

1. NEW YORK TIMES BESTSELLING AUTHORS

СТІВЕН ГОКІНГ

і ЛЕОНАРД МЛОДІНОВ



НАЙКОРОТША ІСТОРІЯ ЧАСУ



STEPHEN
HAWKING
AND LEONARD MLODINOW



A BRIEFER
HISTORY
OF TIME

СТІВЕН
ГОКІНГ
І ЛЕОНАРД МЛОДІНОВ



НАЙКОРОТША
ІСТОРІЯ
ЧАСУ

ХАРКІВ **КЛУБ**
2017 **СІМЕЙНОГО**
ДОЗВІЛЯ

УДК 524.8
ББК 22.68
Г59

Жодну з частин цього видання
не можна копіювати або відтворювати в будь-якій формі
без письмового дозволу видавництва

Видається за домовленістю
з Writers House LLC і Synopsis Literary Agency
Фото зі Стівеном Гокінгом: с. 28, 43 і 146 © Stewart Cohen
Ілюстрації: The Book Laboratory ® Inc., James Zhang and Kees Veenenbos
Зображення Мерілін Монро: The Estate of Andre de Dienes / Ms. Shirley
de Dienes licensed by One West Publishing, Beverly Hills, Ca. 90212

Перекладено за виданням:

Hawking S., Mlodinow L. A Briefer History of Time /
Stephen Hawking, Leonard Mlodinow. — New York : Bantam Dell a Division
of Random House, Inc., 2005. — 260 p.

Переклад з англійської *Ігоря Андрущенко*

Дизайнер обкладинки *Юлія Сорудейкіна*

На обкладинці використано ілюстрацію *Ольги Іголкиної*

Науково-популярне видання

ГОКІНГ Стівен, МЛОДИНОВ Леонард
Найкоротша історія часу

Керівник проекту *В. В. Столяренко*
Координатор проекту *К. В. Новак*
Відповідальний за випуск *О. М. Пікалова*
Редактор *О. М. Старова*
Художній редактор *Ю. О. Сорудейкіна*
Технічний редактор *В. Г. Євлахов*
Коректор *Д. А. Шелест*

Підписано до друку 01.07.2016. Формат 60х90/16. Друк офсетний.
Гарнітура «Georgia». Ум. друк. арк. 10. Наклад 8000 пр. Зам. № 64/03.

Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля»
Св. № ДК65 від 26.05.2000
61140, Харків-140, просп. Гагаріна, 20а
E-mail: cop@bookclub.ua

Віддруковано з готових діапозитивів
на ПП «ЮНІСОФТ»
Свідоцтво ДК №3461 від 14.04.2009 р.
www.ttornado.com.ua
61036, м. Харків, вул. Морозова, 13Б

ISBN 978-617-12-1054-7 (укр.)
ISBN 978-0-553-38546-5 (англ.)

© Stephen Hawking, Leonard Mlodinow, 2005
© Hemiro Ltd, видання українською мовою, 2016
© Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля», переклад і художнє оформлення, 2016

РОЗМІРКОВУЮЧИ ПРО ВСЕСВІТ

Ми живемо в незвичайному й чудовому Всесвіті. Потрібна неабияка уява, щоб оцінити його вік, розміри, шаленість і навіть красу. Місце, яке посідають у цьому безмежному космосі люди, може здатися мізерним. А проте ми намагаємося зрозуміти, як увесь цей світ влаштований і яке наше місце в ньому.

Кілька десятиліть тому відомий науковець (дехто каже, що це був Бертран Рассел) виступав із публічною лекцією з астрономії. Він розповідав, що Земля обертається навколо Сонця, а воно, своєю чергою, навколо центра великого зоряного скупчення, що зветься нашою Галактикою.

Скінчилася лекція, і маленька літня дама, що сиділа в задніх рядах, підвелась і заявила:

— Нарозказували ви нам сім мішків гречаної вовни. Насправді світ — це пласка плита, що лежить на спині велетенської черепахи.

Самовдоволено посміхнувшись, науковець запитав:

— А на чому стоїть черепаха?

— Ви страшенно розумний, юначе, страшенно, — відказала літня дама. — Вона стоїть на іншій черепасі, і так без кінця!

Сьогодні більшість людей посміялися б із такої картини Всесвіту — нескінченної черепашачої вежі. Але що змушує нас думати, ніби ми знаємо краще? Забудьте на хвилину те, що ви знаєте — або ж думаєте, що знаєте, — про космос. Зведіть очі до нічного неба. Якої ви думки про всі ці світні точки? А що, коли це крихітні вогники? Нам важко здогадатися, що воно насправді, бо дійсність ця надто далека від нашого щоденного досвіду.

Якщо ви часто спостерігаєте за нічним небом, то, певно, помічали в сутінках геть над обрієм невловиму іскорку світла. Це Меркурій — планета, що разюче відрізняється від нашої. Доба на Меркурії триває дві третини його року. На сонячному боці температура сягає понад 400 °С, а пізно вночі падає майже до -200 °С. Утім, хоч би як відрізнявся Меркурій від нашої планети, іще важче уявити звичайну зорю — велетенське горно, яке спалює щомиті мільйони тонн речовини й розігріте в центрі до десятків мільйонів градусів.

Інша річ, яку важко збагнути, — це відстані до планет і зір. Давні китайці будували кам'яні башти, щоб розгледіти їх краще. Цілком природно вважати, що зорі й планети розташовані набагато ближче, ніж насправді, адже в щоденному житті ми ніколи не стикаємося з величезними космічними відстанями. Відстані ці такі великі, що безглуздо виражати їх у звичних одиницях — метрах або кілометрах. Натомість використовують світлові роки (світловий рік — шлях, який світло проходить за рік). За секунду промінь світла долає 300 000 кілометрів, тож світловий рік — це неабияка відстань. Найближчу до нас

(після Сонця) зорю — Проксиму Центавра — відділяє від Землі близько чотирьох світлових років. Це так далеко, що найшвидший із космічних кораблів, проекти яких нині розробляють, летів би до неї з десятків тисяч років.

Ще в давнину люди намагалися збагнути природу Всесвіту, але їм не допомагали в цьому різні науки, зокрема математика. Сьогодні в нас є потужні інструменти: аналітичні, такі як математика й науковий метод пізнання, і технічні, зокрема комп'ютери й телескопи. За їхньою допомогою науковці зібрали до купи силу-силенну знань про космос. Але що ми насправді знаємо про Всесвіт і як ми це дізналися? Звідки він з'явився? У якому напрямку розвивається? Чи мав Усесвіт початок, а якщо мав, що було до нього? Яка природа часу? Чи дійде він колись кінця? Чи можна повернутися назад у часі? Нещодавні прориви у фізиці, зроблені почасти завдяки новим технологіям, пропонують відповіді на деякі з давніх запитань. Можливо, коли-небудь ці відповіді стануть так само очевидними, як те, що Земля обертається навколо Сонця, чи, може, такими ж сміховинними, як вежа з черепах. Тільки час (яким би він не був) це покаже.

РОЗВИТОК КАРТИНИ СВІТУ

Хоча навіть у добу Христофора Колумба багато хто вважав, що Земля пласка (і сьогодні дехто досі дотримується цієї думки), сучасна астрономія сягає корінням у часи давніх греків. Десять 340 років до нашої ери давньогрецький філософ Аристотель написав твір *«Про небо»*, у якому наводив вагомі аргументи на користь того, що Земля являє собою радше сферу, аніж пласку плиту.

Одним з аргументів стали затемнення Місяця. Аристотель зрозумів, що їх спричиняє Земля, яка, проходячи між Сонцем і Місяцем, затінює останній. Учений зауважив, що тінь Землі завжди кругла. Так і має бути, якщо Земля — сфера, а не плаский диск. Якби Земля мала форму диска, її тінь була б круглою не завжди, а тільки в ті моменти, коли Сонце опиняється точно над центром диска. В інших випадках тінь видовжувалася б, перетворюючись на еліпс (видовжене коло).

Мали греки й інший аргумент на користь того, що Земля кругла. Якби вона була пласкою, то корабель, який наближається, спочатку здавався б крихітною, невиразною цяткою на обрії. Із його наближенням можна було б краще розгледіти деталі: вітрила, корпус та ін. Однак усе відбувається інакше. Коли судно з'являється на обрії,

перше, що ви бачите, — це вітрила. Тільки потім в очі впадає корпус. Та обставина, що щогли, які підносяться над корпусом, першими з'являються з-за обрію, свідчить про те, що Земля має форму кулі.



Корабель з'являється з-за обрію

Давні греки приділяли значну увагу спостереженням за нічним небом. Протягом кількох століть до Аристотеля вже відстежували переміщення небесних світил. Було відзначено, що серед тисяч видимих зір, які рухалися разом, п'ять (не враховуючи Місяця) пересувалися у свій, особливий спосіб. Іноді вони відхилялися від звичайного напрямку зі сходу на захід і «задкували». Ці світила називали словом «планета», що в перекладі з грецької означає «блукачка». Давні греки спостерігали тільки п'ять планет: Меркурій, Венеру, Марс, Юпітер і Сатурн, адже лише їх можна побачити неозброєним оком. Сьогодні ми знаємо, чому планети рухаються по дивних траєкторіях. Якщо зорі майже не рухаються порівняно з нашою Сонячною системою, то планети обертаються навколо Сонця, тож їхній шлях нічним небом куди складніший за рух далеких зір.

Аристотель вважав, що Земля нерухома, а Сонце, Місяць, планети й зорі обертаються навколо неї по колових орбітах. Він вірив у це, припускаючи з містичних причин, що Земля — центр Усесвіту, а коловий рух найдосконаліший. У II столітті нашої ери інший грецький учений, Птолемей, розвинув цю ідею, побудувавши довершену модель небесних сфер. Птолемей був захопленим дослідником. «Коли я вивчаю собі на втіху, як міріади зір простують по своїх колах, — писав він, — то земля западається під моїми ногами».

У моделі Птолемея Землю оточували вісім обертових сфер. Кожна наступна сфера була більша за попередню — щось на кшталт російської матрьошки. Земля перебувала в центрі. Що саме лежить за межами останньої сфери, ніколи не уточнювали, але це, безперечно, було недосяжним для людського погляду. Тому найдальшу сферу вважали чимось на кшталт кордону, вмістищем Усесвіту. Зорі нібито займали на ній фіксовані місця, тож за обертання цієї сфери вони рухалися небом разом, зберігаючи взаємне розташування, що ми й спостерігаємо. На внутрішніх сферах розташовувалися планети. На відміну від зір, вони не були жорстко закріплені, а рухалися щодо своїх сфер по невеликих колах, які називалися епіциклами. Це обертання разом з обертанням планетних сфер і робило рух планет відносно Землі таким складним.

У такий спосіб Птолемей спромігся пояснити, чому спостережувані шляхи планет на зоряному небі значно складніші, ніж прості кола.

Модель Птолемея дозволяла досить точно передбачати місце світил на небі. Але для цього вченому довелося припустити, що інколи Місяць, долаючи свій шлях, підходить до Землі удвічі ближче, ніж в інший час. А це означає, що часом він, далекі, здається удвічі більшим! Птолемей знав

про цей недолік своєї системи, і все ж вона здобула широке, хай і не загальне визнання. Християнська церква вирішила, що ця картина світу відповідає Святому Письму, бо ж має неабияку перевагу: вона залишала достатньо місця для раю й пекла за межами сфери непорушних зір.



Модель Птолемея

Однак 1514 року польський священик Миколай Коперник запропонував іншу модель. (Спочатку, імовірно, боячись, що його затаврують як єретика, учений поширював свою теорію анонімно.) Революційна ідея Коперника полягала в тому, що не всі небесні тіла мають обертатися навколо Землі. Він стверджував, що Земля й планети обертаються по колових орбітах навколо нерухомого Сонця, розташованого в центрі Сонячної системи. Подібно до моделі Птолемея теорія Коперника працювала добре, проте не зовсім відповідала спостереженням. Її відносна простота порівняно з моделлю Птолемея, здавалося б, обіцяла швидкий успіх. Утім, сплигло майже століття, перш ніж цю теорію сприйняли серйозно. Два астрономи —

німець Йоганн Кеплер та італієць Галілео Галілей — відкрито підтримали вчення Коперника.

1609 року Галілей почав спостерігати нічне небо за допомогою винайденого власноруч телескопа. Поглянувши на Юпітер, він зауважив, що навколо цієї планети кружляє кілька малих супутників. Це значило, що не всі небесні тіла обертаються навколо Землі, як вважали Аристотель і Птолемей. Водночас Кеплер удосконалив теорію Коперника, припустивши, що планети рухаються не по колах, а по еліпсах. Завдяки такій корективі передбачення цієї теорії збіглися зі спостереженнями. Відкриття Галілея й Кеплера завдали смертельних ударів Птолемеєвій моделі.

