропії чорної діри цілком компенсує ентропія випущеного проміння, тож другий закон термодинаміки ніколи не порушується.

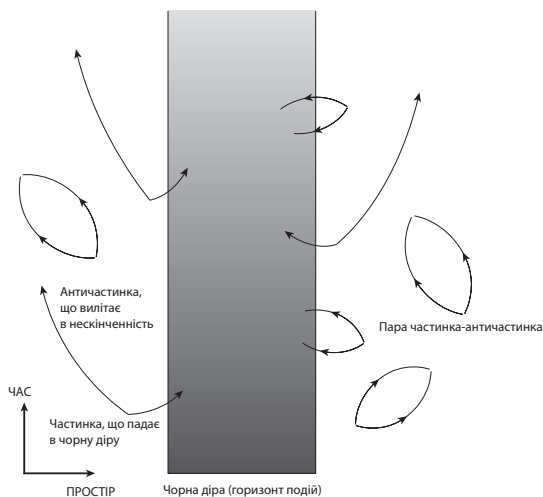


Рис. 7.4.

Ба більше, що менша маса чорної діри, то вища її температура. Тому, коли чорна діра втрачає масу, її температура і швидкість випромінювання зростають, і вона втрачає масу ще швидше. Що відбувається, коли маса чорної діри стає врешті-решт у край мала, не зовсім ясно, але найлогічніше припущення, що вона повністю зникне в гігантському кінцевому вибуху випромінювання, еквівалентному вибухові мільйонів водневих бомб.

Чорна діра з масою, що в кілька разів перевищуватиме масу Сонця, матиме температуру лише на одну десятимільйонну частку градуса вищу від абсолютного нуля. Це значно менше за температуру мікрохвильового проміння, що заповнює Всесвіт (близько 2.7 градуса вище від абсолютного нуля), тому такі чорні діри виділятимуть навіть менше, ніж вони поглинають. Якщо Всесвітові суджено розширюватиметься вічно, температура мікрохвильового проміння врешті стане нижча за температуру такої чорної діри, яка тоді почне втрачати масу. Та навіть

тоді її температура буде така низька, що вона повністю випарується десь за мільйон мільйон мільйон мільйон мільйон мільйон мільйон мільйонів років (1 з 66 нулями). Це набагато довше, ніж вік Всесвіту, якому лише близько десяти чи двадцяти мільярдів років (1 чи 2 з десятима нулями). З іншого боку, як уже згадано в розділі 6, можуть бути первісні чорні діри з набагато меншою масою, що утворилися внаслідок колапсу неоднорідностей на найраніших етапах розвитку Всесвіту. Такі чорні діри повинні б мати значно вищу температуру і виділяти випромінювання з набагато більшою інтенсивністю. Первісна чорна діра з початковою масою мільярд тон мала б існувати приблизно стільки ж, як і Всесвіт. Первісні чорні діри з меншою початковою масою вже б повністю випарувалися, тоді як ті, що мають трохи більшу масу, досі б випромінювали Рентгенові та гама-промені. Рентгенове та гама-проміння — це як світло, тільки зі значно меншою довжиною хвилі. Такі діри напевно чи заслуговують на епітет «чорні»: насправді вони розжарені до білого кольору та виділяють близько десяти тисяч мегаватів енергії.

Одна така чорна діра може замінити десять великих електростанцій — якби вдалося скористати з її потужності. Втім це було б вельми складно зробити, бо чорна діра мала б тоді масу гори, стиснутої до мільярдної частки дюйма, розміру ядра атома! Якби ви мали одну з цих чорних дір на земній поверхні, то не було б способу зупинити її падіння крізь підлогу до центра Землі. Вона б коливалася вперед-назад уздовж земної осі, поки врешті-решт не зупинилася б у центрі. Отож єдине місце для розміщення такої чорної діри, випромінювану енергію якої можна було б використовувати, — на орбіті довкола Землі; а єдиний спосіб доставити її на земну орбіту — тягнути перед нею велику масу, як моркву перед віслюком. Ця не дуже практична пропозиція, принаймні не для близького майбутнього.

Але навіть якщо ми не можемо використати випромінювання від первісних чорних дір, які наші шанси взагалі їх спостерігати? Можна шукати гама-промені, що їх виділяють первісні чорні діри впродовж усього свого існування. Проміння від більшості їх буде дуже слабке, бо вони дуже далеко від нас, але загальне, від усіх них, може бути спостережне. І ми спостерегає-

мо такий гама-фон: рис. 7.5 показує, як спостережувана інтенсивність відрізняється на різних частотах (частота — кількість хвиль за секунду). Проте цілком можливо і, мабуть, так і є, що цей фон породжений, окрім того, що первісними чорними дірами, й іншими процесами. Пунктирна лінія на рис. 7.5 показує, як залежно від частоти гама-променів, що їх випускають первісні чорні діри, мала б змінюватися їхня інтенсивність, якби на один кубічний світловий рік припадало 300 чорних дір. Тому можна сказати, що спостереження гама-фону не засвідчують позитивно існування первісних чорних дір, але такі підтверджують, що у Всесвіті в середньому не може бути більш ніж 300 чорних дір на кубічний світловий рік. А це обмеження означає, що первісні чорні діри можуть становити щонайбільше одну мільйонну частку речовини у Всесвіті.

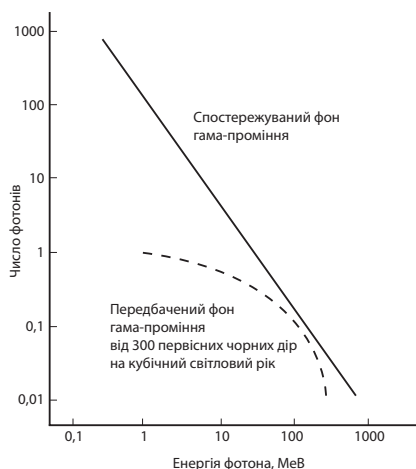


Рис. 7.5.

Первісних чорних дір так мало, що видається малоймовірним, що одна з них буде досить близько від нас, щоб її можна було спостерігати як окреме джерело гама-променів. Але з огляду на те, що гравітація притягує первісні чорні діри до будь-якої речовини, їх мало б бути набагато більше в галактиках і довкола них. Отож, хоча гама-фон вказує на те, що на один кубічний світловий рік

не може бути більш ніж 300 первісних чорних дір, він нічого не каже нам про те, скільки їх у нашій Галактиці. Якби, наприклад, тут їх було в мільйон разів більше, тоді найближча чорна діра була б розташована на відстані близько мільярдів кілометрів, приблизно так само далеко, як Плутон²³, найдалша з відомих планета. Утім навіть на такій відстані однаково було б дуже важко виявити постійне випромінювання чорної діри, хоч би й воно становило десять тисяч мегаватів. Щоб спостерегти первісну чорну діру, треба виявити кілька гама-квантів, що надходять з одного напрямку впродовж розумного проміжку часу, наприклад тижня. Інакше вони можуть бути просто частиною фону. Проте згідно з квантовим принципом Планка, кожен гама-квант має дуже високу енергію, бо гама-промені мають дуже високу частоту, тому, щоб дістати десять тисяч мегаватів, не треба багато квантів. А щоб спостерегти тих кілька квантів, що надходять з відстані як до Плутона, потрібен більший детектор гама-променів, ніж будь-який з побудованих досі. Ба більше, цей детектор повинен бути в космосі, бо гама-промені не можуть проникати крізь атмосферу.

Звісно, якщо чорна діра, розташована так близько, як Плутон, дійде до кінця свого життя і вибухне, то останній сплеск випромінювання легко буде виявити. Однак, якщо чорна діра випромінювала впродовж останніх десяти чи двадцяти мільярдів років, то шанс, що її прийде кінець через кілька років, а не впродовж декількох мільйонів років у минулому чи майбутньому, насправді дуже малий! Тому, щоб мати реальний шанс побачити вибух, перш ніж закінчиться ваш науковий грант, вам доведеться знайти спосіб, як виявити будь-які вибухи у межах близько одного світлового року. Насправді сплески гама-проміння з космосу виявили супутники, від початку сконструйовані, щоб стежити за порушеннями Договору про заборону ядерних випробувань. Вони, видається, відбуваються близько 16 разів на місяць і більш-менш рівномірно розподілені по небу. Це вказує на те, що

²³ Від 1930 до 2006 р. Плутон класифікували як планету Сонцевої системи. Після відкриття подібних до нього об'єктів у поясі Койпера і ухвалення 2006 року рішення Міжнародного астрономічного союзу про означення терміну «планета» Плутон віднесено до нової категорії карликових планет і додано до списку малих планет. Попри те, що не всі погодилися з таким рішенням, він утратив статус планети Сонцевої системи. — *Прим. ред.*

ці гама-промені надходять з-за меж Сонцевої системи, бо інакше можна було б очікувати, що вони будуть сконцентровані в площині орбіт планет. Рівномірний розподіл також свідчить про те, що джерела випромінювання перебувають або досить близько до нас у нашій Галактиці, або відразу за нею на космологічних відстанях, бо інакше, знову ж таки, вони б концентрувались у площині Галактики. В другому випадку крихітні чорні діри не могли б виділити так багато енергії, скільки потрібно для сплеску, але якщо джерела розташовані за галактичними мірками близько, то це були, цілком можливо, вибухи чорних дір. Я б страшенно хотів, щоб так і було, але мушу визнати, що існують й інші можливі пояснення гама-сплесків, як-от зіткнення нейтронних зір. Спостереження у найближчі кілька років, зокрема за допомогою детекторів гравітаційних хвиль на кшталт ЛІГО, мають дати змогу нам встановити походження гама-сплесків.

Навіть якщо пошуки первісних чорних дір виявляться безрезультатними, що цілком можливо, це все одно дасть нам важливу інформацію про найраніші етапи розвитку Всесвіту. Якщо ранній Всесвіт був хаотичний чи нерегулярний, або якщо тиск речовини був низький, то можна було б очікувати утворення значно більшої кількості первісних чорних дір, ніж та межа, встановлена на основі наших спостережень гама-фону. Тільки тим, що ранній Всесвіт був дуже гладкий та однорідний, з високим тиском, можна пояснити, чому нема тої кількості первісних чорних дір, коли їх можна було б спостерегти.

Припущення про випромінювання з чорних дір стало першим прикладом передбачення, що ґрунтувалося на обох великих теоріях минулого століття: загальній теорії відносності й квантовій механіці. Спочатку йому був сильний спротив, бо воно порушувало прийнятий погляд, мовляв: «Як чорна діра може щось випромінювати?». Коли я вперше оголосив результати своїх розрахунків на конференції у Лабораторії Резерфорда — Еплтона, що поблизу Оксфорда, мені ніхто не повірив. Після закінчення мого виступу керівник секції Джон Дж. Тейлор з Королівського коледжу в Лондоні заявив, що це повне безглуздя. Він навіть написав про це статтю. Проте врешті-решт більшість науковців, зокрема й Джон Тейлор, дійшли висновку, що якщо загальна теорія відносності й теорія квантової механіки правильні, то чор-

ні діри повинні випромінювати як гарячі тіла. Отож, хоча ми наразі не знайшли жодної первісної чорної діри, всі начебто погоджуються, що якщо ми її знайдемо, то вона виділятиме багато Рентгенових і гама-променів.

Наявність випромінювання чорних дір наштовхує на припущення, що гравітаційний колапс не такий остаточний і безповоротний, як ми собі гадали. Якщо в чорну діру впаде астронавт, маса її зросте, але зрештою енергія, еквівалентна тій додатковій масі, повернеться у Всесвіт у формі проміння. Отже, в певному сенсі, астронавт буде «перероблений». Але це був би кепський вид безсмертя, бо будь-якому особистому уявленню астронавта про час майже напевне настане кінець, коли його розірве всередині чорної діри! Частинки, що їх виділить чорна діра, матимуть загалом інший тип, ніж ті, з яких складався астронавт: єдина властивість, що залишиться — його маса чи енергія.

Наближення, що я застосував, коли вираховував випромінювання з чорних дір, повинні добре виконуватися, коли чорна діра має масу більшу за якусь частку грама. Але наприкінці життя чорної діри, коли її маса стане дуже малою, вони перестануть виконуватися. Найімовірніше, видається, що чорна діра просто зникне, принаймні з нашої області Всесвіту, забравши з собою нашого астронавта й будь-яку сингулярність всередині себе, якщо вона, звісно, там буде. Це була перша ознака того, що квантова механіка може усунути сингулярності, передбачені загальною теорією відносності. Утім методи, що їх я та інші науковці використовували 1974 року, не змогли відповісти на питання, чи будуть сингулярності в квантовій гравітації. Тому з 1975 року я почав розробляти ефективніший підхід до квантової гравітації на основі ідеї Ричарда Файнмена про суму за історіями. Два дальші розділи описують відповіді щодо походження і долі Всесвіту та його вмісту, зокрема астронавтів, згідно з цим підходом. Ми побачимо, що хоча принцип невизначеності й накладає обмеження на точність усіх наших передбачень, він усуває фундаментальну непередбачність, що стається в сингулярності простору-часу.

Розділ 8

НАРОДЖЕННЯ І ЗАГИБЕЛЬ ВСЕСВІТУ

Із загальної теорії відносності Айнштайна само по собі випливає, що часопростір почався з сингулярності Великого вибуху і закінчиться або сингулярністю Великого стиску (якщо Всесвіт цілком реколапсує), або сингулярністю всередині чорної діри (якщо колапсує локальна область, наприклад зоря). Будь-яка матерія, що потрапляє в діру буде зруйнована в сингулярності, і зовні відчуватиметься лише гравітаційний ефект її маси. З іншого боку, якщо взяти до уваги квантові ефекти, видається, що ця маса чи енергія має колись повернутися до решти Всесвіту, і що чорна діра, з її сингулярністю всередині, випарується і врешті зникне. Чи може квантова механіка мати такий же драматичний вплив на сингулярності Великого вибуху і Великого стиску? Що насправді відбувається за найраніших і найпізніших стадій Всесвіту, коли гравітаційні поля такі потужні, що квантовими ефектами не можна нехтувати? Чи дійсно Всесвіт має початок і кінець? І якщо так, то на що вони схожі?

Протягом 1970-х років я переважно вивчав чорні діри, але в 1981-му в мене знову прокинувся інтерес до народження та загибелі Всесвіту, коли я відвідав конференцію з космології, що організували єзуїти у Ватикані. Католицька церква зробила велику помилку з Галілео, коли спробувала встановити закон з наукового питання, проголошуючи, що Сонце обертається навколо Землі. Тепер, століттями пізніше, вона вирішила запросити експертів, щоб порадитися з приводу космології. В кінці конференції учасники мали аудієнцію з Папою. Він сказав нам, що цілком прийнятно займатися вивченням розвитку Всесвіту після Великого вибуху, але ми не повинні розглядати сам Великий вибух, бо це момент Творення, і тому це справа Бога. Я був радий, що він не знав про тему мого виступу на конференції: можливість

того, що простір-час скінченний, але не має меж, а це означає, що він не має ні початку, ні моменту Творення. Мені не хотілося повторити долю Галілео, з яким в мене сильне почуття спорідненості, зокрема через такий збіг, що я народився рівно через 300 років після його смерті!

Щоб пояснити ідеї, які я та інші мали стосовно того, як квантова механіка може вплинути на народження та загибель Всесвіту, потрібно спочатку зрозуміти загальноприйняту історію Всесвіту, відповідно до так званої «моделі гарячого Великого вибуху». Це вимагає, щоб Всесвіт назад у часі аж до Великого вибуху описувала якась модель Фрідмана. В таких моделях ми виявляємо, що Всесвіт розширюється, і будь-яка матерія або проміння в ньому холоднішає. (Коли розмір Всесвіту подвоюється, температура падає наполовину). А що температура — це просто міра середньої енергії, або швидкості, частинок, таке охолодження Всесвіту матиме великий вплив на матерію в ньому. За дуже великих температур частинки довкола будуть рухатися так швидко, що вони можуть уникати будь-якого притягання назустріч одна одній, викликаного ядерними або електромагнетними силами, але, коли вони охолоджуються, можна очікувати, що частинки, які притягуються одна до одної, почнуть групуватися разом. Ба більше, навіть типи частинок, що існують у Всесвіті, залежатимуть від температури. За досить високих температур частинки мають таку велику енергію, що коли вони зіштовхуються, створюється багато різних пар частинка-античастинка, й хоча деякі з цих частинок анігілюють, зіткнувшись з античастинками, вони утворюватимуться швидше, ніж щезатимуть. Однак при нижчих температурах частинки, що стикаються, мають набагато меншу енергію, тож пари частинка-античастинка будуть утворюватися повільніше, й анігіляція буде швидша за утворення.

Вважають, що в сам Великий вибух Всесвіт мав нульовий розмір, і тому був нескінченно гарячий. Але в міру того, як він розширювався, температура проміння зменшувалася. Через одну секунду після Великого вибуху, вона вже впала десь до десяти мільярдів градусів. Це приблизно в тисячу разів більше, ніж температура в центрі Сонця, але такі температури досягаються при вибухах водневих бомб. У цей момент Всесвіт складався пе-

реважно з фотонів, електронів і нейтрино (надзвичайно легких частинок, на які впливають лише слабка сила і гравітація) і їхніх античастинок, а також деякої кількості протонів і нейтронів. В міру того як Всесвіт продовжував розширюватися, а температура — падати, швидкість, з якою утворювалися у зіткненнях пари електрон-antieлектрон, стала нижчою за швидкість їх знищення через анігіляцію. Тож більшість електронів таantieлектронів мали анігілювати, утворюючи багато фотонів, і залишитися при цьому лише небагато електронів. Нейтрино таantineйтрино, однак, не анігілювали б, бо ці частинки взаємодіють між собою і з іншими частинками дуже слабо. Тож вони мають ще бути й у наші часи. Якщо б ми могли їх спостерегти, це була б хороша перевірка для такої картини дуже гарячої ранньої стадії Всесвіту. На жаль, їхня енергія сьогодні буде занизька, щоб ми могли їх побачити безпосередньо. Однак, якщо нейтрино не безмасові, а мають невеличку власну масу, як підказують деякі недавні експерименти, ми могли б виявити їх опосередковано: вони можуть бути формою «темної матерії», схожої на згадану раніше, з достатнім гравітаційним притяганням, щоб зупинити розширення Всесвіту і примусити його знову стискатися.

Приблизно через сто секунд після Великого вибуху температура впала до одного мільярда градусів, температури середині найгарячіших зір. За такої температури протони та нейтрони більше не матимуть достатньо енергії, щоб подолати притягання сильної ядерної сили, і почнуть об'єднуватися разом, утворюючи ядра атомів дейтерію (важкого водню), що складається з одного протона і одного нейтрона. Потім ці ядра дейтерію об'єднуються з іншими протонами і нейтронами, утворюючи ядра гелію, що складаються з двох протонів і двох нейтронів, а також невелику кількість важчих елементів, літію і берилію. Можна порахувати, що відповідно до моделі гарячого Великого вибуху приблизно чверть протонів і нейтронів має перетворитися в ядра гелію, і невелику кількість важкого водню та інших елементів. Решта нейтронів мають розпастися на протони, ядра звичайних атомів водню.

Цю картину гарячої ранньої стадії Всесвіту вперше запропонував науковець Георгій Гамов у відомій статті, яку написав 1948 року разом зі своїм аспірантом, Ралфом Альфером (Ал-

фером). Гамов мав добре почуття гумору — він умовив науковця-ядерника Ганса Бете додати його ім'я до статті, щоб список авторів виглядав, як «Альфер, Бете, Гамов», схожий на перші три літери грецької абетки, альфа, бета, гамма: дуже пасував до статті про початок Всесвіту!²⁴ В цій статті вони зробили видатне передбачення, що проміння (у вигляді фотонів) з дуже гарячих ранніх стадій Всесвіту все ще буде наявне сьогодні, але його температура впаде до лише декількох градусів вище від абсолютного нуля (-273°C). Це те проміння, яке знайшли Пенціяс та Вілсон в 1965 році. Коли Альфер, Бете і Гамов написали свою статтю, було ще мало відомо про ядерні реакції протонів і нейтронів. Тому передбачення, зроблені для пропорцій різних еле-

²⁴ Ралф Альфер (Алфер) — американський космолог, докторант Георгія Гамова. 1948 року здобув докторський ступінь з фізики за теорію нуклеосинтезу. В дисертації розглянув питання, що стало відомим як нуклеосинтез Великого вибуху (теорія Альфера — Бете — Гамова; альфа — бета — гамма). Термін «Великий вибух» придумав, спочатку глузуючи, Фред Гойл на радіо Бі-Бі-Сі 1950 року для опису космологічної моделі Всесвіту, як розширення до свого нинішнього стану від початкового стану величезної густини і температури. Нуклеосинтез — пояснення того, як складніші елементи створюються з простих елементів після Великого вибуху. Початково теорія Альфера — Гамова пропонувала, що всі атомні ядра створюються шляхом послідовного захоплення нейтронів. Однак подальше дослідження піддало сумніву універсальність теорії послідовного захоплення, бо жодного елемента не знайдено як стабільного ізотопу з атомною масою п'ять або вісім, що перешкоджало виробництву елементів важчих за гелій. Дисертація викликала величезний інтерес, зокрема медій. Пізніше в тому ж році, співпрацюючи в Лабораторії прикладної фізики Університету Джона Гопкінса з іншим американським науковцем Робертом Германом, Альфер передбачив температуру залишкового проміння (відомого як космічне фонове проміння, або реліктове), виходячи з припущення про Великий вибух. Проте прогнози Альфера стосовно космічного фонового проміння більш-менш забули, і їх знову відкрили Роберт Діке і Яков Зельдовіч на початку 1960-х. Попри те, що його ім'я з'являється в дисертації, Ганс Бете практично не брав ніякої участі в розвитку теорії, хоча згодом він працював з суміжних тем; Гамов додав його ім'я, щоб оригінальним зробити заголовок роботи. Так самостійна дисертація Альфера була вперше опублікована 1 квітня 1948 року в «Фізикал ревію» («*Physical Review*») і з трьома авторами. Гумор Гамова, мабуть, деколи затьмарював вирішальну роль Альфера в розвитку теорії. Інші науковці, які читали працю, можливо, припустили (помилково), що Гамов і Бете були головні автори. Дві експериментальні праці, пов'язані з космічним фоновим промінням визнано гідними Нобелівської премії: в 1978 році — Арно Пенціяс і Роберта Вілсона, і в 2006 році — Джона Мазера і Джорджа Смута. — *Прим. ред.*

ментів у ранньому Всесвіті, були досить неточні, але ці розрахунки повторено пізніше, у світлі нових даних, і тепер вони добре збігаються з тим, що ми спостерігаємо. Дуже важко, крім того, пояснити іншими причинами, чому у Всесвіті має бути так багато гелію. Тож ми досить впевнені, що маємо правильну картину, принаймні від першої секунди після Великого вибуху.