Хоча припущення про еліптичну форму орбіт дозволило вдосконалити модель Коперника, сам Кеплер сприймав це лише як тимчасову гіпотезу. Учений дотримувався упереджених умоглядних ідей щодо будови Всесвіту. Як й Аристотель, Кеплер вважав еліпси менш досконалими фігурами, ніж кола. Думкою про те, що планети рухаються по таких недосконалих орбітах, він гребував, тож не визнавав її остаточною істиною. Бентежило Кеплера й інше: уявлення про еліптичні орбіти не збігалося з його ідеєю про те, що планети обертаються навколо Сонця під дією магнітних сил. І хоча з тезою, що обертання планет зумовлене магнітними силами, Кеплер дав маху, слід визнати: він мав рацію, коли збагнув, що за рух небесних тіл відповідальна якась сила.

Правильне пояснення того, чому планети обертаються навколо Сонця, з'явилося набагато пізніше, 1687 року, коли Ісаак Ньютон опублікував свої «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*»¹, певно найважливішу з будь-коли виданих праць у царині фізики. У «Principia» учений

¹ «Математичні першопричини натуральної філософії» (лат.). (Тут і далі прим. пер.)

сформулював закон, згідно з яким будь-яке нерухоме тіло залишається в спокої, поки цей стан не порушить якась сила, і описав, як під впливом сили тіло рухається або змінює свій рух.

Отже, чому ж планети рухаються по еліпсах навколо Сонця? Ньютон заявив, що за це відповідальна особлива сила, і стверджував, що вона ж змушує предмети падати на Землю замість залишатися в спокої, коли ми випускаємо їх із рук. Він назвав цю силу гравітацією. (До Ньютона англійське слово *gravity* означало серйозність, а також властивість предметів бути важкими.) Окрім того, учений розробив математичний апарат, що дозволив кількісно описати, як реагують тіла на дію сил, що притягують їх, як гравітація, і розв'язав отримані рівняння. Таким чином, він зміг довести, що тяжіння Сонця змушує Землю й інші планети рухатися по еліптичних орбітах, точнісінько як напроорокував Кеплер! Ньютон проголосив, що його закони застосовні до всього у Всесвіті — від яблука, яке падає з дерева, до зір і планет. Уперше в історії рух планет було пояснено дією тих самих законів, які визначають рух на Землі, і так був покладений початок сучасній фізиці та астрономії.

Коли було знехтувано Птолемеєві сфери, не залишалося жодної причини думати, буцімто Всесвіт має природні межі (окреслені найдальшою сферою). А оскільки положення зір здавалося незмінним, якщо не враховувати їхнього добового руху небом, спричиненого обертанням Землі навколо своєї осі, то природно було припустити, що зорі — це об'єкти, подібні до нашого Сонця, хіба що дуже-дуже далекі. Ми махнули рукою на думку, що тепер уже не тільки Земля, а й Сонце не могло претендувати на роль центра світу. Уся наша Сонячна система була не чим іншим, як звичайнісіньким об'єктом у Всесвіті.

СУТЬ НАУКОВИХ ТЕОРІЙ

Щоб говорити про природу Всесвіту й міркувати про те, чи має він початок або кінець, слід усвідомити, що таке наукова теорія. Виходитимемо з того наївного уявлення, що теорія — це просто модель Усесвіту або певної його частини, а також набір правил, які допомагають встановити зв'язок між абстрактними величинами й конкретними спостереженнями. Теорія існує тільки в наших головах і не має іншої реальності (що б це слово не означало). Будь-яка теорія гарна, якщо вона відповідає двом вимогам: точно описує великий масив спостережень на основі моделі, що містить лише кілька довільних елементів, і дозволяє робити точні передбачення щодо результатів подальших спостережень. Наприклад, Аристотель визнавав теорію Емпедокла, згідно з якою все складається з чотирьох елементів: землі, повітря, вогню й води. Це була досить проста теорія, але вона не дозволяла робити жодних певних передбачень. Теорія всесвітнього тяжіння Ньютона заснована на ще простішій моделі, згідно з якою тіла притягуються із силою, пропорційною їхнім масам та обернено пропорційною квадрату відстані між ними. Утім, ця теорія з високою точністю передбачає рух Сонця, Місяця й планет.

Будь-яка фізична теорія завжди умовна в тому розумінні, що вона є лише припущенням: *ви нізащо її не доведете.*

Скільки б разів результати експериментів не збігалися з прогнозами теорії, ви ніколи не зможете бути впевнені, що наступного разу між ними не виникне протиріччя. Водночас одне-єдине спостереження, що не збігається з прогнозами теорії, здатне її спростувати. Щоразу, коли результати нових експериментів узгоджуються з передбаченнями теорії, вона виживає й наша довіра до неї збільшується. Однак, якщо бодай одне спостереження суперечить теорії, ми повинні її відкинути чи переглянути. Принаймні передбачають, що так має бути, проте ви завжди можете засумніватися в компетентності того, хто здійснював спостереження.

На практиці нова теорія найчастіше є розвитком попередньої. Наприклад, вельми точні спостереження за планетою Меркурій виявили невеликі розбіжності між її реальним рухом і тим, що передбачає теорія всесвітнього тяжіння Ньютона. Загальна теорія відносності Ейнштейна дещо відхиляється від теорії Ньютона. Те, що передбачення Ейнштейна, на відміну від ньютонівських, збіглися зі спостереженнями, стало одним із найважливіших підтверджень нової теорії. Проте ми досі використовуємо теорію Ньютона для практичних завдань, адже відмінності між її прогнозами й передбаченнями загальної теорії відносності вельми незначні. (До того ж теорія Ньютона має велику перевагу: працювати з нею набагато простіше, ніж із теорією Ейнштейна!)

Кінцева мета науки полягає в тому, щоб запропонувати єдину теорію, яка описує весь Усесвіт. Однак на практиці науковці ділять це завдання на дві частини. Першу частину становлять закони, що описують, як Усесвіт змінюється з часом. (Якщо ми знаємо стан Усесвіту в певний момент часу, то ці фізичні закони повідають нам, яким буде його стан згодом.) До другої частини належать питання, що стосуються первісного стану Всесвіту. Деякі люди переконані,

що наука має займатися тільки першою частиною, а питання про початковий стан відносять до царини метафізики чи релігії. Вони кажуть, що Бог, відзначаючись усеомогутністю, міг би дати початок Усесвіту, якби йому заманулося. Може, це й справді так, але тоді Всевишній міг також змусити Всесвіт формуватися хтозна-як. Однак, схоже, Творець звелів йому розвиватися достоту за певними законами. Тому чи не розумніше було б припустити, що якісь закони керували й початковим станом Усесвіту?

Виявляється, дуже важко винайти теорію, що описує весь Усесвіт. Натомість ми розбиваємо завдання на частини й створюємо безліч часткових теорій. Кожна з них описує й передбачає деякий обмежений клас спостережень, нехтуючи впливом інших величин або подаючи їх у вигляді простих наборів чисел. Можливо, цей підхід зовсім неправильний. Якщо все у Всесвіті фундаментально залежить одне від одного, то, може, годі дійти абсолютно-го розв'язання, досліджуючи частини проблеми окремо. Утім у минулому саме цей спосіб дозволив досягнути певного успіху. Класичний приклад — та ж таки теорія Ньютона, яка говорить нам, що гравітаційна взаємодія між двома тілами залежить тільки від однієї їхньої властивості — маси — і не бере до уваги те, з чого вони складаються. Тож нам не потрібна теорія внутрішньої будови Сонця й планет, аби розрахувати їхні орбіти.

Сьогодні науковці описують Усесвіт у термінах двох основних часткових теорій — загальної теорії відносності та квантової механіки. Це найбільші досягнення розуму першої половини ХХ століття. Загальна теорія відносності описує дію гравітації й масштабну будову Всесвіту, тобто структуру в масштабах від кількох кілометрів до мільйона мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з двадцятьма чотирма нулями) кілометрів — розмірів

видимого Всесвіту. Квантова механіка, навпаки, має справу з украй малими масштабами на кшталт мільйонної частки від мільйонної частки сантиметра. Щоправда, відомо, що ці дві теорії несумісні: разом вони не можуть бути правильні. Одним із провідних завдань сучасної фізики й головною темою цієї книжки є пошук нової теорії — квантової теорії гравітації, — яка поєднала б у собі подані часткові. Поки що такої теорії немає, і, можливо, нам доведеться подолати ще довгий шлях до неї, але вже відомо чимало тих властивостей, які мають бути притаманні новому вченню. І ми покажемо далі, що вже знаємо чималу кількість передбачень, які повинна робити квантова теорія гравітації.



Від атомів до галактик

Якщо ви вірите, що Всесвіт не хаотичний, а підпорядкований певним законам, то має існувати можливість урешті-решт звести різні часткові теорії в одну повну, яка опише все у Всесвіті. Проте в пошуках закінченої

загальної теорії криється фундаментальний парадокс. Сформульовані вище принципи створення наукових теорій передбачають, що ми раціональні істоти, здатні спостерігати Всесвіт у різні способи й робити логічні висновки з того, що бачимо. У такому разі логічно припустити, що ми могли б підбиратися дедалі ближче до законів, які керують нашим Усесвітом. І якби справді існувала повна об'єднана теорія, вона, можливо, визначила б наші власні дії. А значить, і результати наших пошуків самої об'єднаної теорії! І чому вона повинна зумовлювати те, що ми зробимо правильні висновки зі спостереженого? Чи не може виявитися, що з таким самим успіхом ми зробимо неправильні висновки? Або взагалі не зробимо жодних?

Єдина відповідь, яку можна дати на ці запитання, ґрунтується на принципі природного відбору Дарвіна. У будь-якій популяції самовідтворювальних організмів неминучі варіації в генетичному матеріалі й вихованні різних особин. Ці відмінності означають, що деякі індивідууми здатні судити про навколишній світ точніше за інших і відповідно діяти. Такі особистості матимуть нащадків, а отже, їхня поведінка й спосіб мислення домінуватимуть. Певна річ, те, що ми називаємо інтелектом і науковим мисленням, у минулому давало переваги в боротьбі за виживання. Не зовсім зрозуміло, однак, чи дає це такі переваги сьогодні. Наші наукові відкриття здатні знищити всіх нас, і, навіть якщо цього не станеться, повна об'єднана теорія не збільшить наші шанси на виживання. Однак, якщо Всесвіт розвивався за певними законами, ми могли б очікувати, що здатність до мислення, якою нагородив нас природний відбір, прислужиться в пошуках повної об'єднаної теорії, а отже, не приведе нас до помилкових висновків.

Оскільки часткові теорії, які ми вже маємо, достатні для того, щоб робити точні передбачення у всіх ситуаціях,

окрім найбільш екстремальних, то пошук остаточної теорії Всесвіту, схоже, важко виправдати міркуваннями практичної користі. (Варто, утім, зазначити, що такі аргументи могли використовувати й проти теорії відносності та квантової механіки, а вони дали нам ядерну енергію й революцію у сфері мікроелектроніки!) Тож відкриття повної об'єднаної теорії може й не сприяти виживанню людського роду. Воно може навіть не позначитися на нашому способі життя. Але відтоді, як зародилася цивілізація, люди відмовляються вважати явища позбавленими взаємозв'язків і незрозумілими. Вони прагнуть збагнути, що лежить в основі всієї світобудови. Сьогодні ми досі намагаємося дізнатися, звідки та яким чином з'явилися в цьому світі. Фундаментальний потяг людства до знання — достатня підстава для продовження пошуків. І наша мета — щонайменше повний опис Усесвіту, у якому ми живемо.

УСЕСВІТ НЬЮТОНА

Наші сучасні уявлення про рух тіл ґрунтуються на працях Галілея й Ньютона. Доти люди вірили Аристотелю, який стверджував, буцімто природний стан тіла — спокій, а рухається воно тільки під впливом сили або імпульсу. Звідси випливало, що важче тіло має падати швидше за легше, адже воно сильніше притягується до Землі. Аристотелівська традиція проголошувала також, що всі закони, які керують Усесвітом, можна вивести суто умоглядно, без експериментальної перевірки. Тому до Галілея ніхто не намагався з'ясувати, чи справді тіла різної маси падають із різною швидкістю.

Стверджують, що Галілей доводив хибність думки Аристотеля, кидаючи предмети з похилої вежі в італійському місті Піза. Історія ця, найпевніше, вигадана, проте щось подібне Галілей таки робив: він скочував кулі різної маси по гладенькій похилій площині. Ситуація схожа на ту, коли тіла падають вертикально, проте завдяки меншим швидкостям у такому експерименті легше проводити спостереження.