Лише через декілька годин після Великого вибуху утворення гелію та інших елементів припинилось. І після цього, протягом приблизно мільйона років Всесвіт просто розширювався без будь-яких інших значних подій. Згодом, коли температура впала до декількох тисяч градусів і електрони та ядра більше не мали достатньо енергії, щоб долати електромагнетне притягання між ними, вони почали об'єднуватися, створюючи атоми. Всесвіт як ціле продовжував розширюватися і охолоджуватися, але в областях з дещо більшою, ніж у середньому, густиною розширення сповільнилося через додаткове гравітаційне притягання. Це зрештою зупинило розширення в деяких областях і примусило їх почати стискатися знову. При стисканні під гравітаційним впливом зовнішньої до цих областей матерії могло початися їх повільне обертання. Коли область, що стискається, стає меншою, вона починає обертатися швидше, так само як фігуристи на льоду починають обертатися швидше, коли притискають руки. Зрештою, коли область стає досить малою, вона буде обертатися досить швидко, щоб врівноважувати притягання гравітації. Так народилися дископодібні обертові галактики. Інші області, що не почали обертатися, стали об'єктами овальної форми, так званими еліптичними галактиками. Така область перестане стискатися, бо окремі частини галактики будуть обертатися стабільно навколо своїх центрів, але сама галактика обертатися не буде.

З часом газ водню і гелію в галактиках розпадеться на менші хмари, що стискатимуться під дією власної сили тяжіння. В міру того як вони стискалися і атоми в них зіштовхувалися між собою, температура газу піднімалася, поки нарешті він не став достатньо гарячим, щоб почалися реакції ядерного синтезу. Як наслідок, водень перетвориться в додаткову кількість гелію, а виділене тепло підвищить тиск, що зупинить подальше стискання хмар. Вони залишатимуться стабільними в цю-

му стані тривалий час, як зорі, схожі на наше Сонце, спалюючи водень на гелій і випромінюючи здобуту енергію у вигляді тепла і світла. Масивніші зорі повинні бути гарячіші, щоб зрівноважити своє сильніше гравітаційне притягання, тоді реакції ядерного синтезу протікатимуть так набагато швидше, що вони використають весь свій водень менш ніж за сто мільйонів років. Тоді вони трішки стиснуться, і в міру їх подальшого нагрівання гелій почне перетворюватися на важчі елементи, як вуглець або кисень. Це, однак, не вивільнить набагато більше енергії, тож станеться криза, як це описано в розділі про чорні діри. Що відбувається далі не зовсім ясно, але цілком ймовірно, що центральні ділянки такої зорі почнуть колапсувати до дуже густого стану, як у нейтронних зір або чорних дір. Зовнішні області зорі деколи можуть бути викинуті величезним вибухом так званої наднової, яка затьмарить усі інші зорі в своїй галактиці. Деяка частина важчих елементів, створених у кінці життя зорі, буде викинута в галактичний газ, і стане сировиною для наступного покоління зір. Наше Сонце містить десь 2 відсотки цих важчих елементів, бо це зоря другого чи третього покоління, сформована приблизно п'ять мільярдів років тому з хмари обертового газу, що містив уламки ранішніх наднових. Більша частина газу з цієї хмари пішла на формування Сонця чи була відкинута геть, але невелика частина важчих елементів зібралася разом, створивши тіла, що тепер обертаються навколо Сонця, як планети на взір нашої Землі.

Спочатку Земля була дуже гаряча і не мала атмосфери. З часом вона охолола і набула атмосферу через виділення газів з гірської породи. Ця рання атмосфера не була придатна для нашого життя. Вона не містила кисню, зате було багато інших, отруйних для нас, газів, наприклад сірководню (газу, який має запах тухлих яєць). Однак є інші, примітивні, форми життя, що можуть процвітати в таких умовах. Вважається, що вони розвинулися в океанах, можливо, в результаті випадкових комбінувань атомів у великі структури, так звані макромолекули, здатні компонувати інші атоми з океану в подібні структури. Таким чином вони самовідтворювалися і розмножувалися. Деколи при відтворенні ставалися помилки. Переважно ці помилки призводили до того, що нова макромолекула не могла самовідтворюватися і врешті-

решт була знищена. Однак деякі помилки привели до нових макромолекул, що розмножувалися навіть ще краще. Тому вони мали перевагу і замінювали початкові макромолекули. Так почався процес еволюції, що привів до розвитку все складніших, самовідтворних організмів. Перші примітивні форми життя споживали різні речовини, зокрема сірководень, і виділяли кисень. Це поступово змінило склад атмосфери до сьогоденішнього, який дозволив розвинутися вищим формам життя, зокрема риbam, рептиліям, ссавцям і зрештою людській расі.

Ця картина, де Всесвіт почався дуже гарячим і охолонув при розширенні, відповідає всім результатам спостережень, які ми маємо сьогодні. Проте вона залишає без відповіді декілька важливих питань:

1. Чому ранній Всесвіт був такий гарячий?
2. Чому Всесвіт такий однорідний у великому масштабі? Чому він виглядає однаково в будь-якому напрямі в усіх точках простору? Зокрема, чому температура мікрохвильового фонового проміння майже однакова, якщо дивитися в різних напрямках? Це як питати студентів на іспиті. Якщо вони всі дають однакову відповідь, можна майже впевнено сказати, що вони спілкувалися між собою. Але в моделі, описаній вище, від моменту Великого вибуху не було достатньо часу, щоб світло з однієї віддаленої області досягло іншої, навіть якщо області й були близькі одна від одної в ранньому Всесвіті. Згідно з теорією відносності, якщо світло не може дістатися з однієї області до іншої, то не може й жодна інша інформація. Тож нема жодного способу, завдяки якому різні області в ранньому Всесвіті могли дійти однакової температури, хіба тільки вони через якусь непояснену причину мали однакову температуру від початку.
3. Чому Всесвіт почався з такої майже граничної швидкості розширення, що розділяє моделі з реколлапсуванням, від тих, де розширення вічне, і що навіть тепер, через десять мільярдів років, він досі розширюється з майже граничною швидкістю? Якщо б швидкість розширення через одну секунду після Великого вибуху була менша навіть на одну сотисямільйонівмільйонну частку,

Всесвіт реколапсував би, не досягнувши свого нинішнього розміру.

4. Хоча Всесвіт такий рівномірний і однорідний у великому масштабі, він містить локальні нерівності, як зорі та галактики. Вони, як вважають, утворилися через невеликі відмінності в густині між областями раннього Всесвіту. Звідки взяли ці флюктуації густини?

Загальна теорія відносності сама собою не може пояснити ці особливості чи відповісти на ці питання, бо вона передбачає, що Всесвіт почався з нескінченної густини в сингулярності Великого вибуху. В сингулярності загальна теорія відносності та інші фізичні закони перестають працювати: не можна передбачити, що вийде з сингулярності. Як пояснено вище, це означає, що ми можемо просто викинути Великий вибух та будь-які події до нього з такої теорії, бо вони не мають жодного впливу на те, що ми спостерігаємо. Простір-час матиме межу — початок у Великому вибуху.

Наука, схоже, відкрила набір законів, що в межах, встановлених принципом невизначеності, кажуть нам, як Всесвіт розвиватиметься з часом, якщо ми знаємо його стан в якийсь момент. Ці закони, можливо, спочатку встановив Бог, але, видається, після того Він залишив Всесвіт розвиватися згідно з цими законами і тепер не втручається в нього. Але як Він вибрав початковий стан чи конфігурацію Всесвіту? Які були «граничні умови» на початку часу?

Одна з можливих відповідей така, що Бог обрав початкову конфігурацію Всесвіту з причин, які нам зрозуміти не дано. Це, безумовно, було у владі всемогутньої Істоти, але якщо Він почав у такий незбагнений спосіб, чому Він дозволив тому розвиватися далі за законами, які ми можемо зрозуміти? Вся історія науки — це поступове усвідомлення того, що події не відбуваються довільним чином, а що вони відбивають певний, який лежить в основі, порядок, що міг або ні бути богонатхненний. Було б досить природно припустити, що цей порядок застосовується не лише до законів, але й до умов на межі простору-часу, що визначають початковий стан Всесвіту. Може існувати велика кількість моделей Всесвіту з різними початковими умовами, що всі улягають цим законам. Має бути якийсь принцип для ви-

бору одного початкового стану, і, отже, єдина модель, щоб описувати наш Всесвіт.

Одна з таких можливостей — так звані хаотичні граничні умови. Вони неявно припускають, що Всесвіт або нескінченний у просторі, або існує нескінченна кількість всесвітів. При хаотичних граничних умовах ймовірність знайти якусь окрему область простору в якійсь конфігурації відразу після Великого вибуху така ж, у певному сенсі, як і ймовірність знайти її в будь-якій іншій конфігурації: початковий стан Всесвіту вибирається цілком випадково. Це означатиме, що ранній Всесвіт був, ймовірно, дуже хаотичний і неоднорідний, бо існує набагато більше хаотичних і неоднорідних форм для Всесвіту, ніж гладких і впорядкованих. (Якщо кожна конфігурація рівноймовірна, цілком можливо, що Всесвіт почався з хаотичного і невпорядкованого стану, просто тому, що таких набагато більше.) Важко зрозуміти, як такі хаотичні початкові умови могли привести до Всесвіту, що такий однорідний і гладкий у великому масштабі, як наш сьогодні. Також можна було б очікувати, що флюктуації густини в такій моделі приведуть до створення набагато більшої кількості первісних чорних дір, ніж верхня межа, встановлена зі спостережень фону гама-проміння.

Якщо Всесвіт дійсно просторово нескінченний, або якщо існує нескінченна кількість всесвітів, деś могли б існувати великі області, що почалися гладко й однорідно. Це дещо схоже на добре відомий приклад зі зграєю мавп, що гамселять по друкарських машинках — більшість того, що вони напишуть буде сміттям, але дуже зрідка, чисто випадково вони наберуть один з шекспірівських сонетів. Так само, у разі Всесвіту, чи не могло так статися, що ми живемо в області, яка лише випадково виникла гладкою та однорідною? На перший погляд, це може здатися дуже неймовірним, бо таких гладких областей було б незрівнянно менше, ніж хаотичних і нерівномірних. Але, припустимо, що лише в гладких областях створювалися галактики і зорі, лише в них існують умови для розвитку складних самовідтворних організмів, як ми, здатних поставити питання: чому Всесвіт такий гладкий? Це приклад застосування так званого антропного принципу, який ще можна перефразувати: «Ми бачимо Всесвіт таким, який він є, тому що ми існуємо».

Є дві версії антропного принципу: слабка і сильна. Слабкий антропний принцип стверджує, що у Всесвіті, великому або нескінченному у просторі та/або часі, умови, необхідні для розвитку розумного життя, будуть виконані лише в певних областях, обмежених у просторі й часі. Тому розумні істоти в таких областях не повинні дивуватися, коли виявляють те, що в їхній частині Всесвіту такі умови, які необхідні для їхнього існування. Це як багатій, що живе в елітному районі й не бачить злиднів.

Один з прикладів використання слабого антропного принципу — «пояснення», чому Великий вибух стався приблизно десять мільярдів років тому — приблизно стільки часу потрібно, щоб розвинулися розумні істоти. Як пояснено вище, спочатку мало сформуватися перше покоління зір. Ці зорі перетворили частину початкового водню і гелію в такі елементи, як вуглець і кисень, з яких ми складаємося. Потім зорі вибухнули як наднові, а їхні уламки пішли на утворення інших зір і планет, зокрема й нашої Сонцевої системи, якій приблизно п'ять мільярдів років. Перші один-два мільярди років існування Землі були надто гарячі для розвитку будь-чого складного. Дальші три мільярди років чи близько того проходив повільний процес біологічної еволюції, що привела від найпростіших організмів до істот, здатних виміряти час від моменту Великого вибуху.

Мало хто буде сперечатися зі справедливістю чи придатністю слабого антропного принципу. Однак деякі пішли далі й запропонували сильну версію принципу. Відповідно до цієї теорії, є або багато різних всесвітів, або багато різних областей одного Всесвіту, кожна зі своєю власною початковою конфігурацією і, можливо, зі своїм власним набором наукових законів. У більшості з цих всесвітів умови не були б придатні для розвитку складних організмів; і лише в небагатьох з них, таких як наш, могли б розвинутися розумні істоти і поставити питання: «Чому Всесвіт такий, яким ми його бачимо?». Відповідь проста: якби він був інакший, нас би тут не було!

Закони науки, як ми їх знаємо тепер, містять багато фундаментальних чисел, наприклад величина заряду електрона і співвідношення мас протона і електрона. Ми не можемо, принаймні тепер, передбачити значення цих чисел з теорії — ми маємо знайти їх через спостереження. Може статися, що одного дня

ми відкриємо повну об'єднану теорію, що передбачатиме ці всі числа, але можливо також, що деякі з них або всі вони змінюватимуться від всесвіту до всесвіту або в межах єдиного всесвіту. Примітно те, що значення цих чисел, здається, були дуже тонко налаштовані, щоб уможливити розвиток життя. Наприклад, якщо б заряд електрона був лише трішки відмінний, зорі або не могли б спалювати водень і гелій, або вони б не вибухали. Звичайно, можуть існувати й інші форми розумного життя, про які навіть не мріяли письменники-фантасти, що не потребують світла від зорі, як наше Сонце, або важчих хемічних елементів, що створюються в зорях і викидаються в космічний простір, коли зорі вибухають. Однак видається очевидним, що існує відносно невеликий діапазон числових значень, що дозволили б розвиток будь-якої форми розумного життя. Більшість наборів значень приведуть до всесвітів, що хоч і могли б бути дуже гарні, не матимуть нікого, хто б міг милуватися їхньою красою. Можна прийняти це як доказ божественного задуму в створенні і виборі законів науки, або як підтвердження сильного антропного принципу.

Існує низка заперечень, що можна висунути стосовно сильного антропного принципу як пояснення спостережуваного стану Всесвіту. По-перше, в якому розумінні всі ці різні всесвіти можуть існувати? Якщо вони дійсно окремі один від одного, те, що відбувається в іншому всесвіті, не може мати спостережуваних наслідків у нашому. Тож ми повинні використовувати принцип економії і вилучити їх з теорії. Якщо ж, з іншого боку, вони просто різні області єдиного Всесвіту, закони науки повинні бути однакові в кожній області, бо інакше не можна рухатися неперервно з однієї області в іншу. В такому разі єдина різниця між областями — лише їхні початкові конфігурації, і тому сильний антропний принцип зведеться до слабкого.

Друге заперечення щодо сильного антропного принципу — те, що він іде проти ходу всієї історії науки. Ми пройшли від геоцентричних космологій Птолемея і його попередників, через геліоцентричну космологію Коперника та Галілео до сучасної картини, в якій Земля — планета середнього розміру, що обертається навколо середньої зорі в зовнішніх околах звичайної спіральної галактики, лише однієї з приблизно трильйона галактик

у спостережуваному Всесвіті. Проте сильний антропний принцип проголошуватиме, що вся ця величезна споруда існує лише заради нас. У це дуже важко повірити. Наша Сонцева система, безумовно, необхідна передумова нашого існування, і можна поширити цей підхід на всю нашу Галактику, щоб уможливити раніше покоління зір, які створили важчі елементи. Але, видається, нема жодної потреби в усіх цих інших галактиках, ні в такій однорідності та подібності Всесвіту в усіх напрямках у великому масштабі.

Можна було б почуватися задоволенішим антропним принципом, принаймні його слабкою версією, якби можна було показати, що чимало різних початкових конфігурацій розвинулися б у всесвіт, схожий на той, що ми бачимо. Якщо це так, всесвіт, що розвинувся з якихось випадкових початкових умов, повинен містити деяку кількість гладких і однорідних областей, що придатні для еволюції розумного життя. З іншого боку, якщо початковий стан Всесвіту мав бути вибраний надзвичайно ретельно, щоб привести до чогось на кшталт того, що ми бачимо навколо, Всесвіт навряд чи міститиме якусь область, де може з'явитися життя. В гарячій моделі Великого вибуху, описаній вище, не було достатньо часу в ранньому Всесвіті, щоб тепло перетекло з однієї області в іншу. Це означає, що початковий стан Всесвіту мав би мати цілком однакову температуру повсюди, щоб пояснити той факт, що фонове мікрохвильове проміння має однакову температуру у будь-якому напрямку нашого спостереження. Початкова швидкість розширення також мала б бути вибрана дуже точно, щоб швидкість розширення досі була така близька до критичної, потрібної, щоб уникнути реколапсу. Це означає, що початковий стан Всесвіту дійсно мав бути вибраний дуже ретельно, якщо гаряча модель Великого вибуху правильна аж до початку часу. Було б дуже важко пояснити, чому Всесвіт мав початися саме таким чином, крім як актом Бога, призначеним для створення істот, подібних до нас.

Намагаючись знайти модель Всесвіту, в якій багато різних початкових конфігурацій могли б розвинутись у щось схоже на нинішній Всесвіт, науковець Масачусетського технологічного інституту Алан Гут припустив, що ранній Всесвіт міг пройти через стадію дуже швидкого розширення. Це розширення назива-

ють «інфляційним», тобто, що Всесвіт якийсь час розширювався зі зростальною швидкістю, а не зі спадною, як сьогодні²⁵. За Гуттом, радіус Всесвіту збільшувався у мільйон мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (1 з тридцятьма нулями) разів лише за малесеньку частку секунди.

Гут припустив, що Всесвіт почався з Великого вибуху в дуже гарячому, але доволі хаотичному стані. Ці високі температури мали б означати, що частинки у Всесвіті рухалися дуже швидко і мали високі енергії. Як зазначено раніше, можна очікувати, що за таких високих температур сильні та слабкі ядерні сили й електромагнетна були б усі об'єднані в єдину силу. У міру розширення Всесвіту він охолоджуватиметься й енергія частинок падатиме. Зрештою станеться так званий фазовий перехід і симетрія між силами буде порушена: сильна сила стане відрізнятися від слабкої та електромагнетної. Один з простих прикладів фазового переходу — замерзання води при охолодженні. Рідка вода симетрична, однакова в будь-якій точці та будь-якому напрямку. Але коли створюються кристали льоду, вони матимуть визначені позиції і вишиковуюватимуться в якомусь напрямку. Це порушує симетрію води.

У разі води, якщо бути обережним, можна її «переохолодити»: тобто можна опустити температуру води нижче від точки замерзання (0°C) без утворення льоду. Гут припустив, що Всесвіт міг поводитися подібним чином: температура могла опуститися нижче від критичного значення без порушення симетрії між силами. Якщо б це сталося, Всесвіт був би в нестійкому стані, з більшою кількістю енергії, ніж якщо б симетрія порушилася. Можна показати, що ця особлива додаткова енергія має антигравітаційний ефект: вона б діяла точно, як космологічна константа, яку Айнштейн ввів в загальну теорію відносності, коли намагався побудувати статичну модель Всесвіту. А що Всесвіт вже розширював-

²⁵ Так вважали до 1998 року, коли в результаті спостереження за далекими надновими типу Ia відкрито пришвидшене розширення Всесвіту. За це відкриття Сол Перлмутер, Браян Шмідт та Адам Ріс отримали Нобелівську премію з фізики за 2011 рік. Здобуто й інші підтвердження цього явища, найпоширеніше пояснення якого – існування виду енергії з від'ємним тиском, так званої темної енергії. На сьогодні космологи припускають, що сповільнення змінилося на пришвидшення десь 5 млрд років тому. — *Прим. ред.*

ся, як у гарячій моделі Великого вибуху, відштовхувальний вплив космологічної константи привів би до розширення Всесвіту з усе більшою швидкістю. Навіть в областях з більшою, ніж у середньому, кількістю частинок матерії, гравітаційне притягання матерії буде менше за відштовхування ефективної космологічної константи. Тож такі області також будуть розширюватися з інфляційним пришвидшенням. В міру того як вони розширюватимуться і частинки матерії розходитимуться все далі одна від одної, залишимося з розширним Всесвітом, що майже не містить частинок і все ще перебуває в переохолодженому стані. Будь-які нерівномірності у Всесвіті були б просто згладжені розширенням, як розгладжуються зморшки на повітряній кулі, коли її надувати. Тож нинішній гладкий і однорідний стан Всесвіту міг розвинутися з багатьох різних неоднорідних початкових станів.

В такому Всесвіті, де розширення було пришвидшене космологічною константою, а не сповільнене гравітаційним притяганням матерії, не було б достатньо часу для світла, щоб потрапити від однієї області до іншої в ранньому Всесвіті. Це могло б забезпечити розв'язок проблеми, порушеної раніше, чому різні області раннього Всесвіту мають однакові властивості. Крім того, швидкість розширення Всесвіту автоматично стане дуже близькою до критичної, яка визначається густиною енергії у Всесвіті. Це, своєю чергою, може пояснити, чому швидкість розширення все ж така близька до критичної, без припущення, що початкову швидкість розширення Всесвіту дуже ретельно дібрано.

Ідея інфляції може також пояснити, чому у Всесвіті так багато матерії. Є десь близько десяти мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (1 з вісімдесятьма нулями) частинок в області Всесвіту, що ми можемо спостерігати. Звідки вони всі взялися? Відповідь у тому, що в квантовій теорії частинки можуть створюватися з енергії у вигляді пар частинка-античастинка. Але це лише порушує питання, де береться ця енергія. Відповідь у тому, що загальна енергія Всесвіту дорівнює точно нулеві. Матерія у Всесвіті створена з позитивної енергії. Однак матерія — це все, що притягує себе гравітацією. Два шматочки матерії, що містяться поруч, мають меншу енергію, ніж ті, що, містяться на великій відстані, бо тре-

ба затратити енергію, щоб розвести їх проти гравітаційної сили, що стягує їх разом. Отже, в певному сенсі, гравітаційне поле має негативну енергію. У разі Всесвіту, що приблизно однорідний просторово, можна показати, що ця негативна гравітаційна енергія точно компенсує позитивну енергію, представлену матерією. Тож повна енергія Всесвіту дорівнює нулеві.

Далі, двічі нуль — теж нуль. Тому Всесвіт може подвоїти кількість позитивної енергії матерії і подвоїти негативну гравітаційну енергію, не порушуючи збереження енергії. Це не відбувається при нормальному розширенні Всесвіту, в якому густина енергії матерії знижується в міру збільшення Всесвіту. Однак це відбувається при інфляційному розширенні, бо густина енергії переохолодженого стану залишається сталою, тоді як Всесвіт розширюється: коли розмір Всесвіту подвоюється, позитивна енергія матерії і негативна енергія гравітації теж подвоюються, тож повна енергія залишається нульовою. Протягом інфляційної фази Всесвіт зростає до дуже великих розмірів. Тож загальна кількість енергії, доступної для утворення частинок, стає дуже великою. Як зазначив Гут: «Кажуть, що безплатного сиру не буває, але Всесвіт — максимально можливий безплатний сир».

Сьогодні Всесвіт не розширюється інфляційно. Тож мусить бути якийсь механізм, що усуне дуже велику ефективну космологічну константу і так змінить швидкість розширення з пришвидшеного до такого, що сповільнюється гравітацією, як ми маємо сьогодні²⁶. При інфляційному розширенні можна очікувати, що зрештою симетрія між силами буде порушена, так само як зрештою завжди замерзає переохолоджена вода. Зайва енергія стану з непорушеною симетрією тоді вивільниться і розігріє Всесвіт до температури лише трішки нижчої від критичної температури, потрібної для симетрії між силами. Всесвіт тоді продовжить розширюватися і охолоджуватися, як у моделі гарячого Великого вибуху, але тепер уже буде пояснення, чому Всесвіт розширюється точнісінько з критичною швидкістю і чому різні області мають однакову температуру.

У початковій Гутівій пропозиції перехід фази мав відбуватися раптово, як поява кристалів льоду в дуже холодній воді. Ідея

²⁶ Див. попередню примітку. — *Прим. ред.*

полягала в тому, що «бульбашки» нової фази порушеної симетрії сформувалися б у старій фазі, так само як бульбашки пари в оточенні окропу. Бульбашки мали б розширятися і перетинатися одна з одною, аж поки весь Всесвіт не перейде в нову фазу. Але була тут трудність, яку зазначили я та ще декілька людей, що Всесвіт розширюється так швидко, що навіть якби бульбашки росли зі швидкістю світла, вони б віддалялися одна від одної і тому не могли б об'єднуватися. Всесвіт залишився б у дуже неоднорідному стані, й у деяких областях ще б залишалася симетрія між різними силами. Така модель Всесвіту не відповідала б тому, що ми бачимо.

У жовтні 1981 року я поїхав у Москву на конференцію з квантової гравітації. Після конференції я провів семінар з інфляційної моделі та її проблем в Державному астрономічному інституті ім. П. К. Штернберга. Раніше мої лекції читав за мене хтось інший, бо більшість людей не могли зрозуміти мого голосу. Але в мене не було достатньо часу підготувати цей семінар, тому провів його сам, а один з моїх аспірантів повторював мої слова. Це непогано спрацювало і забезпечило набагато кращий зв'язок з моєю аудиторією. Серед слухачів був молодий росіянин Андрей Лінде з Фізичного інституту ім. П. М. Лебедева в Москві. Він сказав, що трудність з бульбашками, що не об'єднуються, можна обійти, якщо вони такі великі, що вся наша область Всесвіту міститься всередині однієї бульбашки. Щоб це спрацювало, перехід від симетрії до порушеної симетрії всередині бульбашки має відбуватися дуже повільно, але це цілком можливо відповідно до теорій великого об'єднання. Ідея Лінде повільного порушення симетрії була дуже добра, але пізніше я зрозумів, що його бульбашки мали б бути більші, ніж розмір самого Всесвіту в той момент! Натомість я показав, що симетрія була б порушена всюди одночасно, а не лише всередині бульбашок. Це привело б до однорідного Всесвіту, який ми спостерігаємо. Я був дуже схвильований цією ідеєю і обговорив її з одним зі своїх студентів, Іяном Мосом. Як друг Лінде, я був, однак, дещо збентежений, коли пізніше мені прислали його статтю для наукового журналу і запитали чи вона придатна для публікації. Я відповів, що є недолік з бульбашками, більшими за Всесвіт, але базова ідея з повільним порушенням симетрії дуже добра. Я порекомендував надрукувати статтю,

як є, тому що в Лінде займе декілька місяців її виправити, бо все, що він відсилав на Захід мало проходити радянську цензуру, що була ані надто вміла, ані надто швидка з науковими статтями. Натомість я написав коротку статтю разом з Іяном Мосом у той же журнал, де вказали на цю проблему з бульбашкою і показали, як її можна було б розв'язати.

На наступний день, після того як повернувся з Москви, я вирушив у Філадельфію, де мав отримати медаль від Інституту Франкліна. Моя секретарка, Джуді Фела, застосувала всю свою неабияку чарівність, щоб переконати «Брітіш ейрвейз» надати їй та мені вільні місця на «Конкорді» як рекламний хід. Однак я затримався по дорозі в аеропорт через зливу і спізнився на літак. Проте врешті я дістався до Філадельфії та отримав свою медаль. Тоді мене попросили провести семінар з інфляційного Всесвіту в Університеті Дрексела у Філадельфії. І я провів такий самий семінар з проблем інфляційного Всесвіту, що й у Москві.

Ідею, дуже схожу на Ліндеву, незалежно запропонували декількома місяцями пізніше Пол Стайнгарт і Андреас Албрехт з Пенсильванського університету. Вони тепер поділяють з Лінде честь бути авторами так званої «нової інфляційної моделі», заснованої на ідеї повільного порушення симетрії. (Стара інфляційна модель — початкова пропозиція Гута про швидке порушення симетрії з утворенням бульбашок.)

Нова інфляційна модель була доброю спробою пояснити, чому Всесвіт такий, як є. Однак я і ще кілька людей показали, що принаймні в своїй первісній формі вона спрогнозувала набагато більші коливання температури фонового мікрохвильового проміння, ніж спостережувані. Пізніші роботи також додали сумнівів, чи в дуже ранньому Всесвіті міг статися фазовий перехід потрібного типу. На мою особисту думку, нова інфляційна модель уже мертва як наукова теорія, хоча, схоже, багато людей ще не чули про її кончину і досі пишуть статті, як наче вона життєздатна. Кращу модель, так звану хаотичну інфляційну модель, запропонував Лінде в 1983 році. В ній нема фазового переходу або переохолодження. Натомість, в ній є поле з нульовим спіном, що через квантові флюктуації матиме великі значення в деяких областях раннього Всесвіту. Енергія поля в таких областях поводитиметься як космологічна константа. Вона мати-

ме відштовхувальний гравітаційний вплив, і таким чином ці області розширюються інфляційно. В міру їх розширення енергія цього поля буде поступово зменшуватися, поки інфляційне розширення не зміниться розширенням як у гарячій моделі Великого вибуху. Одна з цих областей стане тим, що ми тепер бачимо як спостережуваний Всесвіт. Ця модель має всі переваги попередніх інфляційних моделей, але не залежить від сумнівного фазового переходу і, крім того, може дати прийнятну величину флюктуацій температури фонового мікрохвильового проміння, що узгоджується зі спостереженнями.

Робота над інфляційними моделями виявила, що нинішній стан Всесвіту міг виникнути з досить великої кількості різних початкових конфігурацій. Це важливо, бо вказує, що початковий стан частини Всесвіту, в якій ми мешкаємо, не потрібно вибирати надто ретельно. Тож ми можемо, на бажання, використовувати слабкий антропний принцип, щоб пояснити, чому Всесвіт виглядає таким, як він тепер. Однак це аж ніяк не означає, що кожна початкова конфігурація привела б до Всесвіту, як той, що ми спостерігаємо. Це можна показати, розглядаючи дуже різний стан для Всесвіту в цей час, скажімо, дуже згрупований і неоднорідний. Можна застосувати закони науки, щоб розглянути еволюцію Всесвіту назад у часі, щоб визначити його конфігурацію в раніші часи. Відповідно до теорем про сингулярність класичної загальної теорії відносності, однаково мала б бути сингулярність Великого вибуху. Якщо розвивати такий Всесвіт вперед у часі відповідно до законів науки, то отримаємо згрупований і неоднорідний стан, з якого почали. Тож мають існувати початкові конфігурації, що не приведуть до появи Всесвіту, схожого на той, що ми бачимо сьогодні. Отже, навіть інфляційна модель не говорить нам, чому початкова конфігурація була не така, щоб привести до чогось дуже відмінного від того, що ми спостерігаємо. Чи потрібно нам звернутись до антропного принципу по пояснення? Чи був це просто щасливий збіг обставин? Це виглядатиме як вираження відчаю, заперечення всіх наших сподівань зрозуміти порядок, що лежить в основі Всесвіту.

Щоб передбачити, як Всесвіт мав початися, потрібні закони, справедливі для початку часу. Якщо класична загальна теорія відносності правильна, теореми про сингулярність, які до-

вели Роджер Пенроуз і я, показують, що початок часу був би точкою нескінченної густини і нескінченної кривини простору-часу. Всі відомі закони науки стають нечинними в такій точці. Можна припустити, що є нові закони, справедливі в сингулярностях, але буде дуже важко навіть сформулювати такі закони в точках з такою складною поведінкою, і в нас не буде орієнтира від спостережень щодо того, якими можуть бути ці закони. Однак, що теореми про сингулярність дійсно показують, то це те, що гравітаційне поле таке потужне, що квантові гравітаційні ефекти стають істотними: класична теорія перестає добре описувати Всесвіт. Тож, щоб обговорювати дуже ранні стадії Всесвіту, потрібно використовувати квантову теорію гравітації. Як ми побачимо, можливо, в квантовій теорії звичайні закони науки працюють всюди, зокрема в початку часу: нема потреби постулювати нові закони для сингулярностей, бо в квантовій теорії ніяких сингулярностей не повинно бути.

В нас ще немає повної та послідовної теорії, що об'єднує квантову механіку і гравітацію. Однак ми досить впевнені в деяких властивостях, які повинна мати така єдина теорія. Наприклад, вона повинна містити в собі Файнменову пропозицію щодо формулювання квантової теорії в термінах сум за історіями. При такому підході частинка не має тільки якусь одну історію, як в класичній теорії. Натомість, вона, як припускають, слідує кожним можливим шляхом у просторі-часі, і з кожною з цих історій пов'язана пара чисел, одне з яких представляє величину хвилі, а інше — позицію в циклі (її фазу). Ймовірність, що частинка, скажімо, проходить через деяке конкретне місце, визначається через підсумовування хвиль, пов'язаних з кожною можливою історією, що проходить через це місце. Однак, якщо ми реально намагаємося обчислити ці суми, то стикаємося з серйозними технічними проблемами. Єдиний шлях їх обійти — вжити специфічний рецепт: потрібно додати хвилі для історій частинки не в «реальному» часі, який ми знаємо з досвіду, а в так званому уявному. Уявний час звучить як фантастика, але насправді це добре означене математичне поняття. Якщо взяти будь-яке звичайне (або «дійсне») число і помножити його на себе, результат буде додатним числом. (Наприклад, 2 помножити на 2 буде 4, але такий самий результат дасть і -2 на -2). Однак існують осо-

близькі числа (так звані уявні числа), що дають від'ємні числа при множенні на себе. (Одне з них, i , помножене на себе дає -1 , $2i$, помножене на себе, дає -4 і так далі).

Можна зобразити дійсні та уявні числа так: дійсні числа можна представити лінією, що проходить зліва направо, з нулем посередині, від'ємні числа, -1 , -2 тощо, ліворуч, і додатні числа, 1 , 2 тощо, праворуч. Тоді уявні числа будуть представлені лінією, що йде вгору і вниз сторінки, де i , $2i$ тощо містяться вище від середини, а $-i$, $-2i$ тощо — нижче. Тож уявні числа, у певному сенсі, — це числа під прямим кутом до звичайних дійсних чисел.

Щоб уникнути технічних труднощів з Файнменовою сумою за історіями потрібно використовувати уявний час. Тобто при обчисленнях потрібно вимірювати час, використовуючи не дійсні числа, а уявні. Це має цікавий наслідок для простору-часу: відмінність між часом і простором повністю зникає. Простір-час, в якому події мають уявні значення часових координат називають евклідовим, на честь античного грека Евкліда, який заклавав основи вивчення геометрії двовимірних поверхонь. Те, що ми тепер називаємо Евклідовим простором-часом дуже схоже поняття, за винятком того, що має чотири виміри замість двох. В Евклідовому просторі-часі нема ніякої різниці між часовим напрямком і просторовими. З іншого боку, в реальному просторі-часі, в якому події позначають звичайними, дійсними значеннями координати часу, дуже легко помітити різницю — напрям часу в усіх точках лежить у межах світлового конуса, а напрям простору — поза ним. У кожному разі, коли йдеться про звичайну квантову механіку, ми можемо розглядати наше використання уявного часу і Евклідового простору-часу не більш як математичний апарат (або трюк), щоб обчислити відповіді, що стосуються реального простору-часу.

Друга властивість, що, як ми вважаємо, повинна бути частиною кінцевої теорії — це ідея Айнштайна, що гравітаційне поле представлене викривленим простором-часом: частинки прагнуть рухатися найближчим до прямого шляхом у викривленому просторі, а що простір-час не плоский, то їхні шляхи виглядають вигнутими, ніби гравітаційним полем. Коли ми застосовуємо Файнменову суму за історіями до Айнштайнового бачення гравітації, аналогом історії частинки тепер буде по-

вний викривлений простір-час, що являє собою історію всього Всесвіту. Щоб уникнути технічних труднощів в обчисленні суми за історіями, ці викривлені простори-часи треба вважати Евклідовими. Тобто час уявний і невідрізнений від напрямів у просторі. Щоб обчислити ймовірність знаходження реально-го простору-часу з деякою заданою властивістю, наприклад, щоб він виглядав однаково в кожній точці в будь-якому напрямку, потрібно додати хвилі, пов'язані з усіма історіями, що мають таку властивість.

У класичній загальній теорії відносності існує багато різних можливих викривлених просторів-часів, кожен з яких відповідає різному початковому станові Всесвіту. Якби ми знали початковий стан нашого Всесвіту, то знали б усю його історію. Аналогічно, у квантовій теорії гравітації існує багато різних можливих квантових станів для Всесвіту. Знову ж таки, якби ми знали, як Евклідові викривлені простори-часи в сумі за історіями поводитися в ранні часи, ми б знали квантовий стан Всесвіту.

В класичній теорії гравітації, яка основана на реальному просторі-часі, Всесвіт може поводитися лише двома способами: або він існував нескінченний час, або він мав початок у сингулярності в деякий кінцевий момент часу в минулому. В квантовій же теорії гравітації з'являється третя можливість. Раз ми використовуємо евклідові простори-часи, в яких напрям часу на однаковій основі з напрямками простору, то простір-час може бути скінченний за розміром, але не мати сингулярностей, що творили б межу або край. Простір-час буде як поверхня Землі, лише з двома додатковими вимірами. Поверхня Землі скінченна за розміром, але не має межі або краю: якщо ви попливете на захід сонця, ви не випадете через край і не вріжетеся в сингулярність. (Я знаю, бо об'їхав довкола світу!)

Якщо Евклідів простір-час простягається назад в уявному часі до нескінченності, або якщо він починається з сингулярності в уявному часі, ми матимемо таку ж проблему, як і в класичній теорії з визначенням початкового стану Всесвіту: Бог, може, й знає, як почався Всесвіт, але ми не маємо ніяких підстав думати, що він почався так, а не інакше. З іншого боку, квантова теорія гравітації відкрила нову можливість, коли нема межі простору-часу, тож непотрібно визначати поведінку на цій межі. Не буде

ніяких сингулярностей, в яких перестають працювати закони науки, і нема краю простору-часу, при якому треба було б звертатися до Бога або якогось нового закону, щоб встановити межові умови для простору-часу. Можна сказати: «межова умова для Всесвіту — це те, що межі нема». Всесвіт буде повністю самостійний і не залежатиме ні від чого ззовні. Він не буде ні створений, ні знищений, він просто БУДЕ.

Саме на конференції у Ватикані, згаданій вище, я вперше запропонував те, що, можливо, час і простір разом створюють якусь поверхню, кінцеву за розміром, але без межі чи краю. Однак моя стаття була досить математична, тож її наслідки для ролі Бога у створенні Всесвіту, загалом кажучи, не були побачені в той час (зрештою, це стосується і мене). Під час конференції у Ватикані я не знав, як використовувати ідею «без межі», щоб робити передбачення щодо Всесвіту. Однак я провів наступне літо в Каліфорнійському університеті в Санта-Барбарі. Там зі своїм другом і колегою, Джимом Гартлом, ми розробили умови, яким повинен відповідати Всесвіт, якщо простір-час не має межі. Коли я повернувся в Кембридж, то продовжив цю роботу з двома своїми аспірантами, Джуліаном Лутрелом і Джонаном Галівелом.

Хочу підкреслити, що ця ідея, що час і простір мають бути кінцеві «без межі», — це просто пропозиція: її не можна вивести з якогось іншого принципу. Як і будь-яка інша наукова теорія, вона спочатку може бути висунута з естетичних або метафізичних міркувань, але справжньою перевіркою буде те, чи робить вона передбачення, що узгоджуються зі спостереженнями. У разі квантової гравітації це, однак, важко визначити з двох причин. По-перше, як буду пояснювати в 11 розділі, ми ще не впевнені точно, яка теорія успішно об'єднає загальну теорію відносності та квантову механіку, хоча ми знаємо досить багато про форму, яку повинна мати така теорія. По-друге, будь-яка модель, що описує весь Всесвіт у подробицях, буде занадто складна математично, щоб ми могли обчислити точні передбачення. Тож повинні будемо робити спрощувальні припущення і наближення, але навіть тоді проблема діставання передбачень залишиться надскладною.

Кожна історія в сумі за історіями описуватиме не лише простір-час, але й усе в ньому, зокрема будь-які складні орга-

нізми, такі як люди, що можуть спостерігати історію Всесвіту. Це може надати ще одне виправдання антропному принципові, бо якщо всі історії можливі, то поки ми існуємо в одній з них, ми можемо його використати, щоб пояснити, чому Всесвіт саме такий, який він є. Не зрозуміло, який сенс можна надати іншим історіям, в яких ми не існуємо. Цей погляд з позиції квантової теорії гравітації, однак, буде значно задовільніший, якщо можна було б показати, використовуючи суму за історіями, що наш Всесвіт не просто одна з можливих історій, а й одна з найімовірніших. Для цього нам потрібно обчислити суму за історіями для всіх можливих евклідових просторів-часів, що не мають меж.

З пропозиції «без меж» виявляємо, що шанс існування Всесвіту відповідно до більшості можливих історій нехтовно малий, але є окрема сім'я історій ймовірніша за інші. Ці історії можна зобразити, як щось схоже на поверхню Землі, де відстань від Північного полюса відображає уявний час, а розмір кола на сталій відстані від Північного полюса — просторовий розмір Всесвіту. Всесвіт починається на Північному полюсі як єдина точка. Якщо рухатися на південь кола широти на сталій відстані від Північного полюса стають більшими, що відповідає розширенню Всесвіту з уявним часом (рис. 8.1). Всесвіт досягне максимального розміру на екваторі і стягуватиметься зі збільшенням уявного часу в єдину точку на Південному полюсі. Навіть при тому, що Всесвіт матиме нульовий розмір на Північному та Південному полюсах, ці точки не будуть сингулярностями, так само як не сингулярні Північний і Південний полюси Землі.