Вимірювання Галілея засвідчили, що швидкість руху тіл зростала однаково незалежно від їхньої маси. Наприклад, якщо ви пустите кулю по похилій площині, висота якої

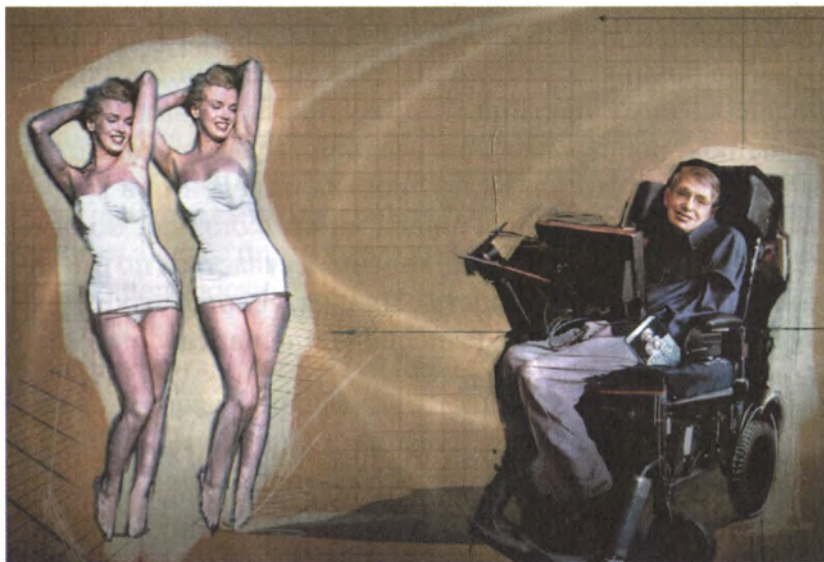
знижується на один метр кожні десять метрів, то незалежно від маси за секунду куля котитиметься зі швидкістю метр за секунду, за дві секунди — два метри за секунду тощо. Звичайно, олив'яний тягарець падає швидше за пір'їнку, але тільки тому, що падіння пера вповільнюється через опір повітря. Два тіла, що не наражаються на істотний повітряний опір, наприклад два олив'яні тягарці різної маси, падатимуть із тим самим прискоренням. (Невдовзі ми дізнаємося чому.) На Місяці, де немає повітря, що вповільнювало б падіння, астронавт Девід Рендольф Скотт провів експеримент, кидаючи пір'їнку й шматочок олива, і пересвідчився, що вони впали на ґрунт одночасно.

Ньютон зробив вимірювання Галілея наріжним каменем своїх законів руху. В експериментах Галілея тіло скочувалося з похилої площини під дією сталої сили (ваги), що надавала йому постійного прискорення. Таким чином було продемонстровано, що реальний ефект від дії сили — зміна швидкості тіла, а не просте приведення в рух, як вважали раніше. Також звідси випливало, що, поки на тіло не діє яка-небудь сила, воно пересувається по прямій лінії з постійною швидкістю. Ця ідея, уперше чітко сформульована 1687 року в «Principia Mathematica», відома як перший закон Ньютона.

Поведінку тіла під дією сили описує другий закон Ньютона. Згідно з ним, тіло прискорюватиметься, тобто змінюватиме свою швидкість у темпі, пропорційному величині прикладеної сили. (Наприклад, якщо сила зросте удвічі, то прискорення теж збільшиться удвічі.) Окрім того, прискорення тіла тим менше, чим більша його маса, тобто кількість речовини. (Та сама сила, що діє на тіло удвічі більшої маси, дає удвічі менше прискорення.) Звичний приклад зі світу автомобілів: що потужніший двигун, то більше прискорення, а якщо йдеться про

однакову потужність двигунів, важча автівка прискорюється повільніше.

На додачу до законів руху, що характеризують реакцію тіл на дію сил, ньютонівська теорія тяжіння описує, як визначити величину одного конкретного виду сил — гравітації. Як уже було сказано, згідно з цією теорією, будь-які два тіла притягуються одне до одного із силою, пропорційною їхнім масам. Інакше кажучи, сила тяжіння між двома тілами зростає удвічі, якщо подвоїти масу одного з тіл, наприклад тіла А. Це цілком природно, бо нове тіло А можна розглядати як два тіла, кожне з яких має первісну масу й притягує тіло В із первісною силою.



Гравітаційне тяжіння складених тіл

Таким чином, повна сила взаємного тяжіння тіл А і В удвічі перевищуватиме первісну. А якби маса одного з тіл зросла вшестеро чи маса одного збільшилася удвічі, а другого — утричі, то сила тяжіння між ними зросла б у шість разів.

Тепер можна зрозуміти, чому всі тіла падають з однаковим прискоренням. Згідно із законом всесвітнього тяжіння, те з двох тіл, яке має удвічі більшу масу, удвічі сильніше притягується Землею. Але, як говорить другий закон Ньютона, через удвічі більшу масу прискорення тіла на одиницю сили виявиться удвічі меншим. Згідно з тим-таки другим законом, ці два ефекти компенсують один одного, і прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла.

Закон тяжіння Ньютона також вказує, що чим далі одне від одного перебувають тіла, тим слабкіше їхнє тяжіння. За Ньютоном, тяжіння далекої зорі буде достоту вчетверо слабкішим за тяжіння такої самої зорі, розташованої удвічі ближче. Цей закон дозволяє з високою точністю передбачати траєкторії руху Землі, Місяця й планет. Якби з відстанню гравітаційне тяжіння зорі зменшувалося швидше або повільніше, орбіти планет не були б еліптичними, а мали б форму спіралі, спрямованої в бік Сонця або від нього.

Найбільша відмінність між ученням Аристотеля та ідеями Галілея й Ньютона полягає в тому, що Аристотель вважав спокій природним станом, до якого прагне будь-яке тіло, якщо на нього не впливає якась сила або імпульс. Грецький мислитель припускав, зокрема, що Земля перебуває в стані спокою. Але із законів Ньютона випливає, що жодного унікального стандарту спокою не існує. Можна сказати, що тіло А перебуває в стані спокою, а тіло В пересувається щодо нього з постійною швидкістю або що тіло В перебуває в спокої, а тіло А пересувається, і обидва твердження будуть відповідати дійсності. Наприклад, якщо на мить забути, що Земля обертається навколо своєї осі й обертається навколо Сонця, то рівною мірою можна говорити про те, що Земля перебуває в стані спокою, а поїзд мчить її поверхнею на північ зі швидкістю

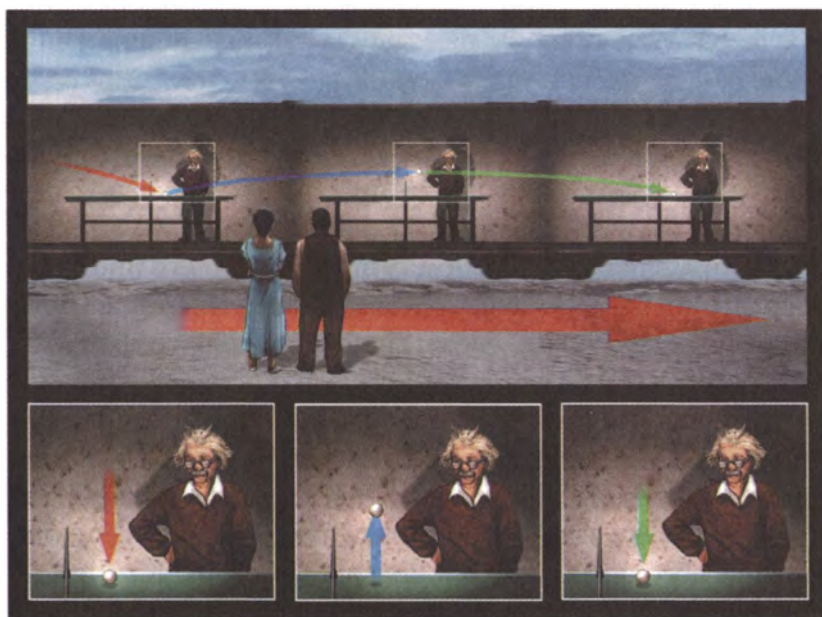
144,8 кілометра за годину або що поїзд перебуває в стані спокою, а Земля рухається на південь зі швидкістю 144,8 кілометра за годину. Якщо провести в поїзді експерименти з рухомими тілами, усі закони Ньютона підтвердяться. Граючи, приміром, у пінг-понг у вагоні поїзда, переконуєшся, що м'ячик підкоряється законам Ньютона точнісінько так само, як і м'ячик на столі біля залізниці. Тож годі з'ясувати, що ж, власне, рухається — поїзд чи Земля.

Як ви гадаєте, за ким правда — за Ньютоном чи за Аристотелем? Ось один із можливих експериментів. Уявіть, що ви перебуваєте всередині закритого контейнера й не знаєте, стоїть він на підлозі вагона в рухомому поїзді або ж на твердій поверхні Землі — стандарті спокою за Аристотелем. Чи можна визначити, де ви? Якщо можна, то Аристотель, мабуть, мав рацію: стан спокою на Землі — річ особлива. Однак це неможливо. Якщо ви проводите експерименти всередині контейнера в рухомому поїзді, то результати будуть точнісінько такими самими, як і тоді, коли ви експериментуватимете всередині контейнера на «нерухомому» пероні (ми виходимо з того, що поїзд не відчуває поштовхів, не повертає й не гальмує). Граючи в пінг-понг у вагоні поїзда, можемо виявити, що м'ячик поводить себе точно так само, як і м'ячик на столі біля залізниці. І якщо, перебуваючи всередині контейнера, ви граєте в пінг-понг за різних швидкостей поїзда відносно Землі — скажімо, 0,8 або 144,8 кілометра за годину, — м'ячик завжди поводитиметься однаково. Так влаштований світ, що й відображено в рівняннях законів Ньютона: не існує способу дізнатися, що рухається — поїзд чи Земля. Поняття руху має сенс, тільки якщо рух визначається іншими об'єктами.

Чи справді істотно, хто має рацію, — Аристотель чи Ньютон, — або ж ідеться лише про різницю поглядів, філософських систем? Чи це проблема, важлива для

науки? Воістину брак абсолютного стандарту спокою має у фізиці далекосяжні наслідки: з нього випливає, що годі визначити, чи дві події, які трапилися в різний час, відбулися в тому самому місці.

Щоб змалювати це, припустімо, що хтось у поїзді вертикально кидає тенісний м'ячик на стіл. Той відскакує вгору й за секунду знову потрапляє на те ж таки місце на поверхні столу. Для людини, що кинула м'ячик, точка першого дотику цілком збігатиметься з точкою другого. Але для того, хто стоїть зовні вагона, два дотики розділятимуть приблизно чотири десятки метрів, бо саме стільки подолає поїзд за час, коли м'ячик двічі торкнеться столу.



Відносність відстані

Згідно з Ньютоном, обидві людини мають право вважати, що перебувають у стані спокою, тож обидві точки зору однаково прийнятні. Жодна з них не має переваги над іншою,

на відміну від того, що вважав Аристотель. Місця, де спостерігають події, і відстані між ними різні для людини в поїзді й людини на платформі, і немає жодних причин віддати перевагу одному спостереженню над іншим.

Ньютона вельми непокоїв такий брак абсолютних положень (або абсолютного простору, як це називалося), який не узгоджувався з його ідеєю абсолютного Бога. Фактично вчений відмовився визнати брак абсолютного простору попри те, що його закони натякали на це. За таку ірраціональну віру багато хто критикував Ньютона, особливо єпископ Берклі — філософ, який вважав, буцімто всі матеріальні тіла, простір і час — ілюзія. Дізнавшись про таку позицію Берклі, видатний доктор Джонсон вигукнув: «Я спростовую це ось так!» — і копнув ногою великий камінь.

І Аристотель, і Ньютон вірили в абсолютний час, тобто вважали, що, коли використовувати точні годинники, можна однозначно виміряти проміжок часу між двома подіями й отримане значення буде тим самим, хто б не проводив вимірювання. На відміну від абсолютного простору, абсолютний час *узгоджувався* із законами Ньютона. І більшість людей вважають, що це відповідає здоровому глузду. Щоправда, у XX столітті фізики збагнули, що їм доведеться переглянути уявлення про час і простір. Як ми згодом переконаємося, науковці виявили, що інтервал часу між двома подіями, як відстань між відскоками тенісного м'ячика, залежить від спостерігача. Відкрили вони й те, що час не є абсолютно незалежним від простору. Ключем до прозріння стало нове розуміння властивостей світла. Властивості ці, здавалося б, суперечать нашому досвіду, але здоровий глузд, який справно служить нам, коли йдеться про яблука або планети, що рухаються порівняно повільно, відмовляється працювати у світі швидкостей, які дорівнюють або наближаються до швидкості світла.