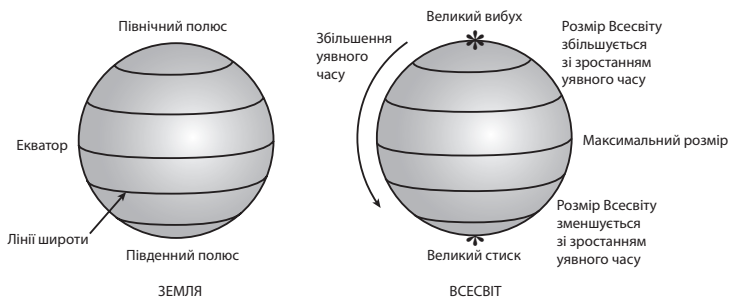


Рис. 8.1.

Історія Всесвіту в реальному часі, однак, виглядатиме зовсім інакше. Приблизно десять чи двадцять мільярдів років тому, він мав мінімальний розмір, що дорівнював максимальному радіусові історії в уявному часі. Пізніше в реальному часі Всесвіт розширюватиметься подібно до хаотичної інфляційної моделі, запропонованої Лінде (але тепер не треба припускати, що Всесвіт був створений у якомусь правильному стані). Всесвіт розширюватиметься до дуже великого розміру (рис. 8.1) і зрештою сколапсує знову в те, що виглядає як сингулярність у реальному часі. Тому, у певному сенсі, ми всі приречені, навіть якщо будемо триматися подалі від чорних дір. Сингулярностей не буде, лише якщо ми зможемо представити Всесвіт в термінах уявного часу.

Якщо Всесвіт справді перебуває в такому квантовому стані, тоді не буде сингулярностей в історії Всесвіту в уявному часі. Тож може здатися, що моя пізніша робота повністю перекреслила результати моєї ранішої роботи з сингулярностей. Але, як вказано вище, справжня важливість теорем про сингулярність у тому, що вони показали, що гравітаційне поле повинно стати таким потужним, що квантові гравітаційні ефекти не можна буде ігнорувати. Це, своєю чергою, привело до ідеї, що Всесвіт може бути скінченний в уявному часі, але без меж чи сингулярностей. Однак якщо повернутися до реального часу, в якому ми живемо, там, як і раніше, з'являться сингулярності. Бідолашний астронавт, який падає в чорну діру все ще кепськo закінчить; тільки якщо житиме в уявному часі, він не зіткнеться з сингулярностями.

Це може означати, що так званий уявний час є насправді реальний час, а те, що ми називаємо реальним часом лише плід нашої уяви. В реальному часі Всесвіт має початок і кінець у сингулярностях, що створюють межу простору-часу, і в яких закони науки перестають працювати. Але в уявному часі нема сингулярностей чи меж. Тож можливо, те, що ми називаємо уявним часом, насправді базовіше, а те, що ми називаємо реальним — просто ідея, яку ми винайшли, щоб допомогти собі описати, як, на нашу думку, виглядає Всесвіт. Але згідно з підходом, описаним в 1 розділі, наукова теорія — просто математична модель, яку ми створюємо, щоб описати наші спостереження: вона існує лише в нашому розумі. Тож нема сенсу питати: що реаль-

не — «реальний» чи «уявний» час? Тут просто річ у тім, який опис зручніший.

Можна також використати суму за історіями разом з пропозицією безмежовості, щоб знайти, які властивості Всесвіту, можливо, трапляються одночасно. Наприклад, можна обчислити ймовірність того, що Всесвіт розширюється з майже однаковою швидкістю в усіх напрямках водночас, коли густина Всесвіту має своє нинішнє значення. У спрощених моделях, досі розглянутих, ця ймовірність виявляється високою; тобто запропонована умова безмежовості приводить до передбачення, що нинішня швидкість розширення Всесвіту з високою ймовірністю майже однакова в кожному напрямку. Це відповідає спостереженням фоновому мікрохвильового проміння, що показують майже абсолютно однакову інтенсивність у будь-якому напрямку. Якщо б Всесвіт розширювався в деяких з них швидше, ніж в інших, інтенсивність проміння в тих напрямках була б зменшена через додатковий червоний зсув.

Тепер йде робота над подальшими передбаченнями з умови безмежовості. Особливо цікава проблема — величина невеликих відхилень від однорідної густини в ранньому Всесвіті, що привели до утворення спочатку галактик, потім зір, і нарешті нас. З принципу невизначеності випливає, що ранній Всесвіт не може бути повністю однорідний, бо мали бути деякі невизначеності чи флюктуації в положеннях і швидкостях частинок. Використовуючи умову безмежовості, ми знаходимо, що Всесвіт дійсно повинен був початися з лише мінімально можливою неоднорідністю, дозволеною принципом невизначеності. Тоді б Всесвіт пройшов період швидкого розширення, як в інфляційних моделях. Протягом цього періоду початкові неоднорідності посилювалися б, поки не стали б достатньо великі, щоб пояснити походження структур, які ми спостерігаємо навколо. 1992 року супутник-дослідник космічного фону (КОБІ) вперше виявив дуже невеликі варіації в інтенсивності мікрохвильового фону залежно від напрямку. Те, як ці неоднорідності залежать від напрямку, здається, відповідає передбаченням інфляційної моделі та пропозиції безмежовості. Тому пропозиція безмежовості — добра наукова теорія, за Карлом Попером: вона могла б бути сфальсифікована спостереженнями, але натомість її передбачення підтвердже-

ні. В розширеному Всесвіті, де густина матерії трохи змінювалася від місця до місця, під дією гравітації густіші області сповільнили б своє розширення і почали стискатися. Це приведе до формування галактик, зір і зрештою навіть незначних істот на кшталт нас. Тому всі складні структури, що ми бачимо у Всесвіті, можна пояснити умовою безмежовості для Всесвіту разом з принципом невизначеності квантової механіки.

Ідея, що простір і час можуть утворювати замкнуту поверхню без меж, також має глибокі наслідки для ролі Бога в справах Всесвіту. З успіхом наукових теорій в поясненні подій більшість людей дійшли думки, що Бог дозволяє Всесвітові розвиватися відповідно до набору законів і не втручається у Всесвіт, щоб ці закони порушити. Проте закони не кажуть нам, як Всесвіт мав виглядати, коли він почався — однаково залежатиме від Бога накрутити годинника і вибрати, як його запустити. Поки Всесвіт має початок, ми можемо припускати, що був творець. Але якщо Всесвіт дійсно повністю замкнутий, і не має межі або краю, він не матиме ні початку, ні кінця: він просто буде. Яке ж тоді місце для творця?

Розділ 9

СТРІЛА ЧАСУ

У попередніх розділах ми з'ясували, як змінювалися погляди людства на природу часу. До початку цього століття люди вірили в абсолютний час. Тобто кожну подію єдиним чином можна було б позначити якимсь числом, так званим «часом», і всі точні годинники будуть показувати той самий інтервал часу між двома подіями. Проте відкриття, що швидкість світла виявилася однаковою для кожного спостерігача, незалежно від того, як він рухається, привело до теорії відносності й відмови від ідеї існування єдиного абсолютного часу. Замість цього кожен спостерігач має свою власну міру часу, яку показує його годинник: у різних спостерігачів вони не обов'язково збігаються. Отже, час став особистішим поняттям щодо спостерігача, який його вимірює.

Коли намагалися об'єднати гравітацію з квантовою механікою, довелося ввести поняття «уявного» часу. Уявний час подібний до напрямів у просторі. Якщо можна йти на північ, то можна розвернутися й піти на південь; однаковою мірою, якщо можна йти вперед в уявному часі, певно, можна повернутися й піти назад. Це означає, що не може бути ніякої важливої відмінності між прямим і зворотним напрямками уявного часу. З іншого боку, всі ми знаємо, якщо говорити про «реальний» час, то є дуже велика різниця, між прямим і зворотним напрямками. Звідки взялася ця різниця між минулим і майбутнім? Чому ми пам'ятаємо минуле, але не майбутнє?

Закони науки не розрізняють минуле та майбутнє. Точніше, як зазначено вище, закони науки не змінюються при комбінації операцій (або симетрій), відомих як C , P і T . (C означає замінування частинок античастинками, P — перетворювання дзеркального відображення, так що ліве та праве міняються місцями,

і Т — обертання напрямку руху всіх частинок, по суті, зворотний рух.) Закони науки, які регулюють поведінку речовини при всіх нормальних ситуаціях, самі по собі не змінюються при комбінації двох операцій С і Р. Іншими словами, життя було б точно таке ж для мешканців іншої планети, якби вони були дзеркальним відображенням нас і якби вони були зроблені з антиречовини, а не речовини.

Якщо закони науки не змінюються при комбінації операцій С і Р, а також комбінації С, Р, Т, вони також повинні бути незмінні при одній лише операції Т. Але є велика різниця між прямим і зворотним напрямками реального часу в звичайному житті. Уявіть собі чашку води, яка падає зі столу і розбивається на уламки об підлогу. Якщо зафільмувати цей процес, можна легко сказати, в якому напрямку він прокручується. Якщо запустити його назад, то ви побачите, як шматочки раптом зберуться з підлоги, застрибують назад, щоб сформувати на столі цілу чашку. Ви можете сказати, що фільм був запущений назад, тому що така поведінка ніколи не спостерігається в звичайному житті. Якби таке відбувалося, виробники посуду закрили б свою справу.

Пояснення, яке зазвичай дають стосовно того, чому ми не бачимо розбиті чашки, які збирають себе до купи з підлоги і стрибають назад на стіл, — бо це заборонено другим законом термодинаміки. В ньому говориться про те, що в будь-якій замкнутій системі безлад, або ентропія, завжди з часом зростає. Іншими словами, це форма закону Мерфі: щось завжди йде не так! Ціла чашка на столі — це стан високого порядку, а розбита чашка на підлозі — стан безладу. Можна легко пройти шлях від цілої чашки на столі в минулому до розбитої чашки на підлозі в майбутньому, але не навпаки.

Зростання безладу чи ентропії з плином часу — один з прикладів того, що називається стрілою часу, того, що відрізняє минуле від майбутнього, даючи напрям часові. Є щонайменше три різних стріли часу. По-перше, існує термодинамічна стріла часу, напрям часу, в якому безлад, або ентропія, зростає. Крім того, є психологічна стріла часу. Це напрям, в якому ми відчуваємо плин часу, напрям, в якому ми пам'ятаємо минуле, але не майбутнє. Нарешті, є космологічна стріла часу. Це напрям часу, в якому Всесвіт розширюється, а не стискається.

У цьому розділі я доведу, що умова безмежовості для Всесвіту разом із слабким антропним принципом не може пояснити, чому всі три стріли вказують у тому ж напрямку, і навіть більше, чому чітко визначена стріла часу має взагалі існувати. Я доведу, що психологічна стріла визначається термодинамічною, і що ці дві стріли обов'язково завжди вказують у тому ж напрямку. Якщо припустити умову безмежовості для Всесвіту, ми побачимо, що повинні бути чітко визначені термодинамічна та космологічна стріли часу, але вони не будуть вказувати в тому ж напрямку впродовж усієї історії Всесвіту. Проте я доведу, що лише тоді, коли вони вказують у тому ж напрямку, умови сприятливі для розвитку розумних істот, які можуть поставити запитання: чому безлад зростає в тому ж напрямку часу, в якому розширюється Всесвіт?

Спочатку я хочу обговорити термодинамічну стрілу часу. Другий закон термодинаміки пов'язаний з тим, що завжди існує набагато більше неупорядкованих станів, ніж упорядкованих. Розглянемо, наприклад, частини мозаїки в коробці. Існує одна і тільки одна комбінація, за допомогою якої ці частини утворюють повну картинку. З іншого боку, існує велика кількість комбінацій, при яких частини неупорядковані та не утворюють картинку.

Припустимо, що система починається в одному з небагатьох упорядкованих станів. З часом система буде розвиватися відповідно до законів науки і її стан зміниться. Згодом ймовірнішим буде те, що система перейде в неупорядкований стан, бо неупорядкованих станів більше. Таким чином безлад з плином часу матиме тенденцію до зростання, якщо система задовольняє початкову умову високого порядку.

Припустимо, що частини мозаїки були в коробці в упорядкованій комбінації, в якій вони утворюють картинку. Якщо потрусити коробку, частини утворять іншу комбінацію. Це, певно, буде неупорядкована комбінація, в якій частини не утворюють правильної картинку лише тому, що існує дуже багато неупорядкованих комбінацій. Деякі групи частин можуть і далі утворювати частини картинку, але що більше ви трясете коробку, то ймовірніше, що ці групи будуть розбиватися, а частини будуть повністю перемішані та не утворюватимуть нічого схожого на кар-

тинку. Отже, безлад з часом напевне зростатиме, якщо частини спочатку перебували у стані високого порядку.

Однак припустимо, Бог вирішив, що Всесвіт повинен закінчитися в стані високого порядку, дарма з якого стану він почався. У ранні часи Всесвіт, ймовірно, був би у невпорядкованому стані. Це б означало, що безлад з часом зменшуватиметься. Тоді ви б бачили розбиті чашки, які збираються в одне ціле і стрибають на стіл. Проте будь-які людські істоти, що спостерігали б за такими чашками, повинні жити у Всесвіті, в якому безлад з часом зменшується. Я стверджую, що такі істоти матимуть психологічну стрілу часу в зворотному напрямку. Тобто вони пам'ятатимуть події в майбутньому, але не події у своєму минулому. Коли чашка розбита, вони пам'ятатимуть її перебування на столі, але коли вона на столі, вони не пам'ятатимуть її перебування на підлозі.

Досить важко говорити про людську пам'ять, тому що ми не знаємо детально, як працює мозок. Однак ми знаємо все про те, як працює комп'ютерна пам'ять. Тому я обговорюватиму психологічну стрілу часу для комп'ютерів. Думаю, було б розумно припустити, що стріла для комп'ютерів і для людей така ж сама. Інакше можна було б діставати великий прибуток на фондовій біржі, маючи комп'ютера, який пам'ятав би ціни завтрашнього дня! Пам'ять комп'ютера — це по суті пристрій, що містить елементи, які можуть існувати в одному з двох станів. Простий приклад — рахівниця. У своїй найпростішій формі вона складається з низки дротів; на кожному з них розташована низка кульок, які можуть бути розміщені в одному з двох положень. До того як елемент буде записаний у пам'ять комп'ютера, вона перебуває в невпорядкованому стані, з рівними ймовірностями для двох можливих станів (кульки довільно розкидані на дротах рахівниці). Після взаємодії пам'яті з системою потрібно пам'ятати, що вона, безперечно, буде в тому або тому стані, залежно від стану системи. (Кожна кулька рахівниці буде або на лівому, або на правому боці дроту). Таким чином пам'ять перейшла від невпорядкованого стану до впорядкованого. Однак для того, щоб переконатися, що пам'ять у потрібному стані, необхідно використати певну кількість енергії (наприклад, для переміщення кульки або для живлення комп'ютера). Ця енергія розсі-

юється у вигляді тепла і збільшує кількість безладу у Всесвіті. Можна показати, що це зростання безладу завжди більше, ніж зростання порядку самої пам'яті. Отже, тепло, видалене вентилятором охолодження комп'ютера, означає, що, коли комп'ютер записує елемент до пам'яті, загальна величина безладу у Всесвіті ще зростає. Напряму часу, в якому комп'ютер запам'ятовує минуле, такий же, як той, в якому зростає безлад.

Тому наше суб'єктивне відчуття напряму часу, психологічна стріла часу, визначена в нашому мозку термодинамічною стрілою часу. Так само як і комп'ютер, ми повинні пам'ятати речі в порядку, в якому зростає ентропія. Це робить другий закон термодинаміки майже тривіальним. Безлад з часом зростає, тому що ми вимірюємо час у напрямі, в якому безлад зростає. Нема певнішої ставки за цю!

Але чому термодинамічна стріла часу взагалі повинна існувати? Або, іншими словами, чому Всесвіт повинен перебувати в стані високого порядку в одному кінці часу, кінці, який ми називаємо минулим? Чому він у всі часи не перебуває в стані повного безладу? Зрештою, це може здатися імовірнішим. І чому цей напрям часу, в якому безлад зростає, такий же, як і той, в якому Всесвіт розширюється?

Класична загальна теорія відносності не може передбачити, як виник Всесвіт, тому що всі відомі закони науки були б порушені сингулярністю Великого вибуху. Всесвіт міг виникнути в гладкому та дуже впорядкованому стані. Це привело б до чітко визначених термодинамічних і космологічних стріл часу, як ми і спостерігаємо. Але Всесвіт також міг би рівною мірою виникнути в дуже грудкуватому та неупорядкованому стані. У цьому разі Всесвіт уже був би в стані повного безладу, тому останній не міг би зростати з часом. Всесвіт або залишатиметься незмінним, і в цьому разі не було б чітко визначеної термодинамічної стріли часу, або він зменшуватиметься, і в цьому разі термодинамічна стріла часу вказуватиме в напрямі, протилежному до напрямі космологічної стріли. Жодна з цих можливостей не узгоджується з тим, що ми спостерігаємо. Однак, як ми вже бачили, класична загальна теорія відносності передбачає свою власну нечинність. Коли викривлення простору-часу стає великим, стануть важливими квантові гравітаційні ефекти і класична теорія пере-

стане бути хорошим описом Всесвіту. Потрібно використовувати квантову теорію гравітації, щоб зрозуміти, як виник Всесвіт.

Для того щоб визначити стан Всесвіту у квантовій теорії гравітації, як ми бачили в попередньому розділі, необхідно було б ще згадати і про те, як можливі історії Всесвіту будуть поводитись на межі простору-часу в минулому. Можна було б обійти ці труднощі з описанням того, що ми не знаємо і не можемо знати, якщо тільки історії задовольняють умову безмежовості: вони скінчено протяжні, але не мають меж, країв чи сингулярностей. У цьому разі початок часу був би регулярною, гладкою точкою простору-часу і Всесвіт почав би своє розширення з дуже гладкого та впорядкованого стану. Всесвіт не міг бути повністю однорідним, тому що це б порушило принцип невизначеності квантової теорії. Мали б бути невеликі коливання в густині та швидкості частинок. Однак умова безмежовості означає, ці коливання були такі малі, які могли бути, щоб відповідати принципів невизначеності.

Всесвіт почався б з періоду експоненційного або «інфляційного» розширення, при цьому він збільшився б до дуже великого розміру. Під час цього розширення густина флюктуації залишалася б спочатку невеликою, але пізніше почала б зростати. В областях, в яких густина була б дещо вища, ніж середнє її значення, розширення мало б сповільнитися через гравітаційне притягання додаткової маси. Зрештою такі регіони перестануть розширюватися і стягнуться, утворюючи галактики, зорі та істоти на кшталт нас. Всесвіт виник би в гладкому та впорядкованому стані й з часом перейшов би в неоднорідний і невпорядкований. Це могло б пояснити існування термодинамічної стріли часу.

Але що ж станеться, якщо і коли Всесвіт перестав би розширюватися і почав стискатися? Чи повернеться назад термодинамічна стріла і чи почне зменшуватися безлад з плином часу? Для людей, які пережили б перехід від фази розширення до стиснення, відкриються різного роду науково-фантастичні можливості. Чи вони побачать розбиті чашки, які збираються в одне ціле з підлоги і застрибують знову на стіл? Чи зможуть вони згадати завтрашні ціни і розбагатіти на фондовому ринку? Видається трохи завчасним турбуватися про те, що станеться, коли Всесвіт знову почне колапсувати, бо він не почне стискатися ще при-

наймні десять мільярдів років. Але є і швидший спосіб дізнатися, що станеться: стрибнути в чорну діру.

Колапс зорі з утворенням чорної діри досить подібний до пізніших стадій колапсу всього Всесвіту. Отже, якщо безлад зменшуватиметься в фазі стискання Всесвіту, можна також очікувати, що він зменшиться й усередині чорної діри. Тому, можливо, астронавт, який впав у чорну діру, зможе заробити гроші на рулетці, пам'ятаючи, де опиниться кулька, перш ніж зробить свою ставку. (Однак, на жаль, він не довго гратиме, перш ніж перетвориться в спагеті. Також він не зможе повідомити нас про обернення термодинамічної стріли, або навіть банк про свій виграш, бо буде захоплений за горизонтом подій чорної діри.)

Спочатку я вважав, що безлад зменшиться, коли Всесвіт реколлапсує. Я так вважав, тому що Всесвіт повернеться до гладкого та впорядкованого стану, коли він знову буде малий. Це означало б, що фаза стискання буде подібна до зворотної в часі фази розширення. Люди в стані стискання жили б своїм життям у зворотному напрямку: вони помруть, перш ніж народяться і будуть молодшати в міру того, як Всесвіт стискатиметься.

Ця ідея приваблива, бо означатиме хорошу симетрію між фазою розширення та фазою стискання. Втім не можна сприймати її окремо, незалежно від інших уявлень про Всесвіт. Залишається питання: вона впливає з умови безмежовості, чи несутісна з цією умовою? Як уже говорив, спочатку я подумав, що умова безмежовості насправді означає те, що безлад буде зменшуватися в фазі стискання. Мене частково ввела в оману аналогія з поверхнею Землі. Припустимо, якщо початок Всесвіту відповідає Північному полюсові, тоді кінець Всесвіту повинен бути подібний до початку так само, як Південний полюс подібний до Північного. Проте Північний і Південний полюси відповідають початкові й кінцеві Всесвіту в уявному часі. Початок і кінець у реальному часі можуть дуже відрізнятися один від одного. Мене також збила з пантелику робота, в якій я показав на простій моделі Всесвіту, що фаза колапсу була схожа на зворотну в часі фазу розширення. Однак мій колега Дон Пейдж з Університету штату Пенсильванія зазначив, що умова безмежовості не вимагає обов'язково того, щоб фаза стискання була зворотною в часі фазою розширення. Крім того, один із моїх студен-

тів Реймонд Лефлем встановив, що в складнішій моделі колапс Всесвіту сильно відрізняється від його розширення. Я зрозумів, що зробив помилку: умова безмежовості означає, що безлад насправді продовжить зростати при стисненні. Термодинамічні та психологічні стріли часу не змінять свого напрямку, ні тоді, коли Всесвіт почне знову стискатись, ні всередині чорних дір.

Що б ви зробили, якби виявили, що так помилилися? Деякі люди ніколи не визнають, що вони не праві, і продовжують знаходити нові й часто взаємосуперечливі аргументи на підтримку своєї справи — так як Едингтон виступив проти теорії чорних дір. Інші стверджують, що вони, як на те пішло, насправді ніколи й не підтримували неправильної думки або, якщо й підтримували, то тільки для того, щоб показати, що вона була суперечлива. Мені здається, що набагато краще і менш плутано буде, якщо ви визнаєте письмово те, що були неправі. Хорошим прикладом цього був Айнштайн, який назвав космологічну константу, яку він ввів, намагаючись зробити статичну модель Всесвіту, найбільшою помилкою у своєму житті.

Повертаючись до стріли часу, залишається одне питання: чому ж ми спостерігаємо те, що термодинамічні та космологічні стріли вказують в однаковому напрямку? Або, іншими словами, чому безлад збільшується в тому ж самому напрямку часу, в якому розширюється Всесвіт? Якщо вважати, що Всесвіт буде розширюватися, а потім знову стискатися, що, здається, впливає з припущення безмежовості, постає питання про те, чому ми повинні бути в фазі розширення, а не у фазі стискання.

На це питання можна відповісти, виходячи зі слабого антропного принципу. Умови в фазі стискання не будуть придатні для існування розумних істот, які могли б поставити запитання: чому безлад зростає в тому ж напрямку часу, в якому розширюється і Всесвіт? Інфляція на ранніх стадіях Всесвіту, як передбачає припущення безмежовості, означає, що він повинен розширюватися з дуже близькою до критичної швидкістю, при якій якраз уникне реколапсу, і тому останній не відбудеться ще протягом дуже тривалого часу. До того часу всі зорі згорять і протони та нейтрони в них, певно, розпадуться на легкі частинки і проміння. Всесвіт буде в стані майже повного безладу, в якому не буде сильної термодинамічної стріли часу. Безлад не міг

би набагато зрости, бо Всесвіт був би вже у стані майже повного безладу. Проте сильна термодинамічна стріла необхідна для розумного життя. Для того щоб вижити, люди повинні споживати їжу, яка являє собою упорядковану форму енергії, та перетворювати її в тепло — неупорядковану форму енергії. Отже, розумне життя не може існувати в фазі стискання Всесвіту. Це — пояснення того, чому ми спостерігаємо, що термодинамічна та космологічна стріли часу направлені в тому ж самому напрямку. Не можна сказати, що розширення Всесвіту приводить до зростання безладу. Швидше це означає, що через умову безмежовості безлад зростає, а умови, придатні для розумного життя, є тільки в фазі розширення.

Підбиваючи підсумки, закони науки не розрізняють прямий і зворотний напрями часу. Проте існує щонайменше три стріли часу, які відрізняють минуле від майбутнього. Це: термодинамічна стріла — напрям часу, в якому зростає безлад; психологічна стріла — напрям часу, в якому ми пам'ятаємо минуле, а не майбутнє; і космологічна стріла — напрям часу, в якому Всесвіт розширюється, а не стискається. Я показав, що психологічна стріла по суті така ж, як і термодинамічна стріла, так що обидві завжди вказують в тому ж самому напрямку. Припущення безмежовості для Всесвіту передбачає існування чітко визначеної термодинамічної стріли часу, тому що він повинен виникнути в гладкому і впорядкованому стані. А причина збігу термодинамічної стріли з космологічною, що ми спостерігаємо, полягає в тому, що розумні істоти можуть існувати тільки в фазі розширення. Фаза стискання для них непридатна, бо вона не має сильної термодинамічної стріли часу.

Прогрес людства в розумінні Всесвіту сприяв створенню малого куточка порядку в зростальному безладі Всесвіту. Якщо ви запам'ятаєте кожне слово в цій книжці, ваша пам'ять запише близько двох мільйонів одиниць інформації: порядок у вашій голові збільшиться приблизно на два мільйони одиниць. Однак у той час, коли ви читали книгу, то перетворювали принаймні тисячу калорій впорядкованої енергії у вигляді їжі в неупорядковану енергію у вигляді тепла, яке ви виділяєте в повітря за рахунок конвекції та потіння. Це збільшить безлад у Всесвітідесь на двадцять мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів оди-

ниць — що десь у десять мільйонів мільйонів мільйонів разів перевищить зростання порядку у вашому мозку — і це якщо ви запам'ятаєте все, що є в цій книжці. У дальшому розділі, я все ж спробую трохи збільшити порядок у наших краях, пояснюючи, як люди намагаються сумістити часткові теорії, які я описав, щоб сформувати повну єдину теорію, яка охопила б усе у Всесвіті.

Розділ 10

ЧЕРВОТОЧИНИ ТА ПОДОРОЖІ В ЧАСІ

У попередньому розділі йшлося про те, чому ми вважаємо, що час рухається вперед: чому безлад зростає і ми пам'ятаємо минуле, але не майбутнє. Час розглядали, наче він був прямою залізничною колією, якою можна рухатися лише в той чи інший бік.

Та що, якби колія мала петлі та відгалуження, якими можна було б рухатись уперед, однак повертаючись до станції, яку вже минув? Іншими словами, чи можливі для кого-небудь подорожі у майбутнє або минуле?

Г. Д. Велз у «Машині часу» вивчив такі можливості, як і чимало інших письменників-фантастів. Однак багато ідей наукової фантастики, наприклад підводні човни, подорожі на Місяць, стали науковими фактами. То які ж перспективи для подорожі в часі?

Перша ознака того, що закони фізики можуть дійсно дозволити людям подорожувати в часі з'явилася 1949 року, коли Курт Гедель відкрив новий простір-час, дозволений загальною теорією відносності. Гедель — математик який став знаменитим, довівши, що неможливо довести всі істинні твердження, навіть якщо обмежитися намаганням довести всі істинні твердження в якомусь вочевидь банальному предметі, як арифметика. Як і принцип невизначеності, теорія неповноти Геделя може бути фундаментальним обмеженням нашої здатності розуміти та передбачати Всесвіт. Та поки що вона, видається, не перешкоджає нам у пошуках повної єдиної теорії.

Гедель ознайомився з загальною теорією відносності, коли він і Айнштайн провели свої пізніші роки в Принстонському інституті передових досліджень. Його простір-час має таку цікаву властивість, що весь Всесвіт обертається. Ви можете спитати: "Обертається відносно чого?". Відповідь: віддалена ма-

терія оберталася б відносно напрямів, що вказують малі дзиґи чи гіроскопи.

Це мало б такий побічний ефект, що дало б змогу комусь вирушити на ракетному кораблі й повернутися на Землю ще до того, як відлетів. Така властивість вкрай засмутила Айнштайна, який вважав, що загальна теорія відносності не дозволить подорожувати в часі. Та, можливо, зважаючи на його необгрунтоване заперечення гравітаційного колапсу і принципу невизначеності, це був обнадійливий знак. Розв'язок, який знайшов Гедель, не відповідає нашому Всесвітові, бо ми можемо довести, що він не обертається. Він також мав ненульове значення космологічної константи, яку ввів Айнштайн, коли думав, що Всесвіт незмінний. Після того, як Габл відкрив розширення Всесвіту, необхідність у космологічній константі відпала, і нині прийнято вважати, що вона дорівнює нулеві²⁷. Однак з того часу були відкриті інші, прийнятніші простори-часи, що дозволені загальною теорією відносності, і які дозволяють подорожувати у минуле. Один з них — усередині обертової чорної діри. Інший — простір-час, який містить у собі дві космічні струни, що рухаються одна повз одну на високій швидкості. Як впливає з їхньої назви, космічні струни — об'єкти, схожі на струни в тому, що вони мають довжину і маленький поперечний перетин. Насправді вони більше схожі на гумову стрічку, бо перебувають під неймовірним розтягувальним напруженням, деś як мільйон мільйонів мільйонів мільйонів тон. Космічна струна, прикріплена до Землі, могла б пришвидшити її від 0 до 60 миль за годину за 1/30 секунди. Космічні струни в чомусь можуть здаватися чистою науковою фантастикою, та є підстави вважати, що вони могли утворитись у ранньому Всесвіті внаслідок порушення симетрії, про яке йшлося в розділі 5. Через те що будуть під

²⁷ Космологічну константу (Λ) в польових рівняннях загальної теорії відносності Айнштайн спочатку вніс, щоб уможливити статичну космологічну модель, але відкинув після встановлення розширення Всесвіту. Протягом тривалого часу космологи припускали, що Λ рівна нулеві. 1998 року відкрито пришвидшене розширення Всесвіту, найпоширеніше пояснення цього явища — існування темної енергії. Її природа на сьогодні невідома, але запропоновано два її представлення — як [додатної] космологічної константи і як квінтенсії. — *Прим. ред.*

неймовірним розтягувальним напруженням і можуть початися в будь-якій конфігурації, випрямляючись, вони могли б пришвидшуватись до високих швидкостей.

Цей розв'язок Геделя та простір-час космічної струни починався таким викривленням, що подорож у минуле була завжди можлива. Бог міг створити такий викривлений Всесвіт, та в нас немає жодної підстави вважати, що він робив. Спостереження мікрохвильового фону і поширеності легких елементів свідчать, що ранній Всесвіт не мав кривини, необхідної для подорожі в часі. Такий же висновок впливає з теоретичних підстав, якщо припущення безмежовості правильне. І ось питання: якщо Всесвіт з самого початку не мав кривини, необхідної для подорожі в часі, то чи можемо ми згодом викривити локальні області простору-часу достатньою мірою, щоб зробити її можливою?

Ще одна тісно пов'язана з цим проблема, якою також переймаються письменники-фантасти — швидкі міжзореві та міжгалактичні подорожі. Згідно з теорією відносності, ніщо не може рухатися швидше за світло. Отже, якщо ми відправимо космічний корабель до найближчої від нас сусідньої зорі Альфи Кентавра, що приблизно за чотири світлові роки, нам доведеться чекати принаймні вісім років, перш ніж мандрівники повернуться і розкажуть нам, що вони виявили. Якщо б така експедиція була до центра нашої Галактики, чекати довелося б принаймні сто тисяч років, перш ніж вона повернеться. Проте теорія відносності допускає одну втіху. Це так званий парадокс близнюків, про який йшлося в розділі 2.

Позаяк не існує єдиного стандарту часу, а спостерігачі мають свій власний час, вимірюваний годинниками, що вони носять з собою, цілком можливо, подорож виявиться набагато коротшою для космічних мандрівників, ніж для тих, хто лишається на Землі. Та небагато радості повернутися з космічної подорожі лише на кілька років старшим і дізнатись, що всі, кого ви залишили, померли тисячі років тому. Тож, щоб хоч якось зацікавити читача, письменники-фантасти мали припускати, що одного чудового дня ми дізнаємося, як подорожувати швидше за світло. Та більшість цих авторів, здається, не врахували, що якщо ви можете рухатися швидше за світло, то з теорії відносності ви-

пливає, що ви також можете подорожувати назад у часі, як описує такий лімерик:

Була собі панночка Вайт,
спритніша від променя світла,
чкурнула яюсь у незвіданий край,
як завше —
аж у «вчора» прибігла.²⁸

Річ у тім, що, за теорією відносності, нема якогось єдиного виміру часу, з яким би погодились усі спостерігачі, а в кожного свій власний вимір часу. Якщо ракета, рухаючись повільніше за світло, може дістатись від точки А (скажімо, фіналу стометрового забігу на Олімпійських іграх 2012 року) до точки Б (приміром, відкриття 100 004 засідання конгресу Альфи Кентавра), то всі спостерігачі погодяться, що подія А сталася раніше за Б, згідно з їхніми часами. Та припустимо, що кораблеві довелось би рухатися швидше за світло, щоб донести результат бігу до конгресу. Тоді спостерігачі, рухаючись з різною швидкістю, можуть не зійтись на тому, що сталося раніше — А чи Б. Відповідно до часу якогось спостерігача, що перебуває у стані спокою відносно Землі, може бути, що відкрили конгрес після бігу. Отже, цей спостерігач думатиме, що космічний корабель міг би дістатися від А до Б завчасно, якщо тільки знехтує межею швидкості, що рівна швидкості світла. Проте, якщо якийсь спостерігач з Альфи Кентавра віддаляється від Землі з майже світловою швидкістю, йому здаватиметься, що Б (відкриття Конгресу) станеться до події А — стометрівки. Згідно з теорією відносності, закони фізики здаються однаковими для спостерігачів, що рухаються з різними швидкостями.

Вона добре підтверджена експериментами і, певно, залишиться якась її особливість, навіть якщо ми знайдемо досконалішу теорію на заміну теорії відносності. Тому рухомий спостерігач сказав би, що якщо подорож з надсвітловою швидкістю можлива, то повинна бути змога дістатися від події Б, відкриття конгресу, до А, бігу на сто метрів. А якщо хтось рухався трохи швидше, то міг би навіть дістатися ще до бігу і зробити ставку на нього, точно знаючи, хто переможе.

²⁸ Переклад Юлії Джугастрянської. — *Прим. ред.*

Та є проблема з подоланням світлового бар'єру. Згідно з теорією відносності, тяга ракетного двигуна, необхідна для пришвидшення космічного корабля, стає все більша й більша, що більше він наближається до швидкості світла. І в нас є експериментальні докази щодо цього, проте не завдяки космічним кораблям, а елементарним частинкам у пришвидчувачах частинок, на кшталт тих, що у Фермілабі (лабораторії Фермі) чи ЦЕРНі (Європейському центрі ядерних досліджень). Ми можемо пришвидшувати частинки до 99,99 відсотка від швидкості світла, та хоч скільки б ми додавали енергії, вони не можуть подолати світловий бар'єр. Те ж саме з космічними кораблями: хоч би яка велика була ракетна тяга, швидше за світло розігнатись вони не можуть.

Це, як видається, унеможливорює швидкі космічні подорожі та подорожі в часі. Однак є, можливо, вихід. Можливо, простір-час можна викривити так, щоб був найкоротший шлях між А і Б. Один із способів — створити червоточину між А і Б. Як впливає з назви, червоточина — це тонка трубка простору-часу, яка може з'єднувати дві майже плоскі області, далекі одна від одної.

Не повинно бути ніякого зв'язку між відстанню через червоточину і віддаленістю її кінців у майже плоскому фоні. Уявіть собі, що можна було б створити чи знайти червоточину, яка б вела з околу Сонцевої системи до Альфи Кентавра. Відстань через червоточину могла б бути лише кілька мільйонів миль, хоча у звичайному просторі між Землею та Альфою Кентавра двадцять трильйонів миль. Це дозволило б новині про стометровий забіг прийти до відкриття конгресу. Але тоді спостерігач, що рухається в напрямку Землі, також повинен бути в змозі знайти іншу червоточину, яка б дозволила йому дістатися від відкриття конгресу на Альфі Кентавра на Землю ще до початку бігу. Так червоточини, як і будь-які інші можливі форми надсвітлових подорожей, уможливили б подорожі у минуле.

Ідея червоточин між різними областями простору-часу — не вигадка письменників-фантастів, а походить з дуже поважних джерел.

У 1935 році Айнштайн та Натан Розен написали статтю, в якій вони показали, що загальною теорією відносності дозволені “мости”, як вони це назвали, що нині відомі як червоточини.

Мости Айнштайна — Розена для космічного корабля тривають не досить довго, щоб пройти через них: він попаде в сингулярність, через те що червоточина б стягнулась. Хоча висловлено припущення, що розвинена цивілізація змогла б утримувати червоточину відкритою. Щоб це зробити, або викривити простір-час якимсь іншим способом для уможливлення подорожі в часі, можна показати, що потрібна область простору-часу з від'ємною кривиною, як поверхня сідла. Звичайна матерія, що має позитивну густину енергії, забезпечує просторові-часові позитивну кривину, як у поверхні сфери. Тож для того, щоб викривити простір-час якимсь способом, що дозволить подорожувати у минуле, потрібна матерія з негативною густиною енергії.

Енергія трохи схожа на гроші: якщо у вас позитивний рахунок, ви можете витрачати його як заманеться, та згідно з класичними законами, яким вірили на початку минулого століття, вийти в мінус вам не дозволили б. Отже, ці класичні закони унеможливили б будь-які подорожі в часі. Та як написано у попередніх розділах, класичні закони були замінені квантовими, основаними на принципі невизначеності. Квантові закони ліберальніші і дозволяють перевищувати один чи два рахунки, за умови, якщо загальний баланс позитивний. Іншими словами, квантова теорія дозволяє від'ємну густину енергії в деяких місцях, за умови, що це буде надолужене додатними густинами енергії в інших, так що повна енергія залишається додатною. Прикладом того, як квантова теорія дозволяє від'ємну густину енергії, служить так званий Казимирів ефект. Як ми бачили в розділі 7, навіть той, що ми вважаємо “порожнім”, простір заповнений парами віртуальних частинок і античастинок, які разом появляються, розходяться, знову зближаються і анігілюють одна з одною. Припустімо тепер, що є дві паралельні металеві пластини на невеликій відстані одна від одної. Пластини будуть своєрідними дзеркалами для віртуальних фотонів або частинок світла. Насправді між ними утворюється порожнина, трохи схожа на органну трубу, яка резонуватиме лише на певних нотах. Це означає, що віртуальні фотони можуть траплятися у просторі між пластинами, лише якщо довжини їхніх хвиль (відстань між сусідніми гребнями будь-якої хвилі) у проміжку між пластинами вміщатимуться ціле число разів. Якщо ж у цьому проміжку вміс-

титься хоч на частку довжини хвилі більше, то після декількох відбиттів між пластинами, гребені однієї хвилі збігатимуться з западинами інших і хвилі будуть взаємознищуватися.

Між пластинами буде менше віртуальних фотонів, адже там вони можуть мати лише резонансні довжини хвиль, на відміну від області поза пластинами, де віртуальні фотони можуть мати будь-яку довжину. Тому буде трохи менше віртуальних фотонів ударятися об внутрішні поверхні пластин, ніж об зовнішні. Отже, можна припустити наявність сили, що діє на пластини, штовхаючи їх одна до одної. Ця сила насправді була виявлена і має передбачену величину. Тож у нас є експериментальні докази того, що віртуальні частинки існують і спричиняють реальний ефект.

Те, що між пластинами фотонів менше, означає, що густина їхньої енергії там буде менша, ніж в іншому місці. Але густина повної енергії в “порожньому” просторі далеко від пластин має дорівнювати нулеві, бо інакше густина енергії викривлятиме простір і він не буде майже плоский. Тож якщо густина енергії між пластинами менша, ніж густина енергії десь далеко, то вона мусить бути від’ємна.

Отже, маємо експериментальні докази того, що і простір-час може бути викривлений (виходячи з викривлення світлових променів під час затемнення), і що він може бути викривлений способом, необхідним, щоб уможливити подорож у часі (виходячи з ефекту Казимира). Можна було б тому сподіватися, що в міру нашого наукового та технологічного просування ми зрештою спроможемося збудувати машину часу. Але якщо це так, чого ж ніхто з майбутнього досі не появився і не розповів нам, як її збудувати? Тут можуть бути вагомі причини, чому було б нерозумно відкривати нам секрет подорожі в часі на нашому нинішньому примітивному рівні розвитку, але якщо тільки людська природа не змінюється радикально, важко повірити, що ніякий гість з майбутнього досі не проговорився. Звісно, хтось скаже, що випадки спостереження НЛО — це докази того, що нас в той час відвідали або інопланетяни, або люди з майбутнього. (Якщо інопланетяни дісталися сюди в розумні терміни, вони також мали летіти швидше за світло, тому обидві можливості еквівалентні).

Однак, на мою думку, будь-який візит інопланетян або людей з майбутнього буде набагато очевидніший та, можливо, на-

багато неприємніший. Якщо вони прибувають, щоб відкритися усім, то чому ж з'являються лише тим, хто не вважається надійним свідком? Якщо вони намагаються попередити нас про якусь велику небезпеку, то вони не дуже ефективні.

Можна пояснити відсутність гостей з майбутнього тим, що минуле зафіксоване, бо ми його спостерігали і бачили, що воно не має викривлення, необхідного, щоб уможливити подорожі з майбутнього. З іншого боку, майбутнє невідоме та відкрите, так що, цілком можливо, воно має потрібне викривлення. Це означає, що будь які подорожі в часі обмежуються подорожами у майбутнє. У капітана Кірка та зорелета «Ентерпрайз» не було б жодного шансу з'явитися в теперішній час.

Це може пояснити те, що нас ще не заповнили туристи з майбутнього, але не допоможе уникнути проблем, які виникнуть, якщо можна було б повертатися назад і змінювати історію. Припустімо, наприклад, ви повернулися і вбили свого прапрапрадідуся, коли він ще був дитиною. Існує багато версій цього парадоксу, та всі вони по суті еквівалентні: якби було вільно змінювати минуле, виникнуть суперечності.