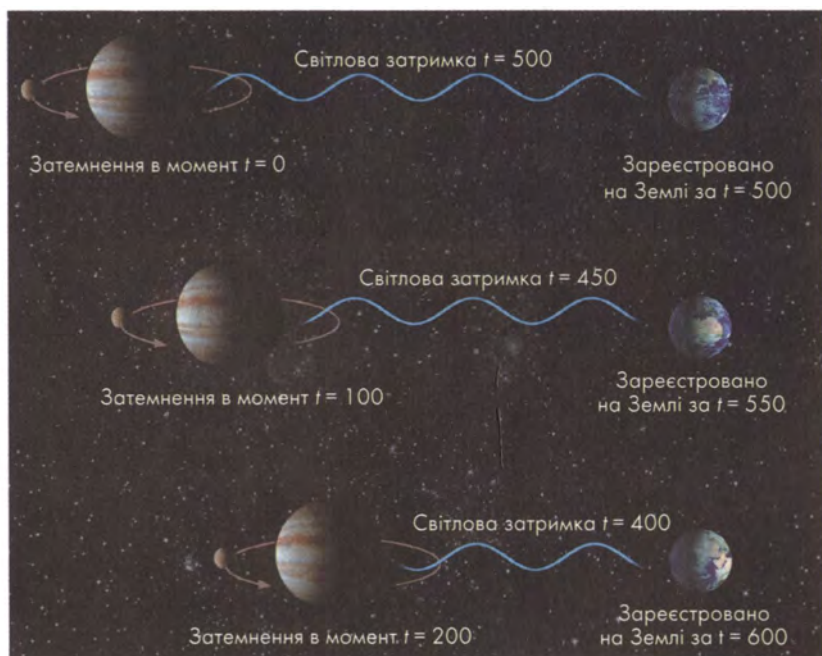
ВІДНОСНІСТЬ

Той факт, що світло поширюється з нехай і величезною, але обмеженою швидкістю, встановив 1676 року данський астроном Оле Крістенсен Ремер. Спостерігаючи за супутниками Юпітера, можемо зауважити, що час від часу вони зникають із виду, ховаючись за гігантською планетою. Такі затемнення в системі супутників Юпітера мають відбуватися з однаковими інтервалами, проте Ремер установив, що проміжки між ними різні. А що, коли, рухаючись по орбіті, супутники то пришвидшуються, то вповільнюються? Ремер знайшов інше пояснення.

Якби світло поширювалося з нескінченною швидкістю, то на Землі ці затемнення спостерігали б через рівні проміжки часу, у ті самі моменти, коли вони відбуваються, — немов хід космічного годинника. Оскільки світло долало б миттєво будь-яку відстань, то було б байдуже, чи перебував Юпітер ближче або далі від Землі.

Тепер уявімо, що світло поширюється з обмеженою швидкістю. Тоді ми побачили б кожне затемнення через якийсь час після того, як воно сталося. Ця затримка залежить від швидкості світла й від відстані до Юпітера. Якби відстань між Юпітером і Землею не змінювалася, затемнення спостерігали б завжди через рівні проміжки

часу. Утім інколи відстань між Землею та Юпітером скорочується. У цьому разі «сигнал» про кожне наступне затемнення долає дедалі меншу відстань і досягає нашої планети чимраз раніше, ніж якби Юпітер лишався на однаковій відстані від Землі. З тієї ж причини, коли Юпітер віддаляється від Землі, ми бачимо, що затемнення дедалі більше запізнюються.



Моменти затемнень супутників Юпітера

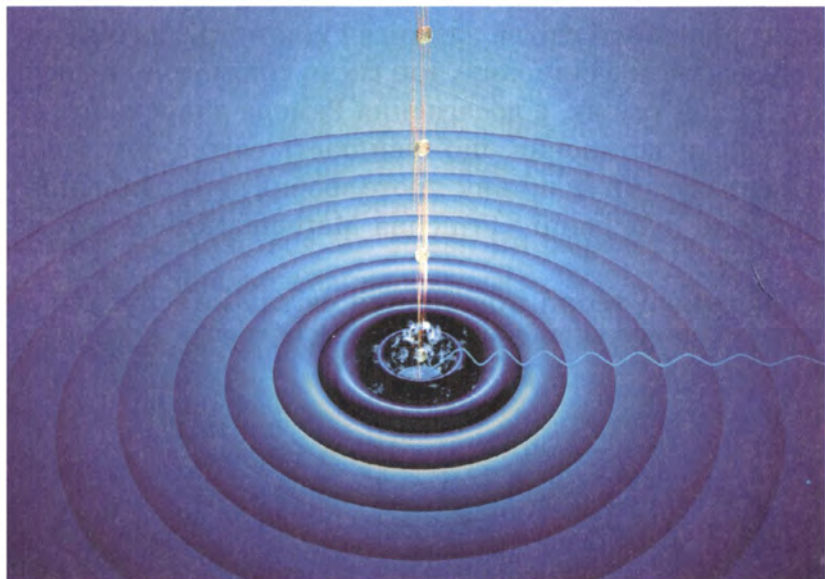
Величина випередження й запізнювання залежить від швидкості світла, що дозволяє виміряти її. Саме це й зробив Ремер. Учений зауважив, що під час зближення Землі та Юпітера затемнення настають раніше, а коли планети віддаляються одна від одної — пізніше, і використовував цю різницю для обчислення швидкості світла. Його оцінки зміни відстані від Землі до Юпітера, утім, були не надто точними, через що Ремер отримав вели-

чину швидкості світла 225 тисяч кілометрів за секунду, тоді як сучасна становить 300 тисяч кілометрів за секунду. Та хай там як, а досягнення Ремера дивовижне: він не тільки встановив, що швидкість світла обмежена, а й вирахував її величину, проте зробив це за одинадцять років до публікації «Principia Mathematica» Ньютона.

Справжньої теорії поширення світла не існувало до 1865 року, коли англійський фізик Джеймс Клерк Максвелл зумів об'єднати доти часткові описи електричних і магнітних сил. Рівняння Максвелла передбачали можливість хвилеподібних збурень того, що науковець назвав електромагнітним полем. Вони мали поширюватися з постійною швидкістю, наче брижі плесом. Обчисливши цю швидкість, Максвелл виявив, що вона достоту збігається зі швидкістю світла! Сьогодні ми знаємо, що людське око сприймає хвилі Максвелла як видиме світло, якщо їхня довжина коливається між сорока й вісімдесятьма мільйонними частками сантиметра. (Довжиною хвилі називають відстань між двома її гребенями.)

Хвилі, довжина яких коротша, ніж у видимого світла, зараз називають ультрафіолетовим, рентгенівським і гамма-випромінюванням. Хвилі, довжина яких більша за довжину видимого світла, це радіохвилі (метр або більше), мікрохвилі (кілька сантиметрів), а також інфрачервоне випромінювання (більше від однієї десятитисячної частки сантиметра, але менше від видимого діапазону).

Висновок теорії Максвелла про те, що радіо- й світлові хвилі поширюються з певною постійною швидкістю, було важко узгодити з теорією Ньютона. Оскільки не існує абсолютного стандарту спокою, то не може бути й жодної універсальної угоди про швидкість об'єкта. Щоб зрозуміти це, знову уявіть, що ви граєте в пінг-понг у поїзді. Якщо ви

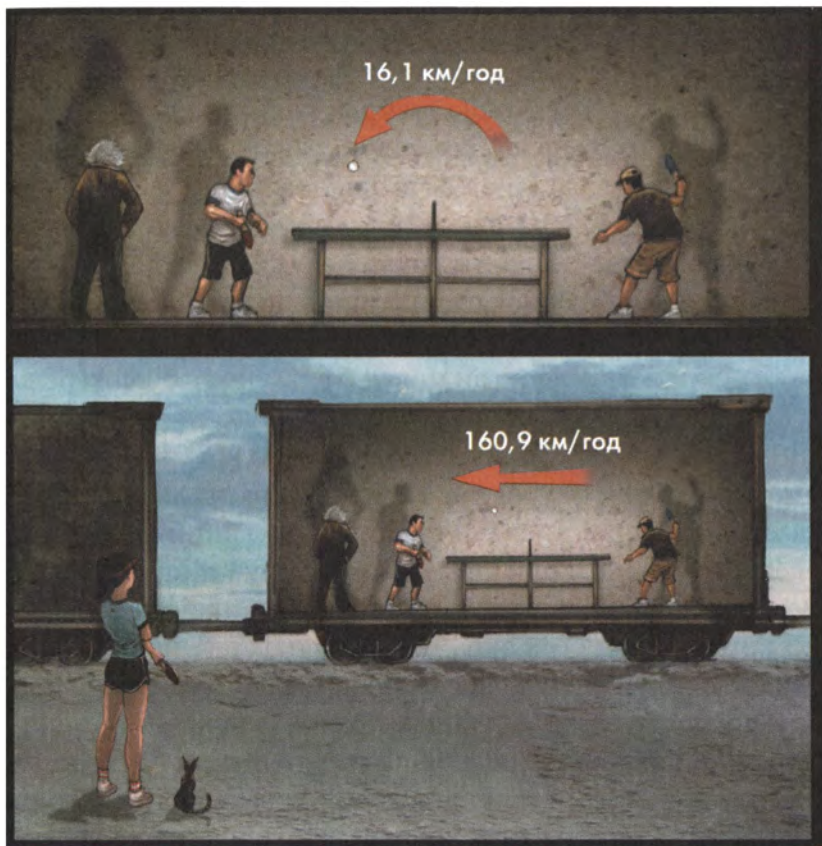


Довжина хвилі

посилаєте м'ячик своєму супротивникові за напрямком руху зі швидкістю 16,1 кілометра за годину, то для спостерігача на платформі швидкість м'ячика становитиме 160 кілометрів за годину: 16,1 — швидкість м'ячика щодо поїзда — плюс 144,8 — швидкість поїзда щодо платформи. Яка швидкість м'ячика — 16,1 чи 160,9 кілометра за годину? А як ви її визначатимете? Щодо поїзда? Відносно Землі? Без абсолютного стандарту спокою вам не визначити абсолютну швидкість м'ячика. Тому самому м'ячику можна «накинути» будь-яку швидкість залежно від того, у якій системі відліку її вимірюють.

Згідно з теорією Ньютона, те саме має стосуватися й світла. То що ж тоді означає теза теорії Максвелла про те, що світлові хвилі завжди поширюються з однаковою швидкістю?

Щоб узгодити теорію Максвелла із законами Ньютона, пристали на гіпотезу, буцімто всюди, навіть у вакуумі,



Різні швидкості м'ячика для пінг-понгу

у «порожньому» просторі, існує якесь середовище, що дістало назву «ефір». Ідея ефіру дуже приваблювала тих науковців, які вважали, що подібно до морських хвиль, які потребують води, або звукових коливань, яким необхідне повітря, хвилям електромагнітної енергії необхідне якесь середовище, у якому вони могли б поширюватися. З цієї точки зору світлові хвилі поширюються в ефірі так само, як звукові в повітрі, і їхню швидкість, яка виводиться з рівнянь Максвелла, слід вимірювати щодо ефіру. У такому разі різні спостерігачі фіксували б різні значення швидкості світла, але відносно ефіру вона залишалася б постійною.

Цю ідею можна перевірити. Уявіть світло, що його випромінює якесь джерело. Згідно з теорією ефіру, світло поширюється в ньому з постійною швидкістю. Якщо ви рухаєтесь крізь ефір у бік джерела, швидкість, з якою до вас наближається світло, складатиметься зі швидкості руху світла в ефірі й вашої швидкості щодо ефіру. Світло наближатиметься до вас швидше, ніж якби ви були нерухомі або, наприклад, кудись рухалися. Однак цю різницю у швидкості дуже важко виміряти через те, що швидкість світла набагато вища за ту швидкість, з якою ви могли б рухатися в бік джерела.

1887 року Альберт Майкельсон (згодом він став першим американським лауреатом Нобелівської премії з фізики) та Едвард Морлі провели вельми вишуканий і складний експеримент у Школі прикладних наук у Клівленді¹. Коли Земля обертається навколо Сонця зі швидкістю близько 30 кілометрів на секунду, їхня лабораторія, найпевніше, рухається крізь ефір із цією відносно великою швидкістю — розмірковували вони. Звичайно, ніхто не знав, чи переміщується ефір щодо Сонця, а якщо так, то в який бік і з якою швидкістю. Але, повторюючи вимірювання в різні пори року, коли Земля перебуває в різних точках своєї орбіти, науковці сподівалися врахувати цей невідомий чинник.