Тут, видається, є два можливих розв'язання парадоксів, пов'язаних з подорожами в часі. Перший я назву підхід несуперечливих історій. Йдеться про те, що навіть якщо простір-час викривлений так, що буде можливо подорожувати в минуле, те, що відбувається в просторі-часі, має бути несуперечливим наслідком фізичних законів. Відповідно до цього погляду, ви не могли б повернутися в часі, хіба що історія засвідчила, що ви вже поверталися у минуле, й, коли були там, не вбили свого прапрапрадідуся чи не скоїли інших дій, що суперечили б вашій теперішній ситуації. Ба більше, коли б ви поверталися, то не були б у змозі змінити записану історію. Це означає, що ви не матимете свободи волі робити те, що хочете. Звісно, можна сказати, що свобода волі однаково ілюзія. Якщо існує повна єдина теорія, яка керує всім, вона вочевидь визначає також ваші дії. Та працює вона в певному сенсі так, що порахувати для такого складного організму, як людина, неможливо. Тому ми говоримо, що люди мають свободу волі, бо ми не можемо передбачити, що вони будуть робити. Однак, якщо людина вирушає на ракетному кораблі й повертається ще до того, як відлетіла, ми зможемо передбачити, що він чи

вона робитиме, бо це буде частина записаної історії. Отже, в цьому разі мандрівник у часі не матиме свободи волі.

Інший можливий спосіб розв'язання парадоксів подорожей у часі можна назвати гіпотезою альтернативної історії. Ідея полягає в тому, що коли мандрівники в часі повертаються у минуле, вони вводять альтернативну історію, яка відрізняється від записаної. Так вони можуть діяти вільно, без обмежень, не суперечачи своїй попередній історії. Стівен Спілберг повеселився з цим поняттям у фільмах «Назад у майбутнє»: Марті Макфлай зміг повернутися у минуле і змінити історію батькового женіння на краще.

Гіпотеза альтернативної історії скидається швидше на спосіб формулювання квантової теорії Річарда Файнмена як суми за історіями, описаний у розділах 4 і 8. Йдеться про те, що Всесвіт не мав лише єдину історію, швидше він мав будь-яку можливу історію, кожна з яких зі своєю власною ймовірністю. Однак тут, видається, є суттєва відмінність між пропозицією Файнмена та альтернативними історіями. У Файнменовій сумі кожна історія містить у собі повний простір-час і все в ньому. Цей простір-час може бути такий викривлений, що можливо подорожувати ракетою у минуле. Та ракета при цьому залишиться в тому ж просторі-часі й у тій же історії, яка буде несуперечлива. Отже, Файнменова сума за історіями, видається, підтримує гіпотезу несуперечливих історій, ніж альтернативних.

Файнменова сума за історіями дозволяє подорожувати в минуле на мікроскопічному рівні. У розділі 9 ми вже бачили, що закони науки незмінні в результаті комбінацій операцій C , P і T . Це означає, що обертання античастинки проти годинникової стрілки і переміщення від A до B можна також розглядати як обертання звичайної частинки за годинниковою стрілкою і переміщення назад у часі від B до A . Так само, звичайна частинка, що рухається вперед у часі, еквівалентна античастинці, що рухається назад у часі. Як уже йшлося в цьому розділі та в розділі 7, «порожній» простір заповнений парами віртуальних частинок і античастинок, що разом появляються, розходяться, знову зближуються й анігілюють одна з одною.

Тому можна вважати пару частинок як одну частинку, що рухається по замкненій петлі у просторі-часі. Коли пара рухаєть-

ся вперед у часі (від моменту, коли вона з'являється, до моменту, коли анігілює), вона називається частинкою. Але коли частинка рухається назад у часі (від моменту, коли пара анігілює, до моменту, коли вона з'являється), це так звана античастинка, що рухається вперед у часі.

Поясненням того, як чорні діри можуть випускати частинки і проміння (даним у розділі 7), було те, що один з членів віртуальної пари частинка-античастинка (скажімо античастинка) може впасти в чорну діру, залишаючи іншого члена пари, з яким анігілює, без партнера. Покинута частинка також може впасти в діру, але може також покинути окіл чорної діри. У такому разі віддаленому спостерігачеві здається, що частинка випромінена чорною дірою.

Можна, однак, допускати інше, але еквівалентне інтуїтивне зображення механізму випромінювання з чорних дір. Можна вважати партнера з віртуальної пари, що впав у чорну діру (скажімо, античастинку) як частинку, що рухається назад у часі з діри. І коли вона потрапляє в точку, в якій виникла віртуальна пара частинка-античастинка, вона розсіюється гравітаційним полем в частинку, що тепер рухається вперед у часі й покидає чорну діру. Якщо ж, натомість, вона була партнером частинки з віртуальної пари, що впала в діру, можна було б розглядати її як античастинку, що рухається назад у часі й виходить з чорної діри. Отже, випромінювання чорних дір свідчить, що квантова теорія дозволяє подорожі назад у часі на мікроскопічному рівні і, що така подорож у часі може створити спостережні ефекти.

Тому може виникнути питання: чи уможливило квантова теорія подорожі в часі у макроскопічному масштабі, які людина могла б використовувати? На перший погляд, здається, що так. Файнманова пропозиція суми за історіями передбачає — за всіма історіями. Отже, вона повинна містити історії, в яких простір-час такий викривлений, що можливо подорожувати у минуле. Чому ж ми тоді не маємо негараздів з історією? Припустімо, наприклад, хтось повернувся і відкрив нацистам секрет атомної бомби.

Цих проблем можна уникнути, якщо чинне припущення хронологічного захисту, за яким фізичні закони “змовляються”, щоб запобігти перенесенню інформації у минуле макроскопіч-

ними тілами. Як і припущення космічної цензури, воно не доведене, та є підстави вважати, що воно правдиве.

Така підстава вважати, що хронологічний захист працює, полягає в тому, що коли простір-час викривлений достатньо, щоб уможливити подорож у минуле, віртуальні частинки, що рухаються замкненими петлями у просторі-часі, можуть стати реальними частинками, що рухаються уперед у часі зі швидкістю рівною або меншою від швидкості світла. Позаяк ці частинки можуть рухатися петлями скільки завгодно часу, вони проходять кожну точку шляху багато разів. Таким чином їхня енергія лічена знову і знову і її густина стане дуже велика. Це може надати просторові-часові позитивну кривину, що унеможливило подорожі в минуле. Ще не зовсім зрозуміло: ці частинки спричинять позитивну, чи негативну кривину, чи кривина, спричинена якимсь видом віртуальних частинок скомпенсує кривину, спричинену іншим видом. Тому можливість подорожей у часі залишається відкритою. Та я не буду закладатись на неї. Мій опонент може мати несправедливу перевагу, знаючи майбутнє.

Розділ 11

ОБ'ЄДНАННЯ ФІЗИКИ

У розділі 1 пояснено, що було б дуже важко побудувати повну єдину теорію всього у Всесвіті всю за раз. Замість цього ми добилися прогресу, створюючи часткові теорії, що описують обмежене коло подій, і нехтуючи іншими ефектами або апроксимуючи їх певними числами. (Хемія, наприклад, дозволяє обчислювати взаємодії атомів, не знаючи внутрішньої будови ядра атома.) Хоча врешті можна було б сподіватися, що буде знайдена повна, послідовна та єдина теорія, яка охопила б усі ці часткові теорії як наближення, та яку не потрібно було б коригувати, щоб відповідала фактам, підбираючи значення певних довільних чисел у теорії. Робота над створенням такої теорії називається «об'єднанням фізики». Більшу частину своїх останніх років життя Айнштайн витратив на безуспішні пошуки єдиної теорії. Але час тоді ще не настав: існували часткові теорії для гравітації та електромагнетних сил, але дуже мало було відомо про ядерні сили. Крім того, Айнштайн відмовлявся вірити у реальність квантової механіки, попри важливу роль, яку він зіграв в її розвитку. І все ж здається, що принцип невизначеності — це фундаментальна властивість Всесвіту, в якому ми живемо, а тому цей принцип обов'язково повинен бути складником успішної єдиної теорії.

Читаючи далі, ви зрозумієте, що перспективи побудови такої теорії тепер здаються набагато кращими, адже ми знаємо набагато більше про Всесвіт. Однак ми повинні остерігатися надмірної самовпевненості, адже і раніше ми мали оманні надії! На початку минулого століття, наприклад, вважали, що все можливо пояснити в термінах властивостей неперервної матерії, таких як еластичність і теплопровідність. Відкриття атомної структури та принципу невизначеності поклали цьому рі-

шучий край. Хоча 1928 року фізик, лавреат Нобелівської премії Макс Борн сказав групі відвідувачів Гетингенського університету: «Фізика, як ми її знаємо, зникне протягом шести місяців». Його впевненість була основана на недавньому Дираковому відкритті рівняння для електрона. Вважали, що подібне рівняння повинне існувати і для протона, що був єдиною відомою в той час іншою частинкою, і це стане кінцем теоретичної фізики. Проте відкриття нейтрона і ядерних сил розбили й ці передбачення. Сказавши це, я, як і раніше, вважаю, що є підстави для обережного оптимізму, що ми тепер, можливо, ближчі до завершення пошуків кінцевих законів природи.

У попередніх розділах я говорив про загальну теорію відносності, яка являє собою часткову теорію гравітації, і про часткові теорії, що визначають слабкі, сильні й електромагнетні сили. Останні три можуть бути об'єднані в так званих теоріях великого об'єднання, або ТВО, що не дуже задовільні, адже вони не охоплюють гравітації і містять низку величин на кшталт відносних мас різних частинок, які не можуть бути передбачені з теорії, а мають бути підібрані, щоб допасувати експерименти. Основна трудність у побудові теорії, яка об'єднувала б гравітацію з іншими силами, в тому, що загальна теорія відносності — класична теорія, тобто не містить у собі принцип невизначеності квантової механіки. З іншого боку, інші часткові теорії істотно пов'язані з квантовою механікою. Тому передусім загальну теорію відносності необхідно об'єднати з принципом невизначеності. Як ми бачили, це може дати деякі дивовижні наслідки: чорні діри не чорні, а Всесвіт не має жодної сингулярності, зате повністю замкнений і без меж. Проблема в тому, як уже описано в розділі 7, що, з огляду на принцип невизначеності, навіть «попорожній» простір заповнений парами віртуальних частинок і античастинок. Ці пари матимуть нескінченну енергію, а тому, відповідно до знаменитого рівняння Айнштейна $E = mc^2$, вони матимуть нескінченну кількість маси. Отже, їхнє гравітаційне притягання викривлятиме Всесвіт до нескінченно малого розміру.

Досить схоже позірно абсурдні нескінченності виникають і в інших часткових теоріях, але в усіх цих випадках їх можна усунути шляхом так званого перенормування, що полягає у взаємному знищенні цих нескінченностей через введення інших.

Хоча цей метод досить сумнівний математично, він, здається, успішно застосовується на практиці, й отримані з його допомогою передбачення цих теорій надзвичайно точно узгоджуються з результатами спостережень. Проте з погляду пошуку повної теорії метод перенормувань має один серйозний недолік, бо він означає, що фактичні значення мас та інтенсивностей сил не можуть бути передбачені з теорії; їх доводиться підбирати шляхом припасування до експериментів.

При спробах охопити принцип невизначеності загальною теорією відносності є тільки дві величини, які можливо регулювати: гравітаційна сила і значення космологічної константи. Але їх регулювання недосить, щоб усунути всі нескінченності. Тому ми маємо теорію, яка, видається, передбачає, що деякі величини, наприклад кривина простору-часу, дійсно нескінченні, але ці величини можуть бути спостережені й виміряні, дорівнюючи цілком скінченним! Ця проблема щодо об'єднання загальної теорії відносності з принципом невизначеності деякий час піддавалась сумнівам, але врешті, 1972 року, була підтверджена детальними розрахунками. Через чотири роки запропоновано один з можливих її розв'язків, названий «супергравітацією». Ідея полягала в тому, щоб об'єднати гравітон (частинку зі спіном 2, носія гравітаційної сили) з деякими іншими частинками зі спінами $3/2$, 1 , $1/2$ і 0 . Тоді всі ці частинки в якомусь сенсі можна було б розглядати як різні сторони однієї і тієї ж «суперчастинки», об'єднуючи таким чином частинки матерії зі спінами $1/2$ і $3/2$, з частинками — носіями сили, спіни яких рівні 0 , 1 і 2 . Віртуальні пари частинка-античастинка зі спіном $1/2$ і $3/2$ матимуть при цьому від'ємну енергію, і так звичайно компенсують додатну енергію віртуальних пар зі спіном 2 , 1 , 0 . Це може скомпенсувати багато можливих нескінченностей, але була підозра, що деякі з них, можливо, все ще залишаються. Однак такі розрахунки, необхідні, щоб з'ясувати, чи насправді які-небудь нескінченності залишилися нескороченими, були такі довгі та складні, що ніхто не був готовий взятися за них. За попередніми оцінками, навіть за допомогою комп'ютера це зайняло б щонайменше чотири роки, і при цьому дуже велика ймовірність хоч раз помилитися, а то й більше. Так можна було б з'ясувати правильну відповідь,

лише якщо хтось інший повторив би всі розрахунки й отримав той же результат, а це не видається вельми ймовірним!

Попри всі ці проблеми й те, що частинки в теоріях супергравітації, видавалося, не відповідають спостережуваним частинкам, більшість науковців уважала, що супергравітація, можливо, правильна відповідь на проблему об'єднання фізики. Здавалося, це найкращий спосіб об'єднання гравітації з іншими силами. Та 1984 року відбулася помітна зміна думки на користь так званих теорій струн. Основні об'єкти цих теорій не частинки, що займають єдину точку в просторі, а елементи, які мають довжину, але без інших вимірів, на зразок нескінченно тонких шматочків струни. Ці струни можуть мати кінці (так звані відкриті струни), або вони можуть бути з'єднані між собою в замкнені петлі (замкнені струни) (рис. 11.1 і 11.2). Частинка у кожен момент часу займає одну точку в просторі. Отже, її історія може бути подана лінією у просторі-часі («світОВОЮ лінією»). Струна, з іншого боку, в кожен момент часу займає в просторі лінію. Отже, її історія у просторі-часі — двовимірна поверхня, яка називається світовим листом. (Будь-яку точку на такому світовому листі можна задати двома величинами, одна з яких — час, а інша — положення точки на струні). Світовий лист відкритої струни являє собою смугу, краї якої позначають траєкторію у просторі-часі кінців струни (рис. 11.1). Світовий лист замкненої струни являє собою циліндр або трубку (рис. 11.2), який-небудь зріз трубки — коло, що подає положення струни в кожному конкретний момент часу.

Дві частини струни можуть з'єднатися в одну струну; у разі відкритих струн вони просто з'єднуються кінцями (рис. 11.3), тоді як у разі замкнених струн це схоже на з'єднання двох штапів (рис. 11.4). Аналогічно, частина струни може поділитися на дві струни. Те, що раніше розглядали як частинки, в теоріях струн тепер зображають як хвилі, що біжать по струні, подібно до хвиль на коливній мотузці повітряного змія. Випромінення чи поглинання однієї частинки іншою відповідає розділенню чи об'єднанню струн. Наприклад, гравітаційну силу, з якою Сонце діє на Землю, у теоріях частинок зображували як результат випускання гравітона частинкою на Сонці і його поглинання частинкою на Землі (рис. 11.5). У теорії струн цей процес відпові-

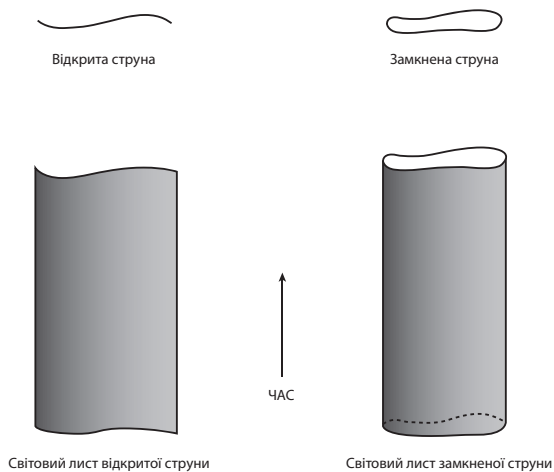


Рис. 11.1. та 11.2.

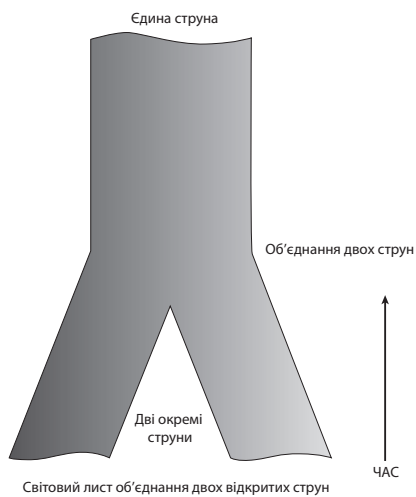


Рис. 11.3.

дає Н-подібній трубці (рис. 11.6). (Теорія струн в якомусь сенсі подібна до водогону). Дві вертикальні частини «Н» відповідають частинкам на Сонці та на Землі, а горизонтальна поперечина відповідає гравітону, що рухається між ними.

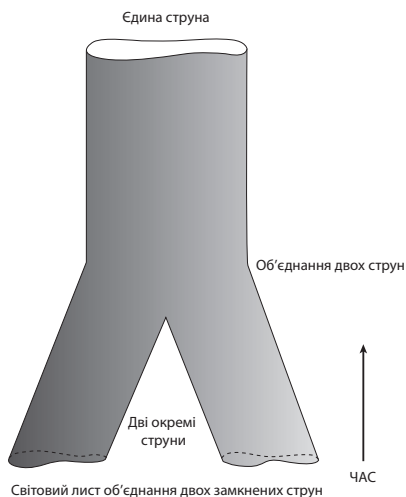


Рис. 11.4.

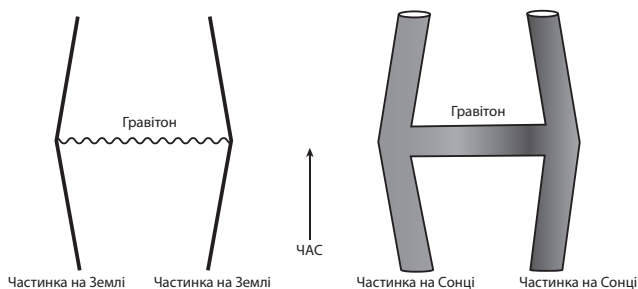


Рис. 11.5. та 11.6.

Теорія струн має цікаву історію. Вона виникла наприкінці шістдесятих років при спробі побудувати теорію сильної сили. Ідея полягала в тому, що частинки як протон і нейтрон можна роз-

глядати як хвилі на струні. Тоді сильні сили між частинками відповідатимуть частинам струн, що з'єднують між собою, як у павутині, інші шматки струн. У рамках цієї теорії, щоб давати спостережувані значення сильної сили між частинками, струни мали бути як гумові стрічки, натягнуті з силою близько десяти тон.

1974 року парижанин Джоель Шерк і Джон Шварц із Каліфорнійського технологічного інституту опублікували роботу, в якій показали, що теорія струн може описувати гравітаційну силу, але тільки при значно більшому натягові струни — близько тисячі мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з тридцятьма дев'ятьма нулями) тон. На звичайних масштабах передбачення теорії струн і загальної теорії відносності такі самі, але вони різні на дуже малих відстанях, менших від однієї тисячамільйонмільйонмільйонмільйонмільйонної частки сантиметра (один сантиметр, поділений на одиницю з тридцятьма трьома нулями). Однак їхня робота не привернула особливої уваги, бо десь в той час більшість відмовилася від початкової струнної теорії для сильної сили, віддавши перевагу теорії кварків і глюонів, результати якої, видавалося, значно краще узгоджувалися з експериментом. Шерк помер при трагічних обставинах (у нього був діабет, і він впав у кому, коли поруч не виявилось нікого, хто б зробив йому ін'єкцію інсуліну). Так Шварц залишився сам, як чи не єдиний прихильник теорії струн, але тепер зі значно вищою запропонованою величиною натягу струни.

1984 року інтерес до струн несподівано відродився, певно, через дві причини. По-перше, ніхто не досяг великого поступу, намагаючись показати, що супергравітація скінченна або що з її допомогою можна пояснити існування тих видів частинок, які ми спостерігаємо. Другою причиною була публікація статті Джона Шварца і Майка Грина з Лондонського коледжу Куїн Мері, в якій показано, що за допомогою теорії струн можна пояснити існування частинок з внутрішньою лівообертовістю, як у деяких спостережуваних частинок. Та хоч би які були причини, незабаром велика кількість науковців почала працювати над теорією струн, і була розроблена нова версія — теорія так званої гетеротичної струни, яка, здавалося, наче могла пояснити ті види частинок, що ми спостерігаємо.

У теоріях струн теж виникають нескінченності, але є підстави вважати, що всі вони будуть взаємно компенсуватися у версіях подібних до гетеротичної струни (хоча достеменно це ще невідомо). Струнні теорії, однак, мають велику проблему: вони, видається, несуперечливі, тільки якщо простір-час має десять чи двадцять шість вимірів, замість звичайних чотирьох! Звісно, додаткові виміри простору-часу — це загальник у науковій фантастиці; вони забезпечують ідеальний спосіб подолання звичних обмежень загальної теорії відносності — те, що неможливо рухатися швидше за світло або назад у часі (див. розділ 10). Ідея полягає в тому, щоб зрізати шлях через додаткові виміри. Це можна подати так. Уявіть собі, що простір, в якому ми живемо, має тільки два виміри і викривлений, як кільцева поверхня, або тор (рис. 11.7). Якби ви були на одному боці внутрішнього краю тора і хотіли б потрапити в точку на іншому боці, то вам довелося б обійти по внутрішньому краю тора. А якби ви вміли переміщатися в третьому вимірі, то могли б зрізати, пішовши навпростець.