Майкельсон і Морлі провели експеримент, у якому швидкість світла в напрямку руху Землі через ефір (коли ми рухаємося в бік джерела світла) порівнювалася зі швидкістю світла під прямим кутом до цього напрямку (коли ми не наближаємося до джерела). На свій превеликий подив, вони виявили, що швидкість в обох напрямках точнісінько збігається!

Між 1887 і 1905 роками було зроблено кілька спроб урятувати теорію ефіру. Найбільш цікавими виявилися

¹ Одна з найстаріших інженерних шкіл, заснована 1877 року.

праці голландського фізика Хендріка Лоренца, який спробував пояснити результат експерименту Майкельсона — Морлі стисненням предметів і вповільненням годинника, коли ті опиняються в ефірі. Проте в 1905 році доти не відомий співробітник швейцарського патентного бюро Альберт Ейнштейн звернув увагу на те, що будь-яка потреба в ефірі відпадає, якщо відмовитися від ідеї абсолютного часу (невдовзі ви дізнаєтеся чому). За кілька тижнів схожі міркування висловив провідний французький математик Анрі Пуанкаре. Аргументи Ейнштейна були ближчими до фізики за розрахунки Пуанкаре, який вважав проблему суто математичною й так і не сприйняв ейнштейнівську інтерпретацію теорії.

Фундаментальний постулат теорії відносності Ейнштейна свідчить, що всі закони фізики мають бути однаковими для всіх спостерігачів, що вільно рухаються, незалежно від їхньої швидкості. Це відповідало законам руху Ньютона, але Ейнштейн поширив таку ідею й на теорію Максвелла. Інакше кажучи, коли теорія Максвелла проголошує швидкість світла постійною, то будь-який спостерігач, який може рухатися, куди йому заманеться, повинен фіксувати те саме значення незалежно від швидкості, з якою він наближається до джерела світла або віддаляється від нього. Звичайно, ця проста ідея пояснила — не вдаючись до ефіру чи іншої привілейованої системи відліку — сенс появи швидкості світла в рівняннях Максвелла, проте з неї також випливали деякі дивовижні наслідки, які часто суперечили інтуїції.

Наприклад, вимога, щоб усі спостерігачі погодилися на оцінці швидкості світла, змушує змінити концепцію часу. За теорією відносності той спостерігач, який їде поїздом, і той, який стоїть на платформі, по-різному оцінять відстань, пройдену світлом. А оскільки швидкість — це відстань, поділена на час, то єдиний спосіб для спостерігачів

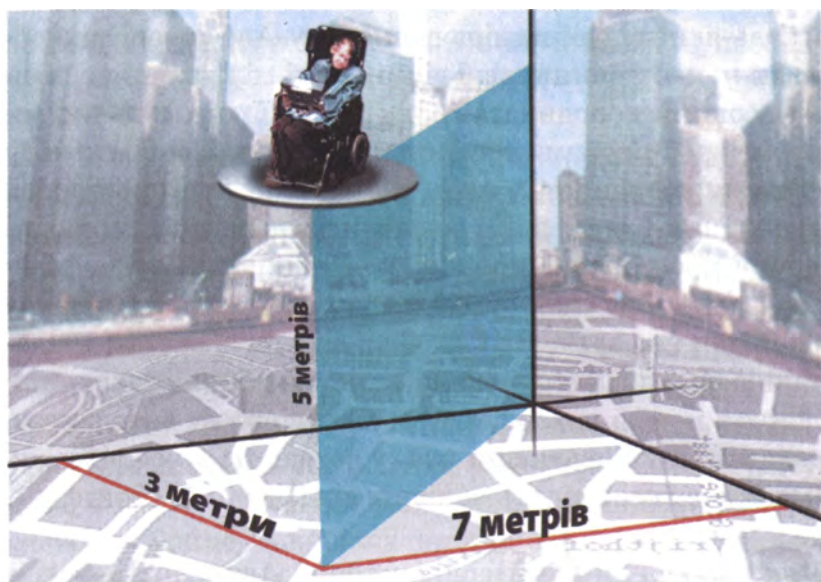
дійти згоди щодо швидкості світла — це розійтись і в оцінці часу. Інакше кажучи, теорія відносності поклала край ідеї абсолютного часу! З'ясувалося, що кожен спостерігач повинен підходити до часу з власною міркою й що ідентичні годинники в різних спостерігачів не конче показуватимуть той самий час.

Теорії відносності ні до чого ефір, наявність якого, як показав експеримент Майкельсона — Морлі, годі виявити. Натомість теорія відносності змушує нас істотно змінити уявлення про простір і час. Ми повинні визнати, що час не повністю відокремлений від простору, а становить із ним певну єдність — простір-час. Зрозуміти це нелегко. Навіть спільноті фізиків знадобилися роки, щоб прийняти теорію відносності. Ця теорія — свідчення багатої уяви Ейнштейна, його здатності до побудови вчень і довіри до власної логіки, завдяки якій науковець робив висновки, не лякаючись тих, здавалося б, чудернацьких ідей, які породжувала теорія.

Усім добре відомо, що місце точки в просторі можна описати трьома числами, або координатами. Можна, приміром, сказати, що якась точка в кімнаті лежить за сім футів від однієї стіни, за три фути — від іншої й на висоті п'яти футів над підлогою. Або ми можемо вказати точку, задавши її географічні широту й довготу, а також певну висоту над рівнем моря.

Можна використовувати будь-які три прикладні координати, проте кожна має обмежену сферу застосування. Не надто зручно визначати положення Місяця щодо центра Лондона: мовляв, стільки-то кілометрів на північ і стільки-то на захід від Пікаділлі-серкус¹, а також стільки-то

¹ Площа й транспортна розв'язка в центральному Лондоні, створені 1819 року.



Координати в просторі

футів над рівнем моря. Натомість можна задати положення Місяця, указавши відстань від нього до Сонця, відстань до площини планетних орбіт, а також кут між прямою Місяць — Сонце й лінією, що з'єднує Сонце з найближчою до нас зорею — Проксимою Центавра. Утім, коли йдеться про опис розташування Сонця в нашій Галактиці або самої Галактики в Місцевій групі галактик, навіть ці координати не надто зручні. Насправді Всесвіт можна описувати в термінах своєрідних перекриваних «латок». Щоб задати положення точки, у межах кожної «латки» найкраще використовувати свою систему координат.

У просторі-часі теорії відносності будь-яку подію, тобто щось, що відбувається в певній точці простору в певний час, можна задати чотирма координатами.

Вибір координат знову-таки довільний: можна використовувати будь-які три чітко задані просторові координати

й будь-який спосіб вимірювання часу. Але в теорії відносності немає принципової відмінності між просторовими й часовими координатами, як немає її між будь-якими двома просторовими координатами. Можна вибрати нову систему координат, у якій, скажімо, перша просторова координата буде певним поєднанням первісних першої та другої просторових координат. Наприклад, положення точки на Землі можна було б виміряти не відстанню в милях на північ і на захід від Пікаділлі-серкус, а, скажімо, відстанню від площі на північний схід і північний захід. Аналогічно можна використовувати нову часову координату, задавши її як первісний час (у секундах) плюс відстань (у світлових секундах) на північ від Пікаділлі-серкус.

Інший добре знаний наслідок теорії відносності — еквівалентність маси й енергії, виражена славнозвісним рівнянням Ейнштейна $E = mc^2$, де E — енергія, m — маса тіла, c — швидкість світла. Через еквівалентність енергії й маси кінетична енергія матеріального об'єкта — об'єкт має її, бо рухається, — збільшує його масу. Інакше кажучи, об'єкту дедалі важче розганятися. Цей ефект істотний тільки для тіл, які пересуваються зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Наприклад, за швидкості, що дорівнює 10 % від швидкості світла, маса тіла буде лише на 0,5 % більша, ніж у стані спокою, а ось за швидкості, що становить 90 % від швидкості світла, маса вже більш ніж удвічі перевищуватиме звичайну. Із наближенням до швидкості світла маса тіла збільшується чимраз швидше, тож для прискорення йому потрібно дедалі більше енергії. Згідно з теорією відносності, об'єкт ніколи не зможе досягти швидкості світла, бо тоді його маса стала б нескінченною, а з огляду на еквівалентність маси й енергії для цього знадобилася б нескінченна енергія. Ось чому, за теорією відносності, будь-яке звичайне тіло завжди приречене рухатися зі швидкістю, меншою

за швидкість світла. Тільки світло або інші хвилі, позбавлені власної маси, здатні рухатися зі швидкістю світла.

Теорія відносності, яку Ейнштейн висунув 1905 року, називається спеціальною. Вона вельми успішно пояснила незмінність швидкості світла для всіх спостерігачів й описала те, що відбуватиметься, якщо тіла рухатимуться зі швидкостями, близькими до швидкості світла, але, як з'ясувалося, ішла врозріз із теорією тяжіння Ньютона. Теорія Ньютона говорить, що в будь-який момент тіла притягують одне одного із силою, яка залежить від відстані між ними в цей час. Отже, варто комусь пересунути одне з тіл — і сила тяжіння миттєво зміниться. Якби, скажімо, Сонце зненацька зникло, то, згідно з теорією Максвелла, щоб поринути в темряву, Землі знадобилося б іще 8 хвилин (саме стільки потрібно сонячному світлу, щоб досягти нашої планети). Утім теорія Ньютона твердить, що Земля, звільнившись від тяжіння Сонця, негайно зійшла б з орбіти. Таким чином, гравітаційний ефект зникнення Сонця досягнув би нас із нескінченною швидкістю, а не зі швидкістю світла або повільніше, як передбачає спеціальна теорія відносності. Між 1908 і 1914 роками Ейнштейн неодноразово вдавався до спроб примирити теорію тяжіння зі спеціальною теорією відносності, проте марно. Нарешті, 1915 року він запропонував іще більш революційну доктрину, яку нині ми називаємо загальною теорією відносності.

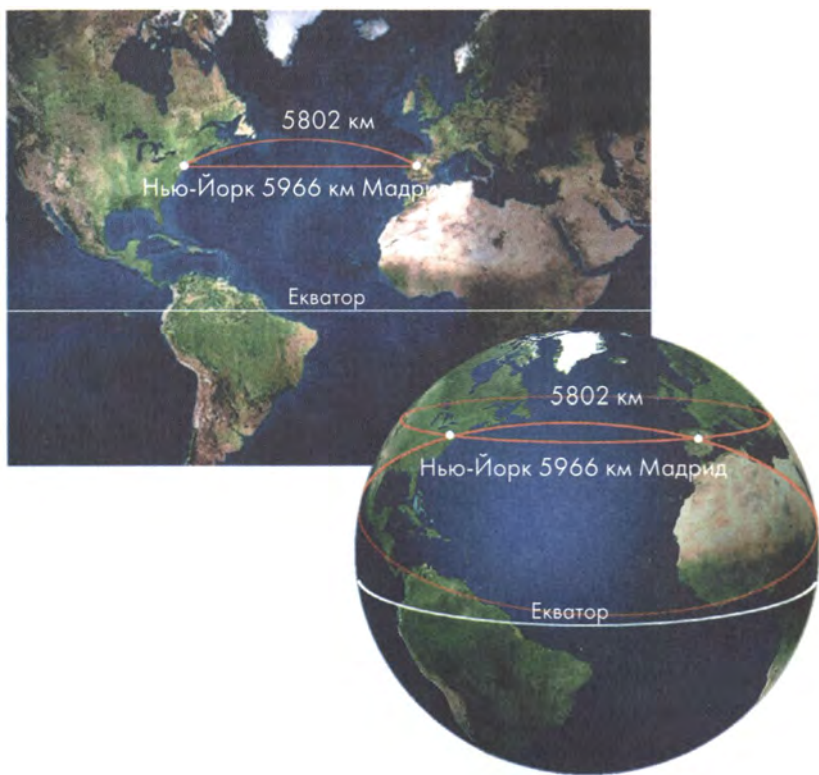
ВИКРИВЛЕННЯ ПРОСТОРУ

Загальна теорія відносності Ейнштейна ґрунтується на революційному припущенні, що гравітація — це не звичайна сила, а наслідок того, що простір-час має не пласку форму, як вважали раніше. У загальній теорії відносності простір-час вигнуто або викривлено розташованими всередині нього масою й енергією. Тіла, подібні до Землі, рухаються по викривлених орбітах не під дією сили, що називається гравітацією. Вони пересуваються по викривлених орбітах, адже ті являють собою геодезичні лінії — найближчі аналоги прямих ліній у викривленому просторі. При цьому в загальному розумінні геодезична лінія визначається як найкоротший (або, навпаки, найдовший) шлях між двома точками.

Геометрична площина — приклад тривимірного простору, у якому геодезичні лінії є прямими. Поверхня Землі — це двовимірний викривлений простір. Геодезичні лінії на Землі називаються великими колами.

Екватор — велике коло, як і будь-яке інше коло на поверхні, центр якого збігається з центром Землі. (Термін «велике коло» вказує на те, що такі кола є найбільшими можливими на поверхні Землі.) Оскільки геодезична лінія — найкоротша лінія між двома аеропортами, то штурмани радять

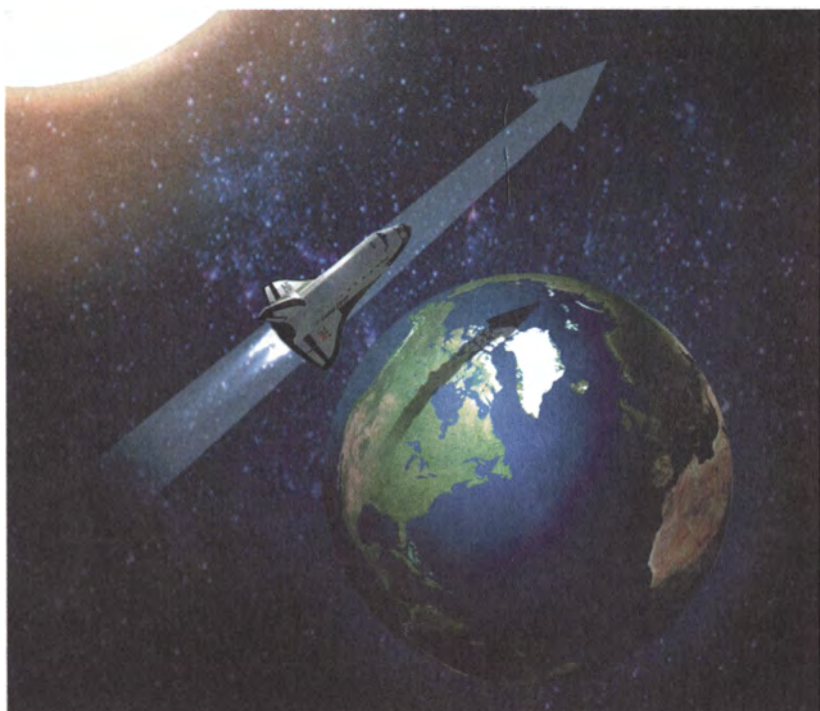
пілотам вести літаки саме за такими маршрутами. Наприклад, ви могли б, орієнтуючись на покази компаса, пролетіти 5966 кілометрів від Нью-Йорка до Мадрида майже прямо на схід уздовж географічної паралелі. Але вам доведеться подолати лише 5802 кілометри, якщо ви спершу полетите по великому колу на північний схід, потім поступово повертатимете на схід і далі на південний схід.



Відстані на Земній кулі

Вигляд цих двох маршрутів на мапі, де земна поверхня спотворена (сплющена), оманливий. Рухаючись «прямо» на схід від однієї точки до іншої по поверхні земної кулі, ви насправді пересуваєтеся не по прямій лінії, точніше, не по найкоротшій, геодезичній лінії.

У загальній теорії відносності тіла завжди тримаються геодезичних ліній у чотиривимірному просторі-часі. Коли матерії немає, ці прямі лінії в чотиривимірному просторі-часі відповідають прямим лініям у тривимірному просторі. Коли ж матерія є, чотиривимірний простір-час спотворюється, спричиняючи викривлення траєкторій тіл у тривимірному просторі подібно до того, як це відбувалося під дією гравітаційного тяжіння в ньютонівській теорії. Щось схоже спостерігають, коли літак летить над пагористою місцевістю. Він, можливо, і рухається по прямій лінії в тривимірному просторі, але якщо прибрати третій вимір — висоту, — то з'ясується, що тінь літака виводить вигнуту траєкторію на горбистій двовимірній поверхні Землі.



Траєкторія тіні літака

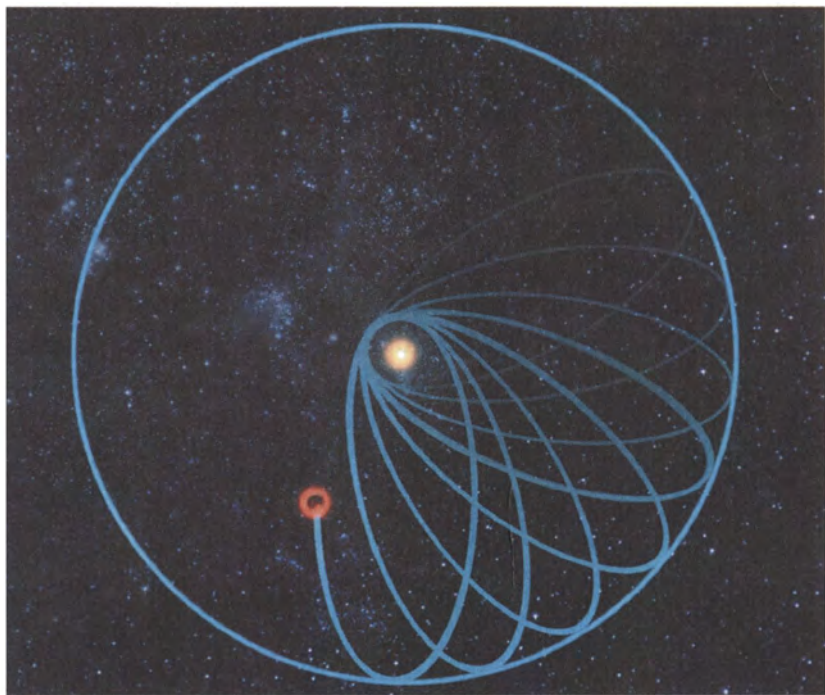
Або уявіть космічний корабель, який пролітає в космосі по прямій лінії просто над Північним полюсом. Спроектуйте його траєкторію вниз на двовимірну поверхню Землі, і ви побачите, що вона описує півколо, перетинаючи паралелі Північної півкулі. Хоча зобразити це важко, маса Сонця викривляє простір-час так, що Земля, рухаючись найкоротшим шляхом у чотиривимірному просторі-часі, проходить, як нам здається, по майже коловій орбіті в тривимірному просторі.

Насправді, хай розраховані інакше, орбіти планет, як їх визначає загальна теорія відносності, майже точнісінько такі самі, як ті, що їх передбачає закон тяжіння Ньютона. Найбільша розбіжність виявляється в орбіти Меркурія, який як найближча до Сонця планета зазнає найсильнішої дії гравітації й має досить видовжену еліптичну орбіту. Згідно із загальною теорією відносності, велика вісь еліптичної орбіти Меркурія має обертатися навколо Сонця приблизно на один градус за 10 000 років.

Хоч би який малий був цей ефект, він був зафіксований (див. розділ 3) задовго до 1915 року і став одним із перших підтверджень теорії Ейнштейна. За останні роки за допомогою радарів були виявлені ще менш помітні відхилення орбіт інших планет від передбачень теорії Ньютона: вони цілком збігаються із загальною теорією відносності.

Світлові промені теж мають триматися геодезичних ліній простору-часу. І знову той факт, що простір викривлений, означає, що траєкторія світла в просторі вже не схожа на пряму лінію. Тож загальна теорія відносності змушує гравітаційні поля викривляти світло. Наприклад, теорія передбачає, що поблизу Сонця промені світла мають злегка згинатися в бік світила під впливом його маси.

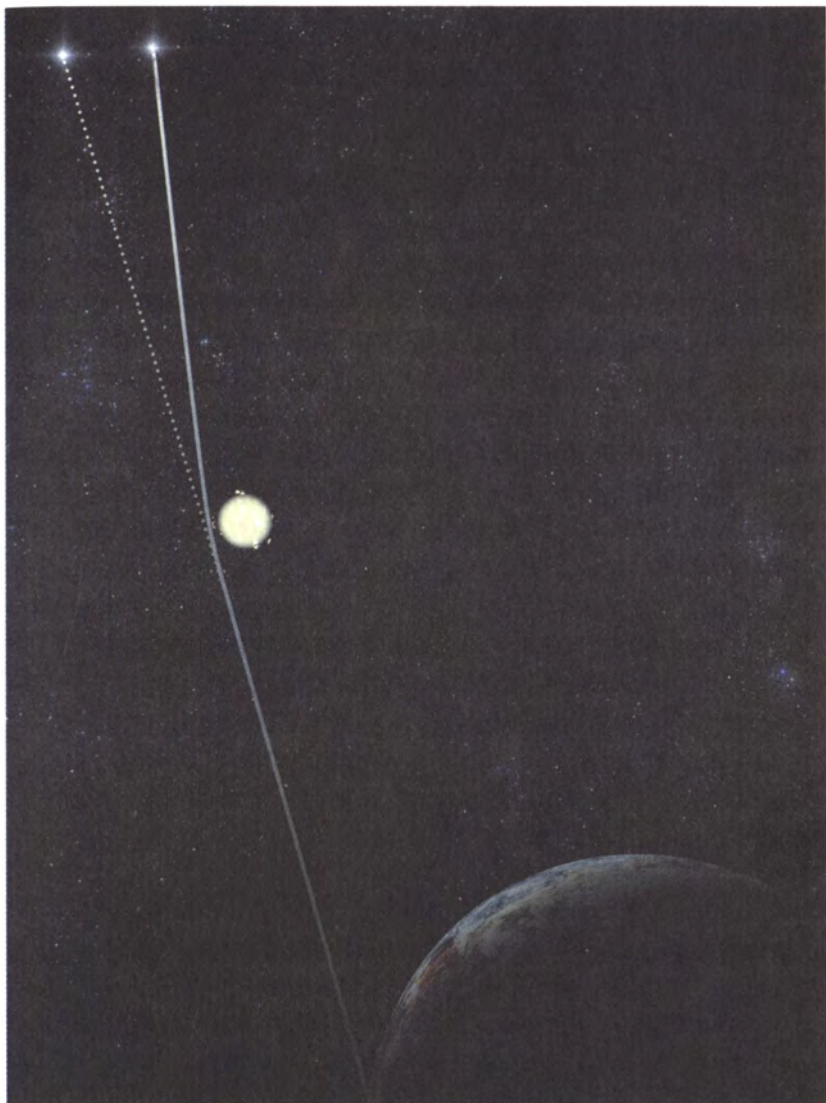
Значить, світло далекої зорі, коли йому випаде пройти поруч із Сонцем, відхилиться на невеликий кут, а отже, спостерігач на Землі побачить зорю не зовсім там, де вона насправді перебуває.



Прецесія орбіти Меркурія

Звісно, якби світло зорі завжди проходило близько до Сонця, ми не змогли б з'ясувати, чи відхиляється промінь світла, чи зоря й справді розташована там, де ми, як здається, її бачимо. Однак оскільки Земля рухається по орбіті, то позаду Сонця опиняються різні зорі. Їхнє світло відхиляється, унаслідок чого змінюється видиме положення щодо інших зір.

За звичайних умов спостерігати цей ефект дуже важко, бо світло Сонця затьмарює зорі, розташовані поблизу нього на



Викривлення променів світла поблизу Сонця

небі. Утім зробити це можна під час сонячних затемнень, коли Місяць «переходить дорогу» сонячним променям. Гіпотезу Ейнштейна про відхилення світла годі було перевірити відразу ж, тобто 1915 року, адже точилася Перша

світова війна. Тільки 1919 року британська експедиція, що спостерігала затемнення Сонця в Західній Африці, підтвердила, що Сонце таки відхиляє світло, як і передбачав Ейнштейн. Цей внесок британської науки в доведення німецької теорії світ привітав тоді як символ примирення двох країн після війни. За іронією долі, коли світлини, зроблені експедицією, згодом перевірили, з'ясувалося, що похибки вимірювань не поступалися за величиною ефекту, який намагалися виміряти. Цей збіг був щасливою випадковістю, а можливо, дослідники заздалегідь знали, якого результату мають досягти, — таке в науці трапляється часто-густо. Згодом відхилення світла, однак, вдалося з високою точністю підтвердити на підставі численних спостережень.

Ще одне передбачення загальної теорії відносності полягає в тому, що біля масивних тіл, таких як Земля, час має сповільнювати плин. Цього висновку Ейнштейн дійшов іще 1907 року, за п'ять років до того, як зрозумів, що гравітація змінює форму простору, і за вісім років до того, як остаточно сформулював свою теорію. Він обчислив величину цього ефекту, виходячи з принципу еквівалентності, який відіграє в загальній теорії відносності ту ж таки роль, що й принцип відносності — у спеціальній теорії.