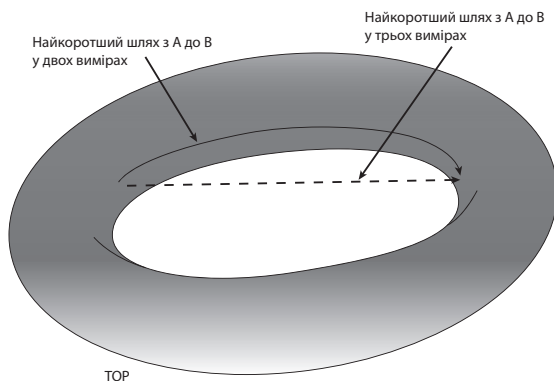


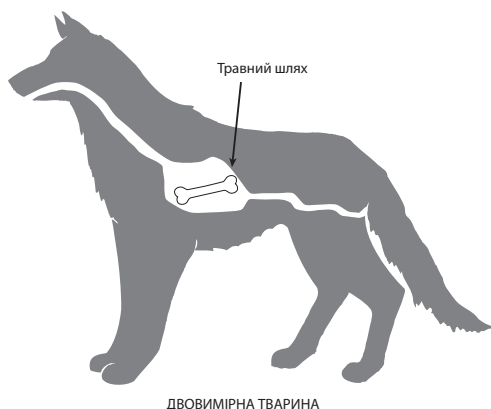
Рис. 11.7.

Чому ж ми не помічаємо всіх цих додаткових вимірів, якщо вони дійсно існують? Чому ми бачимо тільки три просторових і один часовий виміри? Можливо, причина криється в тому, що інші виміри згорнені в дуже маленький простір розміром десь як

одна мільйонмільйонмільйонмільйонмільйонна частка дюйма. Це так мало, що ми просто нічого не помічаємо: ми бачимо всього лише один часовий і три просторових виміри, в яких простір-час виглядає досить плоским. Це схоже на поверхню соломинки. Придивившись до неї, можна побачити, що вона двовимір-на (розташування точки на соломинці описується двома величинами: відстанню вздовж соломинки та відстанню по колу). Та якщо подивитись на неї здалеку, то не побачите її товщини, вона виглядатиме одновимірною (положення точки на соломинці описуватиметься тільки відстанню вздовж соломинки). Так само і з простором-часом: на дуже малих масштабах він десяти-вимірний і дуже викривлений, але на великих масштабах ви не бачите викривлення чи додаткових вимірів. Якщо це уявлення правильне, то воно несе погані вісті потенційним космічним мандрівникам: додаткові виміри будуть занадто малі для проходу космічного корабля. Але виникає й інша серйозна проблема. Чому лише деякі, а не всі виміри згорнені в маленьку кульку? Очевидно, що в дуже ранньому Всесвіті всі виміри були сильно викривлені. Чому ж один часовий і три просторові виміри вирівнялися, а всі інші залишаються сильно згорненими?

Одна з можливих відповідей — антропний принцип. Двох просторових вимірів, вочевидь, недостатньо для того, щоб могли розвиватися такі складні істоти, як ми. Живучи, наприклад, на одновимірній Землі, двовимірні тварини, щоб розійтись при зустрічі, були б змушені перелазити одна через одну. Якби двовимір-на істота з'їдала щось, то не змогла б перетравити їжу повністю. Її залишки виводилися б тим же шляхом, яким їжа поглиналася. Адже якби був наскрізний прохід через все тіло, то тварина виявилася б розділеною на дві окремі половини — і наша двовимір-на істота розвалилася б (рис. 11.8). Точно так само важко уявити собі, як у двовимірної істоти відбувався б кровообіг.

Також будуть проблеми з більш ніж трьома просторовими вимірами. Гравітаційна сила між двома тілами швидше зменшуватиметься з відстанню, ніж у тривимірному просторі. (У трьох вимірах, коли відстань подвоюється, то гравітаційна сила зменшується в $1/4$ разу, у чотирьох вимірах — у $1/5$ разу, у п'яти — у $1/6$ разу і т. д.). Це означає, що орбіти планет, як Земля, що обертаються навколо Сонця, були б нестабільні: найменше від-

*Рис. 11.8.*

хилення від кругової орбіти (що виникло б, наприклад, через гравітаційне притягання інших планет) привело б до того, що Земля стала б рухатися по спіралі до або від Сонця. Ми або замерзли б, або згоріли. Насправді така сама залежність гравітаційної сили від відстані більш ніж у трьох просторових вимірах означає, що Сонце не могло б існувати в стабільному стані завдяки зрівноваженню тиску гравітацією. Воно або розпалося б на частини, або сколапсувало, перетворившись на чорну діру. У будь-якому разі від нього вже було б мало користі як від джерела тепла і світла для життя на Землі. У менших масштабах електричні сили, під дією яких електрони рухаються в атомі навколо ядра, вели б себе так само, як гравітаційні. Отже, електрони або покинули б атом, або по спіралі рухались би в ядро. У кожному разі не було б знайомих нам атомів.

Тому здається очевидним, що життя, принаймні, яке ми знаємо, може існувати лише в областях простору-часу, в яких один часовий і три просторові виміри не занадто згорнені. Це означає, що можна було б покликатися на слабкий антропний принцип, якщо можна було б показати, що теорія струн принаймні дозволяє (а вона, видається, й дійсно це робить) існування у Всесвіті таких областей. Цілком можуть існувати й інші області Всесвіту або інші всесвіти (хоч що б під цим малося на увазі), в яких

або всі виміри згорнені й малих розмірів, або в яких більш як чотири виміри майже плоскі, але в таких областях не буде розумних істот, щоб спостерігати цю різну кількість ефективних вимірів.

Ще одна проблема полягає в тому, що є принаймні чотири різні теорії струн (відкритих струн і три різні теорії замкнених струн) та мільйони способів, якими додаткові виміри, передбачені теорією струн, можуть бути згорнені. Чому має бути підібрана тільки одна теорія струн та один варіант згорнення? Протягом деякого часу відповіді на це питання не було і прогрес зупинився. Потім, приблизно з 1994 року, науковці почали відкривати так звані дуальності: різні теорії струн і різні способи згорнення додаткових вимірів можуть привести до однакових результатів у чотирьох вимірах. Крім того, разом з частинками, які займають одну точку простору, і струнами як лініями, були виявлені й інші об'єкти, так звані p -брани, що зайняли двовимірні чи вищевимірні об'єми в просторі. (Частинку можна розглядати як 0 -брану, а струну — як 1 -брани, але були й p -брани при p від 2 до 9 .) Це, вочевидь, вказує на свого роду демократію серед теорій супергравітації, струн та p -бран: видається, вони підходять одна до одної, але ніяк не можна сказати, що якась фундаментальніша за іншу. Вони справляють враження різних наближень до якоїсь фундаментальної теорії, що істинні в різних ситуаціях.

Науковці вели пошук основної теорії, хоча й досі без жодного успіху. Проте я вважаю, що не може бути ніякого єдиного формулювання фундаментальної теорії, не більш ніж, як показав Гедель, можна сформулювати арифметику за допомогою єдиного набору аксіом. Замість цього, вона може бути на зразок карти — неможливо використовувати одну карту для опису поверхні Землі або тора: потрібно щонайменше дві карти у разі Землі, і чотири — для тора, щоб охопити кожну точку. Кожна з них дійсна тільки в обмеженій області, але різні карти матимуть область перекриття. Набір карт забезпечує повний опис поверхні. Аналогічним чином, у фізиці може бути необхідно використовувати різні формулювання в різних ситуаціях, але два різні формулювання узгодяться між собою в ситуаціях, коли вони обидва можуть бути застосовні. Сукупність різних формулювань можна розглядати як повну єдину теорію, хоча й таку, що не може бути виражена за допомогою єдиного набору постулатів.

Але чи може бути єдина теорія насправді? Чи ми, можливо, просто ганяємося за міражем? Тут, видається, є три можливості:

1. Повна єдина теорія (або набір перетинних формулювань) дійсно існує, і ми її коли-небудь відкриємо, якщо достатньо розумні.
2. Кінцевої теорії Всесвіту немає, а є просто нескінченна послідовність теорій, що описують Всесвіт дедалі точніше.
3. Теорії Всесвіту нема; події неможливо передбачити після певної межі, вони відбуваються випадково і довільно.

На користь третього варіанту деякі висувають той аргумент, що якби був повний набір законів, це посягати на свободу Бога змінювати свою думку і втручатися в наш світ. Це трохи схоже на старий парадокс: чи може Бог створити такий важкий камінь, який Він сам не зможе підняти? Але така ідея, що Бог, може захотіти змінити свою думку, — це приклад помилки, на яку вказав ще Святий Августин — уявляти собі Бога як істоту, що живе в часі; час же — властивість тільки Всесвіту, що створений Богом. Створюючи Всесвіт, Бог, певно, знав, що мав на меті!

З появою квантової механіки ми дійшли розуміння того, що події неможливо передбачити з абсолютною точністю, а завжди є певний ступінь невизначеності. Якщо маєте бажання, цю невизначеність можна було б приписати втручанням Бога, але це буде дуже дивний вид втручання: немає доказів, що воно має хоча б якусь мету. Справді, якби воно було, то вже за означенням не буде випадкове. В теперішній час ми по суті усунули третій вищевказаний можливий варіант, переозначивши мету науки: розробити систему законів, що давала б змогу передбачати події тільки до межі, встановленої принципом невизначеності.

Друга можливість, пов'язана з існуванням нескінченної послідовності все точніших теорій, поки цілком узгоджується з нашим досвідом. У багатьох випадках ми підвищували чутливість апаратури або створювали експерименти нового типу лише для того, щоб відкрити нові явища, які ще не були передбачені чинною теорією, і щоб врахувати їх доводилося створювати досконалішу теорію. Тому не буде нічого дивного, якщо виявиться хибним припущення, зроблене в рамках сучасних теорій великого об'єднання, про те, що нічого принципово нового не відбудеться в проміжку від енергії електрослабкого об'єднання,

десь 100 GeV, до енергії великого об'єднання, десь квадрильйон (10^{15}) GeV. Насправді ми могли б очікувати, що будуть відкриті нові шари структури, елементарніші, ніж кварки й електрони, яких ми тепер розглядаємо як «елементарні» частинки.

Але, схоже, що гравітація може накласти обмеження на цю послідовність вкладених одна в одну «коробок». Якби існувала частинка з енергією вищою за так звану Планкову енергію, десять мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з дев'ятнадцятьма нулями) GeV, то її маса була б така сконцентрована, що частинка відріже саму себе від решти Всесвіту і утворить маленьку чорну діру. Отже, видається, що послідовність усе точніших теорій повинна мати межу при переході до все вищих енергій, тому має бути якась кінцева теорія Всесвіту. Звісно, Планкова енергія дуже далека від енергій близько сотні GeV — найбільше, що можна наразі досягти в лабораторії. Ми не подолаємо цей розрив на пришвидчувачах частинок в осяжному майбутньому! Хоча такі енергії, певно, виникали на дуже ранніх стадіях розвитку Всесвіту. Я вважаю, що вивчення раннього Всесвіту та вимоги математичної узгодженості приведуть нас до створення повної єдиної теорії ще за життя когось із нас, що живуть тепер, якщо, звичайно, ми до цього часу самі себе не підірвемо.

Що б це означало, якби ми дійсно знайшли кінцеву теорію Всесвіту? Як уже пояснено в розділі 1, ми ніколи не могли б бути цілком впевнені в тому, що знайшли дійсно правильну теорію, бо теорії не можна довести. Але якщо теорія була б математично несуперечлива і її передбачення завжди б збігалися зі спостереженнями, то ми могли б бути підставово певні, що вона правильна. Вона завершить довгий і дивовижний розділ в історії інтелектуальної боротьби людства, щоб зрозуміти Всесвіт. Крім того, вона зробить революційний переворот у розумінні звичайними людьми законів, що керують Всесвітом. У часи Ньютона освічена людина могла, принаймні в загальних рисах, зрозуміти весь обсяг людського знання. Але відтоді темпи наукового розвитку зробили це неможливим. Позаяк, щоб врахувати результати нових спостережень, теорії постійно змінюються, то їх ніколи належно не опрацьовують чи спрощують для того, щоб могли зрозуміти звичайні люди. Ви маєте бути фахівцем, та й тоді ви можете сподіватися на належне розуміння тільки невеликої

частини наукових теорій. Крім того, поступ такий швидкий, що все, чого навчають у школі чи університеті, завжди трохи застаріле. Лише мало хто може іти в ногу з швидким розширенням меж пізнання. Їм доводиться присвячувати цьому весь свій час і спеціалізуватися у вузькій сфері. Решта має слабе уявлення про прогрес, який досягається, чи емоції, які виникають. Якщо вірити Едингтонові, сімдесят років тому лише дві людини розуміли загальну теорію відносності. Тепер її знають десятки тисяч випускників університетів, і багато мільйонів людей принаймні знайомі з ідеєю. Якби була відкрита повна єдина теорія, то так само було б лише питанням часу, щоб вона була засвоєна та спрощена і викладалася в школах, принаймні в загальних рисах. Тоді всі змогли б дістати деяке уявлення про закони, що керують Всесвітом і відповідають за наше існування.

Якщо ми відкриємо повну єдину теорію, це не означатиме, що ми зможемо передбачати події загалом. На те є дві причини. Перша з них — обмеження, що принцип невизначеності квантової механіки встановлює для наших можливостей передбачати. Ми нічого не можемо зробити, щоб обійти його. На практиці, однак, перше обмеження не таке обмежувальне, як друге. Воно пов'язане з тим, що ми не могли розв'язувати рівняння теорії точно, за винятком дуже простих випадків. (Ми не в змозі точно розв'язати навіть рівняння руху трьох тіл у Ньютоновій теорії тяжіння, а труднощі зростають з кількістю тіл і складністю теорії). Ми вже знаємо ті закони, яким підкоряється поведінка матерії в усіх умовах, крім найекстремальніших. Зокрема, ми знаємо найважливіші закони, що лежать в основі всієї хемії та біології. Проте ми, звичайно ж, не зараховуємо ці науки до розв'язаних проблем: ми поки не досягли великих успіхів у передбаченні поведінки людини на основі математичних рівнянь! Тому, навіть якщо ми і знайдемо повну систему основних законів, перед нами на довгі роки вперед усе ще буде інтелектуально складне завдання розробити кращі наближені методи, за допомогою яких ми могли б успішно передбачати можливі результати в реальних і складних ситуаціях. Повна, несуперечлива, єдина теорія — це лише перший крок: наша мета — повне розуміння подій довкола нас і нашого власного існування.

Розділ 12

ВИСНОВОК

Світ, в якому ми перебуваємо, спантеличує. Нам хочеться зрозуміти те, що ми бачимо навколо, і спитати: яка природа Всесвіту? Яке наше місце в ньому і звідки він і ми взялися? Чому він такий, як є?

Щоб спробувати відповісти на ці питання, ми приймаємо деяку «картину світу». Картиною служить як нескінченна вежа з черепак, що підтримує плоску Землю, так і теорія суперструн. Обидві — теорії Всесвіту, але друга набагато математичніша і точніша, ніж перша. Обидвом теоріям бракує спостережених доказів: ніхто ніколи не бачив велетенської черепахи з Землею на спині, але й суперструн теж ніхто не бачив. Однак теорія з черепаками не може бути доброю науковою теорією, бо вона передбачає, що люди будуть здатні випадати через край світу. Це не узгоджується з досвідом, хіба що це виявиться, як припускають, поясненням зникнення людей в Бермудському трикутнику!

Найранніші теоретичні спроби описати та пояснити Всесвіт містили ідею, що подіями та природними явищами керують духи, що мають людські емоції і поведуться дуже схоже на людей і непередбачувано. Ці духи населяли природні об'єкти, наприклад річки та гори, і зокрема небесні тіла, як Сонце та Місяць. Їх треба було замирювати, а їхню прихильність завойовувати, щоб ґрунт був родючий і мінялись пори року. Але мало-помалу, мабуть, помітили, що існують деякі закономірності: Сонце завжди сходить на сході, й сідає на заході, незалежно від того, чи принесена жертва богам Сонця. Ба більше, Сонце, Місяць і планети рухаються через небо певними шляхами, які можна обчислити наперед з великою точністю. Сонце і Місяць усе ще можуть бути богами, але ці боги коряться певним законам, вочевидь без жодного винятку, якщо не розглядати історій, подібних до тої, як Сонце зупинилося задля Ісуса Навина.

Спочатку ці закономірності та закони були очевидні лише в астрономії та деяких інших ситуаціях. Однак з розвитком цивілізації, особливо в останні 300 років, виявляли все більше й більше закономірностей і законів. Успіх цих законів привів Лапласа на початку дев'ятого століття до постулату наукового детермінізму; тобто він запропонував, що існуватиме набір законів, що точно визначатиме розвиток Всесвіту, якщо знати його конфігурацію в якийсь момент часу.

Детермінізм Лапласа був неповний з двох причин. Він не говорив, як ці закони треба вибирати і не вказував початкової конфігурації Всесвіту. Це було залишене Богові. Бог вибрав би, як Всесвітові початися і якими законами керуватися, але надалі Він не буде втручатися у Всесвіт. По суті, Бога обмежили сферами, які наука дев'ятого століття не розуміла.

Сьогодні ми знаємо, що надії Лапласа на детермінізм нездійсненні, принаймні в тому вигляді, який він мав на увазі. З принципу невизначеності квантової механіки випливає, що деякі пари величин, наприклад положення і швидкість частинки, не можна передбачити одночасно абсолютно точно. Квантова механіка розглядає таку ситуацію за допомогою класу квантових теорій, в яких частинки не мають чітко визначених положень і швидкостей, а натомість представлені хвилею. Ці квантові теорії детерміністичні в тому розумінні, що вони дають закони для еволюції хвилі з часом. Тож, якщо знати хвилю в один момент часу, можна її обчислити в будь-який інший момент. Непередбачуваний, випадковий елемент з'являється лише тоді, коли ми намагаємося інтерпретувати хвилю в термінах положень і швидкостей частинки. Але, можливо, в цьому наша помилка: можливо, нема положень і швидкостей частинки, а є лише хвилі. Просто ми намагаємося втиснути хвилі в наші упереджені уявлення про положення та швидкості. Вислідна невідповідність і є причина позірної непередбачуваності.

По суті, ми переозначили завдання науки: відкриття законів, що дозволять нам передбачати події аж до меж, встановлених принципом невизначеності. Однак залишається питання: як чи чому були вибрані закони і початковий стан Всесвіту?

В цій книжці я приділив особливу увагу законам, що керують гравітацією, бо саме гравітація формує великомасштабну

структуру Всесвіту, навіть при тому, що це найслабша з чотирьох видів сил. Закони гравітації були несумісні з поглядом, що Всесвіт незмінний у часі, якого ми дотримувалися донедавна: з того, що гравітація завжди притягує, впливає, що Всесвіт має або розширюватися, або стискатися. Згідно з загальною теорією відносності, в минулому повинен був існувати стан нескінченної густини, Великий вибух, що був би фактичним початком часу. Аналогічно, якщо б увесь Всесвіт реколапсував, то має бути інший стан нескінченної густини у майбутньому, Великий стиск, який буде кінцем часу. Навіть якщо весь Всесвіт не реколапсує, будуть сингулярності в якихось локальних областях, що сколапсували, створюючи чорні діри. Такі сингулярності будуть кінцем часу для кожного, хто впаде в чорну діру. У Великому вибуху та інших сингулярностях усі закони перестають працювати, тож у Бога все одно буде повна свобода вибрати те, що відбулося, і як почався Всесвіт.

Коли ми об'єднуємо квантову механіку з загальною теорією відносністю, схоже, з'являється нова можливість, якої не було раніше: що простір та час разом можуть формувати скінченний, чотиривимірний простір без сингулярностей та меж, як поверхня Землі, але з більшою кількістю вимірів. Здається, ця ідея може пояснити багато спостережуваних властивостей Всесвіту, наприклад великомасштабну однорідність, а також меншомасштабні відхилення від однорідності, як галактики, зорі і навіть люди. Вона навіть може пояснити стрілу часу, що ми спостерігаємо. Але якщо Всесвіт повністю замкнений, без сингулярностей та меж, і його повністю описує єдина теорія, то це має глибокі наслідки для ролі Бога як Творця.

Айнштайн якийсь поставив питання: «Який вибір був у Бога при створенні Всесвіту?». Якщо пропозиція безмежовості правильна, то він не мав ніякої свободи вибору початкових умов. Звичайно, він би ще мав свободу вибору законів, яким підкоряється Всесвіт. Це, однак, може бути насправді не така вже й свобода вибору; цілком можливо, що існує одна або лише декілька повних єдиних теорій, наприклад теорія гетеротичної струни, що самоузгоджені й дозволяють існування таких складних структур, як люди, що можуть досліджувати закони Всесвіту і запитувати про суть Бога.

Навіть якщо існує лише одна можлива єдина теорія, це всього лише набір правил і рівнянь. А що ж саме надає живого духа цим рівнянням та створює Всесвіт, що вони описують? Звичайний науковий підхід — створення математичної моделі — не може відповісти на питання, чому повинен існувати Всесвіт, який така модель описуватиме. Чому Всесвіт взагалі завдав собі клопоту існувати? Чи дійсно єдина теорія така ґрунтовна, що приводить до свого власного існування? Чи їй потрібен творець, і в такому разі, чи має він якийсь інший вплив на Всесвіт? І хто створив його?