Нагадаємо, що, згідно з основним постулатом спеціальної теорії відносності, усі фізичні закони однакові для всіх неспинних у русі спостерігачів незалежно від їхньої швидкості. Грубо кажучи, принцип еквівалентності поширює це правило й на тих спостерігачів, які рухаються не вільно, а під дією гравітаційного поля. Точне формулювання цього принципу містить низку технічних застережень. Наприклад, якщо гравітаційне поле неоднорідне, то застосовувати принцип слід окремо до рядів невеликих перекриваних однорідних полів-«латок», проте не будемо цим журитися. Для наших цілей принцип еквівалентності можна сформулювати так:

на досить малих ділянках простору годі розмірковувати про те, чи перебуваєте ви в стані спокою в гравітаційному полі або ж рухаєтеся з постійним прискоренням у вакуумі.

Уявіть, що ви перебуваєте в ліфті посеред порожнечі. Жодної гравітації, ні «верху», ні «низу» не існує. Ви пливете собі вільно. Потім ліфт починає рухатися, набуваючи постійного прискорення. Ви раптово відчуваєте вагу. Тобто вас притискає до однієї зі стінок ліфта, яка на мить здається підлогою. Якщо ви візьмете яблуко й відпустите його, воно впаде на підлогу. Фактично тепер, коли ви рухаєтеся з прискоренням, усередині ліфта все відбуватиметься точнісінько так само, як якби підйомник лишався непорушним в однорідному гравітаційному полі. Ейнштейн зрозумів, що, подібно до того як, перебуваючи у вагоні поїзда, ви не можете сказати, чи стоїть він, чи рівномірно рухається, так і перебуваючи всередині ліфта, ви неспроможні визначити, чи переміщається він із постійним прискоренням, чи перебуває в однорідному гравітаційному полі. Результатом цього розуміння став принцип еквівалентності.

Принцип еквівалентності й наведений приклад його дії будуть справедливі лише в тому разі, коли інертна маса (її бере до уваги другий закон Ньютона, що визначає, якого прискорення надає тілу прикладена до нього сила) і гравітаційна маса (її включає закон тяжіння Ньютона, який визначає величину гравітаційного тяжіння) суть одне й те саме (див. розділ 4). Якщо ці маси однакові, то всі тіла в гравітаційному полі падатимуть із тим самим прискоренням незалежно від маси. Якщо ж ці дві маси не еквівалентні, тоді деякі тіла під впливом гравітації падатимуть швидше за інші й це дозволить відрізнити дію тяжіння від рівномірного прискорення, за якого всі предмети падають однаково. Те, що Ейнштейн використав еквівалентність інертної й гравітаційної мас для виведення принципу

еквівалентності і, врешті-решт, усієї загальної теорії відносності, це безпрецедентний в історії людської думки приклад завзятого й послідовного розвитку логічних висновків.

Тепер, познайомившись із принципом еквівалентності, можемо простежити хід міркувань Ейнштейна, виконавши інший уявний експеримент, який показує, чому гравітація впливає на час. Уявіть ракету, що летить у космосі. Для зручності вважатимемо, що її корпус такий довгий, що світлу потрібна ціла секунда, щоб пройти вздовж нього згори вниз. І нарешті, припустімо, що в ракеті сидять два спостерігачі: один — нагорі, під стелею, а другий — унизу, на підлозі, і в обох є однакові годинники, що відлічують секунди.

Вважатимемо, що верхній спостерігач, дочекавшись, поки його годинник відлічить секунду, відразу ж посилає нижньому світловий сигнал. Годинник відлічує другу секунду, і верхній спостерігач знову сигналізує про це вниз. У наших умовах, аби досягти нижнього спостерігача, сигналу потрібна секунда. Оскільки верхній спостерігач посилає два світлові сигнали з інтервалом в одну секунду, то й нижній зареєструє їх із таким самим інтервалом.

Що зміниться, якщо в цьому експерименті замість вільно плисти в космосі, ракета стоятиме на Землі, перебуваючи під дією гравітації? Згідно з теорією Ньютона, гравітація ані на йоту не змінить ситуацію: якщо верхній спостерігач передаватиме сигнали з інтервалом у секунду, то нижній отримуватиме їх із тим-таки інтервалом. Але принцип еквівалентності передбачає інший розвиток подій. Який саме, ми зможемо зрозуміти, якщо, згідно з принципом еквівалентності мислення, замінимо дію гравітації на постійне прискорення. Це один із прикладів того, як Ейнштейн використовував принцип еквівалентності, створюючи свою нову теорію гравітації.

Отже, припустимо, що наша ракета прискорюється. (Вважатимемо, що прискорюється вона повільно, тож швидкість ракети не наближається до швидкості світла!) Оскільки корпус ракети рухається вгору, то першому сигналу потрібно буде пройти меншу відстань, ніж раніше (до початку прискорення), і до нижнього спостерігача він дійде швидше, ніж через секунду. Якби ракета рухалася з постійною швидкістю, то й другий сигнал надійшов би рівно настільки ж раніше, тож секундний інтервал між двома сигналами не змінився. Проте тієї миті, коли надсилають другий сигнал, завдяки прискоренню ракета рухається швидше, ніж у момент відправлення першого, тож другий сигнал подолає меншу відстань, ніж перший, і на це йому знадобиться ще менше часу. Нижній спостерігач, глянувши на свій годинник, зафіксує, що інтервал між сигналами менший від секунди, і не погодиться з верхнім спостерігачем, який стверджує, що надсилав сигнали точно через секунду.

У випадку зі щораз швидшою ракетою в цьому ефекті, імовірно, немає нічого дивного. Зрештою, ми його щойно пояснили! Але згадайте: принцип еквівалентності каже, що те саме має місце, коли ракета перебуває в гравітаційному полі. Це означає, що навіть якщо ракета не прискорюється, а, наприклад, стоїть на стартовій платформі на поверхні Землі, сигнали, надіслані верхнім спостерігачем з інтервалом у секунду (згідно з його годинником), доходять до нижнього спостерігача з меншим інтервалом (за його годинником). От тобі й на!

Можна запитати: «Чи означає це, що гравітація змінює плин часу, чи вона просто псує годинники?» Припустимо, що нижній спостерігач піднімається вгору, де він і його партнер звіряють свої годинники. Оскільки годинники ідентичні, то, найпевніше, спостерігачі переконуються, що секунди, які відміряють обидва годинники, збігаються.

Тобто з годинником у нижнього спостерігача все гаразд. Хоч би де годинник опинився, він завжди вимірює плин часу в поданому місці.

Подібно до того, як спеціальна теорія відносності говорить нам, що час іде по-різному для спостерігачів, які рухаються один щодо одного, загальна теорія відносності оголошує, що час спливає для кожного зі спостерігачів, які перебувають у різних гравітаційних полях, по-своєму. Згідно із загальною теорією відносності нижній спостерігач реєструє коротший інтервал між сигналами, бо ж біля поверхні Землі через сильнішу гравітацію час спливає повільніше. Що сильніше гравітаційне поле, то більший цей ефект. Закони руху Ньютона поклали край ідеї абсолютного положення в просторі. Теорія відносності, як ми бачимо, позбулася абсолютного часу.

Описане передбачення перевірили 1962 року за допомогою пари дуже точних годинників, встановлених на вершині й біля підніжжя водонапірної вежі. З'ясувалося, що годинники біля підніжжя, які були ближчими до Землі, ідуть повільніше — достеменно так, як указує загальна теорія відносності. Цей ефект невеликий: годинник, розташований на поверхні Сонця, лише на хвилину в рік обганяв би такий самий годинник на Землі. Однак із появою надточних навігаційних систем, які отримують сигнали від супутників, різниця ходу годинників на різних висотах набула практичного значення. Якби апаратура ігнорувала передбачення загальної теорії відносності, визначаючи положення, вона помилялася б на кілька кілометрів!

Наш біологічний годинник так само реагує на зміни плину часу. Якщо один із близнюків живе на вершині гори, а другий — біля моря, перший старітиме швидше. І якщо їм доведеться зустрітися знову, з'ясується, що один із них

старший. У цьому разі різниця віку буде із заячий скік, але вона істотно зросте, коли незабаром один із близнюків вирушить у тривалу подорож на космічному кораблі, який розганяється до швидкості, близької до світлової. Коли мандрівник повернеться, він буде куди молодший за брата, що залишився на Землі. Цей випадок відомий як «парадокс близнят», але парадоксом він є тільки для тих, хто підсвідомо тримається за ідею абсолютного часу. У теорії відносності немає жодного унікального абсолютного часу — у кожного індивідуума є своя власна мірка часу, яка залежить від того, де він перебуває і як рухається.

До 1915 року простір і час сприймали як нерухому арену. Утім події, які на ній розгорталися, на саму арену ніяк не впливали. Це можна сказати навіть про спеціальну теорію відносності. Тіла рухалися, сили притягували або відштовхували, а час і простір просто тривали, не зазнаючи впливу. Логічним видавалося, що простір і час були й будуть завжди. Однак поява загальної теорії відносності докорінно змінила ситуацію. Простір і час наразі перетворилися на динамічні величини: коли переміщуються тіла або діють сили, вони спричиняють викривлення простору й часу, а структура простору-часу, своєю чергою, позначається на русі тіл і дії сил. Простір і час не тільки впливають на все, що діється у Всесвіті, а й самі від усього цього залежать. Як неможливо говорити про події у Всесвіті поза поняттями простору й часу, так після появи загальної теорії відносності було б безглуздо говорити про простір і час поза межами Всесвіту. За десятиліття, що минули з 1915 р., це нове розуміння простору й часу радикально змінило нашу картину світу. Як ви дізнаєтеся далі, давня ідея про незмінну світобудову назавжди поступилася місцем образу динамічного, щораз ширшого Всесвіту, яка, здається, з'явилася в певний момент у минулому і, можливо, у майбутньому в певний момент зникне як дим.

РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

Якщо поглянути на небо ясної безмісячної ночі, то найяскравішими об'єктами, певно, будуть планети Венера, Марс, Юпітер і Сатурн. А ще в око впадуть міріади зір, схожих на наше Сонце, але розташованих набагато далі від нас. Деякі з цих нерухомих зір справді ледь помітно зміщуються одна щодо одної мірою того, як Земля обертається навколо Сонця. Ніякі вони не нерухомі! Відбувається це тому, що лежать такі зорі порівняно близько до нас. Унаслідок руху Землі навколо Сонця ми бачимо ці ближчі зорі на тлі дальших із різних точок зору.

Той-таки ефект наявний, коли ви їдете на авто, а дерева біля дороги наче змінюють своє положення на тлі ландшафту, що посувається до горизонту. Що ближче дерева, то більше впадає в око, як вони рухаються. Така зміна відносного положення називається паралаксом. У випадку із зорями це справжня удача для людства, бо паралакс дозволяє безпосередньо виміряти відстань до них.

Найближча зоря, Проксима Центавра, перебуває на відстані приблизно чотири світлові роки, або сорок мільйонів мільйонів кілометрів, від Землі. Більшість інших зір, які можна побачити неозброєним оком, лежать у межах декількох сотень світлових років від нас. Для порівняння: від Землі

до Сонця лише вісім світлових хвилин! Зорі розкидані по всьому нічному небі, але помітно сконцентровані вони в смугі, яку ми називаємо Чумацьким Шляхом. Уже 1750 року деякі астрономи висловлювали припущення, що вигляд Чумацького Шляху можна пояснити, якщо вважати, що більшість видимих зір зібрані в дископодібну конфігурацію на кшталт тих, що ми тепер називаємо спіральними галактиками. Тільки через кілька десятиліть англійський астроном Вільям Гершель підтвердив справедливість цієї ідеї, старанно підраховувавши кількість зір, які можна розгледіти в телескоп на різних ділянках неба. Утім, повне визнання ця ідея здобула лише у XX столітті. Тепер ми знаємо, що Чумацький Шлях — наша Галактика — розкинувся приблизно на сто тисяч світлових років і повільно обертається; зорі в його спіральних рукавах роблять один оберт навколо центра Галактики за кількасот мільйонів років. Наше Сонце — звичайнісінька жовта зоря середніх розмірів — розташоване біля внутрішнього краю одного зі спіральних рукавів. Безумовно, ми подолали довгий шлях від часів Аристотеля й Птолемея, коли люди вважали Землю центром Всесвіту!