Дотепер більшість науковців були надто вже зайняті розроблянням нових теорій, які описують, що є Всесвіт, щоб поставити питання «чому?». З іншого боку, люди, справа яких — питати «чому?», філософи, не змогли йти в ногу з розвитком наукових теорій. У вісімнадцятому столітті філософи вважали все людське знання, разом з наукою, своєю галуззю й обговорювали питання на штиб: чи має Всесвіт початок? Однак у дев'ятнадцятому і двадцятому століттях наука стала занадто технічною і математичною для філософів та будь-кого, крім небагатьох фахівців. Філософи так звузили обсяг своїх запитів, що Вітгенштайн, найвідоміший філософ минулого століття, сказав: «Єдине, що залишилося філософії — аналіз мови». Яке падіння відносно великої філософської традиції від Аристотеля до Канта!

Однак, якщо ми таки знайдемо повну теорію, то з часом вона в загальних рисах стане зрозумілою для всіх, а не лише небагатьох фахівців. Тоді ми всі, філософи, науковці і просто звичайні люди, зможемо взяти участь в обговоренні питання, чому так сталося, що ми із Всесвітом існуємо. Якщо ми знайдемо на нього відповідь, це стане кінцевим тріумфом людського розуму, бо тоді ми збагнемо думку Бога.

ПЕРСОНАЛІЇ

Альберт Айнштайн

Зв'язок Айнштайна з політикою щодо ядерної бомби добре відомий: він підписав знаменитого листа до президента Франкліна Рузвелта, що переконав США сприйняти цю ідею серйозно, і долучився до післявоєнної боротьби за те, щоб запобігти ядерній війні. Але це були не просто окремі дії науковця, втягнутого в світ політики. Насправді життя Айнштайна було, за його ж словами, «розділене між політикою і рівняннями».

Рання політична діяльність Айнштайна почалася під час Першої світової війни, коли він був професором у Берліні. Відчуваючи огиду до того, що вважав марнуванням людських життів, він почав брати участь в антивоєнних демонстраціях. Його заклики до громадянської непокори і публічна підтримка людей, що відмовлялися від призову, не додали йому прихильності колег. Тоді, після війни, він спрямував свої сили на примирення та поліпшення міжнародних відносин. Це також не сприяло його популярності, й невдовзі така діяльність ускладнила йому візити в США навіть для читання лекцій.

Друга велика справа для Айнштайна був сіонізм. Бувши євреєм за походженням, Айнштайн заперечував біблійну ідею Бога. Однак усе більше усвідомлення антисемітизму, як до, так і під час Першої світової війни, поступово привело його до ототожнення себе з єврейською спільнотою, а пізніше зробило щирим прибічником сіонізму. І знову не популярність не завадила йому висловлювати свою думку. Його теорії зазнавали нападів; була навіть створена антиайнштайнівська організація. Одну людину визнали винною у

підбурюванні до вбивства Айнштайна (і оштрафували лише на шість доларів). Але Айнштайн був незворушний. Коли було опублікована книжка під назвою «100 авторів проти Айнштайна», він як відрізав: «Якщо б я був неправий, то й одного було б досить!».

В 1933 році до влади прийшов Гітлер. Айнштайн якраз був в Америці і заявив, що не повернеться в Німеччину. Тоді, коли нацистська міліція увірвалася в його будинок і конфіскувала його банківський рахунок, берлінська газета вийшла з заголовком: «Хороша новина від Айнштайна — він не повернеться». Перед лицем нацистської загрози Айнштайн відмовився від пацифізму і врешті, побоюючись, що німецькі науковці створять ядерну бомбу, запропонував США розробити свою власну. Але ще до того, як перша атомна бомба була підірвана, він публічно попереджає про небезпеку ядерної війни і пропонує міжнародний контроль за ядерною зброєю.

Упродовж усього його життя Айнштайнові миротворчі зусилля дали, певно, небагато тривких результатів, і напевно не додали йому багато друзів. Його активна підтримка справи сіонізму, однак, була належним чином визнана в 1952 році, коли йому запропонували стати президентом Ізраїлю. Він відмовився, сказавши, що він занадто наївний у політиці. Але, можливо, справжня причина була інша, за його, знову ж таки, словами: «Рівняння для мене важливіші, бо політика — для сьогодення, а рівняння — для вічності».

Галілео Галілей

Галілео, можливо, більш ніж будь-хто інший відповідальний за народження сучасної науки. Його знаменитий конфлікт з католицькою церквою був центральний для його філософії, бо Галілео був один з перших, хто стверджував, що людина може сподіватися зрозуміти, як світ влаштований, і, крім того, цього можна досягти, спостерігаючи реальний світ.

Галілео вірив у Коперникову теорію (що планети обертаються навколо Сонця) з самого початку, але публічно він

почав її підтримувати, лише коли знайшов докази, що підтвердили цю ідею. Він писав про Коперникову теорію італійською мовою (а не звичною академічною латиною), і невдовзі його погляди дістали широку підтримку поза межами університетів. Це роздратовало професорів-аристотеліянців, що об'єдналися проти нього, намагаючись переконати католицьку церкву заборонити коперниканізм.

Занепокоєний цим, Галілео відправився до Риму, щоб поговорити з церковною владою. Він стверджував, що Біблія не призначена для того, щоб розповідати нам щось про наукові теорії, а там, де вона суперечить здоровому глузду, зазвичай припускають її алегоричність. Але церква боялася скандалу, що міг би зашкодити її боротьбі проти протестантизму, і вдалася до репресивних заходів. Вона оголосила коперниканізм «фальшивим і помилковим» в 1616 році, й заборонила Галілео «захищати або підтримувати» це вчення. Галілео поступився.

В 1623 році давній друг Галілео став Папою. Галілео одразу спробував домогтися скасування декреталії 1616 року. Це йому не вдалося, та він зміг дістати дозвіл на написання книжки з обговоренням теорій Аристотеля і Коперника, але за двох умов: він не може ставати ні на чиєму боці, й повинен дійти висновку, що людина у будь-якому разі не може з'ясувати, як влаштований світ, бо Бог може спричиняти ті ж самі явища способами, неувяленими для людини, яка не може обмежувати всемогутність Бога.

Книжка «Діалог про дві головні системи світу» була завершена й опублікована в 1632 році, за повної підтримки цензорів — і зразу ж була привітана по всій Європі як літературний і філософський шедевр. Невдовзі Папа, зрозумівши, що люди сприймали цю книгу як переконливий аргумент на користь коперниканізму, пошкодував, що дозволив її публікацію. Папа вважав, що хоча книжка дістала офіційне благословення від цензорів, Галілео, проте, порушив декреталію 1616 року. Він віддав Галілео інквізиції, яка засудила його до довічного домашнього арешту і звеліла йому публічно зректися коперниканізму. Галілео неохоче поступився вдрузе.

Галілео залишався вірним католиком, але його віра в незалежність науки не похитнулася. За чотири роки до своєї смерті, в 1642 році, коли він усе ще був під домашнім арештом, рукопис його другої головної книжки таємно доставили видавцеві в Голандії. Саме ця робота, під назвою «Дві нові науки», навіть більше, ніж його підтримка Коперника, стала генезою сучасної фізики.

Ісак Ньютон

Ісак (Айзек) Ньютон не був приємна людина. Стосунки з іншими науковцями були сумнозвісні, а остання частина його життя переважно була згаяна в бурхливих суперечках. Після видання «Математичних основ», безсумнівно, найвпливовішої книжки, написаної в галузі фізики, Ньютон швидко піднявся в суспільному становищі. Його призначили президентом Королівського товариства і він став першим науковцем, якому надали звання рицаря.

Ньютон невдовзі зіткнувся з королівським астрономом Джоном Флемстидом, який раніше надавав йому дуже потрібні для «Основ» дані, а тепер затримував потрібну Ньютонів інформацію. Ньютон такого не стерпів: він сам себе призначив до керівництва Королівської обсерваторії, а потім став добиватися негайної публікації даних. Зрештою він влаштував так, що роботу Флемстида захопив і підготував до публікації смертельний ворог останнього, Едмонд Галі (Галей). Але Флемстид подав до суду, і якраз вчасно виграв справу, через судову постанову запобігши розповсюдженню викраденої роботи. Це страшенно розгнівило Ньютона і він, прагнучи відомстити, систематично вилучав усі покликання на Флемстида в пізніших редакціях «Основ».

Ще серйозніша суперечка виникла з німецьким філософом Готфридом Ляйбніцом. Обоє, і Ляйбніц, і Ньютон, незалежно один від одного розробили галузь математики, так званий математичний аналіз (числення), що лежить в основі більшої частини сучасної фізики. Хоча ми тепер знаємо, що Ньютон відкрив числення на роки раніше від Ляйбніца, та опублікував свою роботу він набагато пізніше. Ви-

никла велика суперечка про те, хто був перший, в якій науковці бурхливо захищали обох суперників. Примітно, однак, те, що більшість статей на захист Ньютона спочатку він написав власноруч, і лише опублікував під іменами своїх друзів! Суперечка розгорялася, і Ляйбніц зробив помилку, звернувшись до Королівського товариства з проханням її розв'язати. Ньютон, як президент, призначив «неупереджений» комітет для розслідування, що випадково повністю складався з його друзів! Але й це не все: Ньютон сам написав звіт комітету і Королівське товариство опублікувало його, офіційно звинувативши Ляйбніца в плагіаті. Все ще незадоволений, він тоді написав анонімний огляд звіту в журналі Королівського товариства. Кажуть, після смерті Ляйбніца Ньютон заявив, що дуже задоволений тим, що «розбив серце Ляйбніца».

Поки тривали ці дві суперечки, Ньютон покинув Кембридж і академічний світ. Він брав активну участь в антикатолицькій політиці в Кембриджі, а пізніше в парламенті, й був зрештою винагороджений прибутковою посадою доглядача Королівського монетного двору. Тут він використовував свої таланти підступності та злостивості соціально прийнятнішим чином, успішно провівши масштабну кампанію проти підробок, навіть пославши декількох людей на смерть через шибеницю.

ГЛОСАРІЙ

Абсолютний нуль (Absolute zero) — найнижча можлива температура, за якої речовини не мають теплової енергії.

Античастинка (Antiparticle) — кожен тип частинки матерії має відповідну античастинку. Коли частинка зіштовхується зі своєю античастинкою, вони анігілюють, виділяючи лише енергію.

Антропний принцип (Anthropic principle) — ми бачимо Всесвіт таким, як він є, бо якби він був інакший, нас би тут не було і ми не могли б його спостерігати.

Атом (Atom) — базова одиниця звичайної матерії, утворена з крихітного ядра (що складається з протонів і нейтронів) та електронів, що обертаються навколо нього.

Білий карлик (White dwarf) — стабільна холодна зоря, утримувана, завдяки принципіві Паулі, відштовхуванням між електронами.

Вага (Weight) — сила, з якою гравітаційне поле діє на тіло. Пропорційна, але не тотожна його масі.

Великий вибух (Big bang) — сингулярність на початку Всесвіту.

Великий стиск/Великий колапс (Big crunch) — сингулярність у кінці Всесвіту.

Віртуальна частинка (Virtual particle) — у квантовій механіці частинка, яку ніколи не можна виявити безпосередньо, але існування якої має вимірні ефекти.

Гама-промені (Gamma rays) — електромагнетні промені з дуже короткою довжиною хвилі, які утворюються під час радіоактивного розпаду чи зіткнень елементарних частинок.

Геодезична (Geodesic) — найкоротший (або найдовший) шлях між двома точками.

Гола сингулярність (Naked singularity) — просторочасова сингулярність, не оточена чорною дірою.

Горизонт подій (Event horizon) — межа чорної діри.

Довжина хвилі (Wavelength) — для хвилі, відстань між двома сусідніми западинами або гребенями.

Дуальність (Duality) — відповідність між явно різними теоріями, що приводять до однакових фізичних результатів.

Дуальність хвиль і частинок / Частинково [Корпускулярно]-хвильовий дуалізм (Wave/particle duality) — концепція у квантовій механіці, згідно з якою між хвилями й частинками немає відмінності; частинки інколи можуть поводитися, як хвилі, й навпаки.

Електричний заряд (Electric charge) — властивість частинки, завдяки якій вона може відштовхувати (або притягати) інші частинки, що мають заряд однакового (або різного) знаку.

Електромагнетна сила (Electromagnetic force) — сила/взаємодія, що виникає між частинками з електричним зарядом; друга найсильніша з чотирьох фундаментальних сил/взаємодій.

Електрон (Electron) — частинка з негативним електричним зарядом, що обертається навколо ядра атома.

Елементарна частинка (Elementary particle) — частинка, яку вважають неподільною.

Енергія великого об'єднання (Grand unification energy) — енергія, вище від якої, як вважають, електромагнетна, слабка і сильна сили/взаємодії стають невідрізненими.

Енергія електрослабкого об'єднання (Electroweak unification energy) — енергія (близько 100 GeV), вище від якої зникає відмінність між електромагнетною і слабкою силами/взаємодіями.

Загальна теорія відносності (General relativity) — Айнштайнова теорія, ґрунтована на ідеї, що наукові закони мають бути однаково для всіх спостерігачів, незалежно від того, як вони рухаються. Вона пояснює силу тяжіння в термінах кривини чотиривимірного простору-часу.

Збереження енергії (Conservation of energy) — науковий закон, згідно з яким енергію (чи її масовий еквівалент) неможливо створити чи знищити.

Казимірів ефект (Casimir effect) — притягальний тиск між двома плоскими паралельними металевими пластинами, розташованими дуже близько одна від одної у вакуумі. Тиск спричинює меншання звичайної кількості віртуальних частинок у просторі між пластинами.

Квант (Quantum) — неподільна одиниця енергії випромінювання чи поглинання хвиль.

Квантова механіка (Quantum mechanics) — теорія, розвинена з квантового принципу Планка і принципу невизначеності Гайзенберга.

Квантова хромодинаміка (КХД) (Quantum chromodynamics, QCD) — теорія, що описує взаємодію кварків і глюонів.

Квантовий принцип Планка (Planck's quantum principle) — ідея, що світло (або будь-які інші класичні хвилі) може випромінюватися або поглинатися лише дискретними квантами, чия енергія пропорційна частоті їхніх хвиль. Також див. примітку щодо квантів у розділі 4.

Кварк (Quark) — (заряджена) елементарна частинка, на яку впливає сильна сила/взаємодія. Протони й нейтрони складаються з трьох кварків.

Координати (Coordinates) — числа, що визначають положення точки в просторі й часі.

Космологічна константа (Cosmological constant) — математичний спосіб, який використав Айнштайн, щоб простір-час набув тенденції розширюватися.

Космологія (Cosmology) — дослідження Всесвіту як цілого.

Магнетне поле (Magnetic field) — поле, що відповідає за магнетну силу/взаємодію, тепер об'єднане разом з електричним в електромагнетне поле.

Маса (Mass) — кількість матерії в тілі; її інерція або спротив пришвидшуванню/прискорюванню.

Мікрохвильове фонове проміння (Microwave background radiation) — проміння від світіння гарячого раннього Всесвіту, з таким натеper великим червоним зсувом, що виступає не як світло, а як мікрохвилі (радіохвилі з довжиною декілька сантиметрів). Також див. КОБІ (розділ 9).

Міст Айнштайна — Розена (Einstein-Rosen bridge) — тонка трубка простору-часу, що з'єднує дві чорні діри. Також див. **Червоточина**.

Нейтрино (Neutrino) — надзвичайно легка (можливо, безмасова) частинка, на яку впливають лише слабка сила і гравітація.

Нейтрон (Neutron) — незаряджена частинка, дуже подібна до протона. Нейтрони становлять приблизно половину частинок в атомному ядрі.

Нейтронна зоря (Neutron star) — холодна зоря, підтримувана, завдяки принципам Паулі, відштовхуванням між нейтронами.

Первісна чорна діра (Primordial black hole) — чорна діра, утворена на самому початку Всесвіту.

Подія (Event) — точка в просторі-часі, задана своїм часом і місцем.

Позитрон (Positron) — (позитивно заряджена) античастинка електрона.

Поле (Field) — щось, що існує в усьому просторі й часі, на відмінну від частинки, що існує лише в одній точці в якийсь момент часу.

Принцип невизначеності (Uncertainty principle) — принцип, що його сформулював Гайзенберг. Згідно з цим принципом ніколи не можна достеменно точно знати і положення, і швидкість будь-якої частинки; що точніше знаємо одне, то менш точно — інше.

Принцип Паулі (Exclusion principle) — ідея, що дві однакові частинки зі спіном $1/2$ (у межах, встановлених принципом невизначеності), не можуть мати і однакове положення, і однакову швидкість.

Пришвидшення / Прискорення (Acceleration) — швидкість змінювання швидкості об'єкта.

Пришвидшувач / Прискорювач частинок (Particle accelerator) — пристрій, що за допомогою електромагнетів може пришвидшувати рухомі заряджені частинки, надаючи їм більшої енергії.

Пропорційний (Proportional) — « X пропорційний до Y » означає, що якщо Y множиться на будь-яке число, так само множиться й X . « X обернено пропорційний до Y » означає, що коли Y множиться на будь-яке число, то X ділиться на нього.

Простір-час / Часопростір (Space-time) — чотиривимірний простір, чий точки — події.

Просторовий вимір (Spatial dimension) — будь-який з трьох простороподібних вимірів, тобто будь-який, крім часового.

Протон (Proton) — позитивно заряджена частинка, дуже подібна до нейтрона. Протони становлять приблизно половину частинок ядра більшості атомів.

Пульсар (Pulsar) — обертова нейтронна зоря, що випромінює регулярні імпульси радіохвиль.

Радар (Radar) — система, що використовує імпульсні радіохвилі для визначення розташування об'єктів, вимірюючи час, потрібний одному імпульсові, щоб досягти об'єкта і повернутися назад.

Радіоактивність (Radioactivity) — спонтанний розпад одного типу атомного ядра з утворенням іншого.

Світлова секунда, світловий рік (Light-second, light-year) — відстань, що її світло долає за одну секунду, рік.

Світловий конус (Light cone) — поверхня в просторі-часі, що позначає можливі напрями світлових променів, які проходять через певну подію.

Сильна сила / Сильна взаємодія (Strong force) — найсильніша з чотирьох фундаментальних сил/взаємодій, з найкоротшим радіусом (даλεκістю) дії. Утримує разом кварки всередині протонів та нейтронів; і утримує разом протони та нейтрони, що утворюють атоми.

Сингулярність (Singularity) — точка в просторі-часі, в якій кривина простору-часу стає нескінченною.

Слабка сила / Слабка взаємодія (Weak force) — друга найслабша з чотирьох фундаментальних сил/взаємодій, з дуже коротким радіусом (даλεκістю) дії. Впливає на всі частинки матерії, але не на силовосні частинки (частинки-носії взаємодії).

Спектр (Spectrum) — набір частот, що утворюють хвилю. Видну частину спектру Сонця можна побачити у веселці.

Спеціальна теорія відносності (Special relativity) — Айнштайнова теорія, ґрунтована на припущенні, що коли нема гравітаційних явищ, закони фізики мають бути однаковими для всіх спостерігачів, незалежно від того, як вони рухаються.

Спін (Spin) — внутрішня властивість елементарної частинки, споріднена, але не тотожна звичайному поняттю обертання.

Стаціонарний стан (Stationary state) — такий стан, що не змінюється з часом: сфера, що обертається зі сталою швидкістю, стаціонарна, бо має однаковий вигляд у будь-який момент.

Темна речовина / Темна матерія (Dark matter) — речовина в галактиках, скупченнях і, можливо, між скупченнями, що її неможливо спостерігати безпосередньо, але можна виявити завдяки її гравітаційному ефектові.

Теорема про сингулярність (Singularity theorem) — теорема, згідно з якою сингулярність повинна існувати за певних умов, зокрема Всесвіт мав початися від сингулярності.

Теорія великого об'єднання (ТВО) (Grand unified theory, GUT) — теорія, що об'єднує електромагнетну, сильну та слабку сили/взаємодії.

Теорія струн (String theory) — фізична теорія, в якій частинки описують як хвилі на струнах. Струни мають довжину, але не мають інших вимірів.

Уявний час (Imaginary time) — час, що вимірюється уявними числами.

Умова безмежовості (No boundary condition) — ідея, що Всесвіт скінченний, але не має межі (в уявному часі).

Фаза (Phase) — для хвилі, позиція в циклі у визначений час: міра того, чи вона на гребені, в западині, чи десь між ними.

Фотон (Photon) — квант світла.

Чандрасекарова границя (Chandrasekhar limit) — максимально можлива маса стабільної холодної зорі, при перевищенні якої зоря повинна сколапсувати в чорну діру.

Частота (Frequency) — для хвилі, кількість повних циклів за секунду.

Червоний зсув (Red shift) — зумовлене Доплеровим ефектом почервоніння світла від зорі, що рухається від нас.

Червоточина (Wormhole) — тонка трубка простору-часу, що з'єднує віддалені області Всесвіту. Червоточини можуть також сполучати паралельні всесвіти чи всесвіти-дитята і давати змогу подорожувати в часі.

Чорна діра (Black hole) — область простору-часу з якої ніщо, навіть світло, не може вирватися через надсильну гравітацію.

Ядерний синтез (Nuclear fusion) — процес, що за нього два ядра зіштовхуються і зливаються, утворюючи одне важче ядро.

Ядро (Nucleus) — центральна частина атома; складається лише з протонів і нейтронів, що їх утримує разом сильна сила/взаємодія.