Сучасна картина Всесвіту бере початок у 1924 році, коли американський астроном Едвін Габбл довів, що Чумацький Шлях не єдина галактика. Він відкрив, що існує безліч інших зоряних систем, розділених широкими смугами порожнього простору. Щоб підтвердити це, Габблу треба було визначити відстань від Землі до інших галактик. Але галактики лежать так далеко, що, на відміну від найближчих зір, справді здаються нерухомими. Оскільки Габбл не мав змоги використовувати паралакс для вимірювання відстаней до галактик, то змушений був застосувати непрямі методи оцінювання відстаней. Очевидною мірою відстані до зорі є її яскравість. Але видима яскравість залежить не тільки від відстані до зорі, але й від її світності —

кількості випромінюваного світла. Тьмяна, але близька до нас зоря затьмарить найяскравіше світило із віддаленої галактики. Тому, щоб послуговуватися видимою яскравістю як мірою відстані, ми повинні знати світність зорі.

Світність найближчих зір можна розрахувати за їхньою видимою яскравістю, адже завдяки паралаксу ми знаємо відстань до цих зір. Габбл зауважив, що близькі зорі можна класифікувати за характером випромінюваного ними світла. Зорі одного класу завжди мають однакову світність. Далі науковець припустив, що якщо ми виявимо зорі цих класів у далекій галактиці, то їм можна приписати ту саму світність, яку мають подібні зорі поблизу нас. За наявності такої інформації, нескладно вирахувати відстань до галактики. Якщо ми зробимо це із силою-силенною зір в одній галактиці й наші розрахунки дадуть ту саму відстань, то можемо бути впевненими в правильності нашої оцінки. У такий спосіб Едвін Габбл обчислив відстані до дев'яти різних галактик.

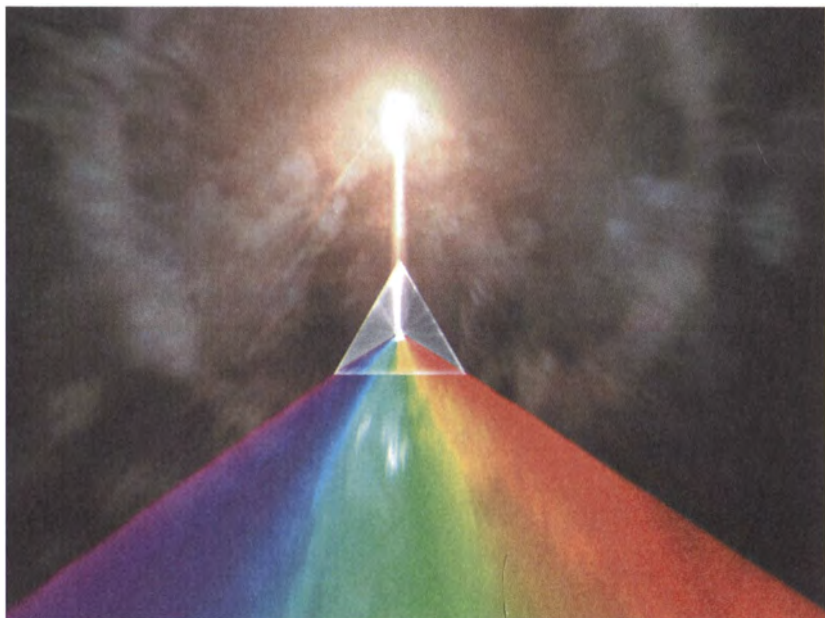
Сьогодні ми знаємо, що зорі, які можна розгледіти неозброєним оком, становлять мізерну частку від усіх зір. Ми бачимо на небі приблизно 5000 зір — лише близько 0,0001 % від усіх зір нашої Галактики — Чумацького Шляху. А Чумацький Шлях — лише одна з понад ста мільярдів галактик, які можна спостерігати в сучасні телескопи. І кожна галактика містить десь сотні мільярдів зір. Якби зоря була крупинкою солі, то всі зорі, видимі неозброєним оком, умістилися б у чайній ложці, проте зорі всього Всесвіту утворили б кулю діаметром понад 13 кілометрів.

Зорі такі далекі від нас, що здаються світними цятками. Нам не під силу визначити їхній розмір або форму. Але, як зауважив Габбл, є чимало різних типів зір, і ми можемо розрізняти їх за кольором випромінювання. Ньютон виявив, що,



Паралакс

якщо сонячне світло пропустити через тригранну скляну призму, воно розділиться на складові кольори, як у веселці.

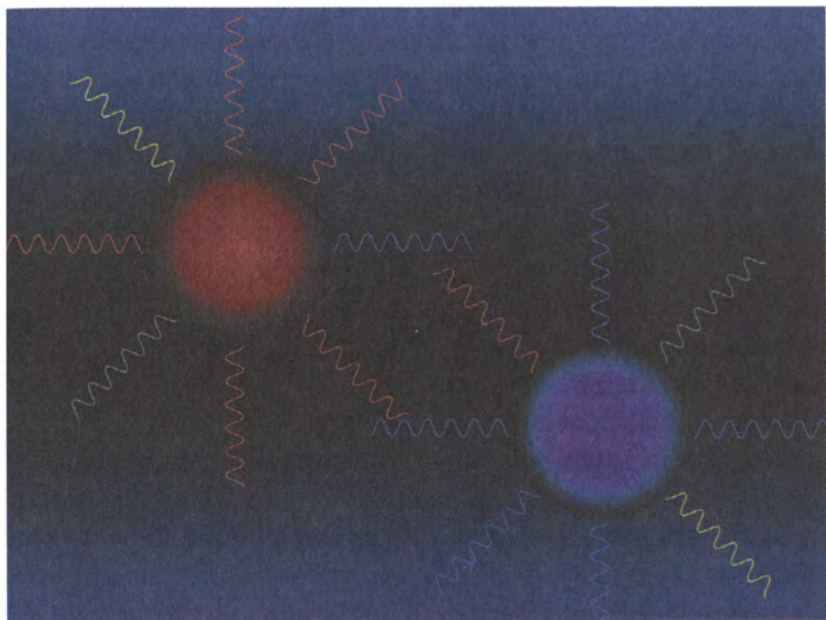


Зоряний спектр

Відносна інтенсивність різних кольорів випромінювання, що його випускає якесь джерело світла, називається його спектром. Фокусуючи телескоп на окремій зорі або галактиці, можемо досліджувати спектр випромінюваного ними світла.

Одна річ, про яку нам розповідає випромінювання тіла, — це його температура. 1860 року німецький фізик Густав Кірхгоф установив, що будь-яке матеріальне тіло, наприклад зоря, нагріваючись, випромінює світло або випускає інше проміння на кшталт розпеченого вугілля. Світіння нагрітих тіл обумовлене тепловим рухом атомів усередині них. Це називається випромінюванням чорного тіла (попри те що самі нагріті тіла не є чорними). Спектр ви-

промінювання чорного тіла важко з чим-небудь переплутати: він має характерний вигляд, який змінюється зі зміною температури.

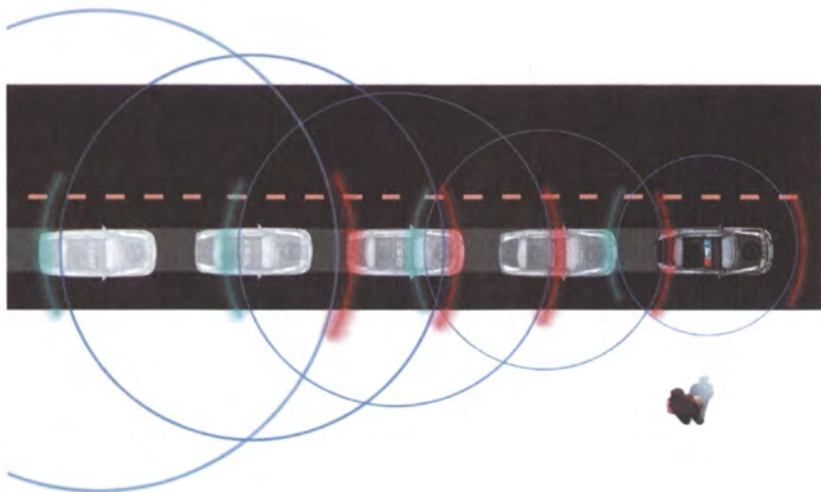


Спектр випромінювання чорного тіла

Тому випромінювання нагрітого тіла нагадує покази термометра. Спостережуваний спектр випромінювання різних зір завжди схожий на випромінювання чорного тіла, це щось на кшталт зоряної візитівки із зазначенням її температури.

Якщо уважно вивчити зоряне світло, воно повідомить іще більше інформації. Ми виявимо відсутність деяких окремих кольорів, причому в різних зір вони будуть різними. І оскільки ми знаємо, що кожен хімічний елемент поглинає характерний для нього набір кольорів, то, порівнюючи ці кольори з тими, яких у спектрі зорі бракує, зможемо точно визначити, які елементи наявні в її атмосфері.

У 1920-ті роки, коли астрономи заходилися вивчати спектри зір в інших галактиках, їм пощастило виявити дещо дуже цікаве — ті самі характерні набори відсутніх кольорів, що й у зір у нашій галактиці, але всі вони були зміщені до червоного кінця спектра, причому в однаковій пропорції. Фізикам зміщення кольору або частоти відомі як ефект Доплера. Ми всі знайомі з тим, як це явище впливає на звук. Прислухайтесь до того, як вулицею їде автівка. Коли вона наближається, звук двигуна або гудка звучить дедалі вище, а тільки-но авто проїде й мчатиме від нас, висота звуку буде знижуватися. Поліцейський автомобіль, що їде до нас зі швидкістю 100 кілометрів за годину, розвиває приблизно десяту частку швидкості звуку. Звук його сирени являє собою хвилю — чергування гребенів і западин. Нагадаємо, що відстань між найближчими гребенями (або западинами) називається довжиною хвилі. Що менша довжина хвилі, то більше число коливань досягає нашого вуха щосекунди й то вищий тон, або частота, звуку. Ефект Доплера зумовлений тим, що автомобіль, який під'їздить, випускаючи кожен наступний



Ефект Доплера

гребінь звукової хвилі, перебуватиме щоразу ближче до нас, і через це відстані між гребенями виявляться меншими, ніж якби автівка стояла на місці. Це означає, що довжини хвиль, які досягають нас, зменшуються, а їхня частота збільшується.

І навпаки, якщо авто віддаляється, довжина хвиль, які ми вловлюємо, збільшується, а їхня частота зменшується. І що швидше пересувається автомобіль, то сильнішим виявляється ефект Доплера, що дозволяє використовувати його для вимірювання швидкості.

Схоже поводитися світло й радіохвилі. Поліція використовує ефект Доплера для визначення швидкості автомобілів шляхом вимірювання довжини хвилі відбитого від них радіосигналу. Світло являє собою коливання, або хвилі, електромагнітного поля. Як ми зазначали в розділі 5, довжина хвилі видимого світла просто мізерна — від 40 до 80 мільйонних часток метра. Людське око сприймає світлові хвилі різної довжини як різні кольори, причому найбільшу довжину мають хвилі, що відповідають червоному кінцю спектра, а найменшу — ті, які належать до синього. Тепер уявіть джерело світла, розташоване на постійній відстані від нас, наприклад зорю, що випускає світлові хвилі певної довжини. Довжина реєстрованих хвиль буде такою самою, як у випромінюваних. Але припустімо тепер, що джерело світла посунулося геть від нас. Як й у випадку зі звуком, це призведе до збільшення довжини хвилі світла, а значить, спектр зміститься в бік червоного кінця.

Довівши існування інших галактик, Габбл займався визначенням відстаней до них і спостереженням їхніх спектрів. У той час здебільшого припускали, що галактики рухаються безладно, і очікували, що кількість спектрів, зміщених у синій кінець, буде приблизно таким самим, як

кількість зміщених у червоний. Тому цілковитою несподіванкою стало відкриття того, що спектри більшості галактик демонструють червоне зміщення — майже всі зоряні системи віддаляються від нас! Ще більший подив викликало оприлюднене 1929 року відкриття Габбла, що величина червоного зміщення галактик не випадкова, а прямо пропорційна відстані від них до нас. Інакше кажучи, що далі від нас галактика, то швидше вона «тікає»! Звідси випливало, що Всесвіт не може бути статичним, незмінним за розмірами, як вважали раніше. Насправді він розширюється: відстань між галактиками невідпинно зростає.

Усвідомлення того, що Всесвіт розширюється, зробило справжню революцію в головах, одну з найбільших у XX столітті. Коли озираєшся назад, може здатися дивним, що ніхто не додумався до цього раніше. Ньютон та інші великі уми мали зрозуміти, що статичний Усесвіт був би нестабільним. Навіть якщо в певний момент він виявився б нерухомим, взаємне притягання зір і галактик швидко змусило б його стискатися. Навіть якби Всесвіт відносно повільно розширювався, гравітація врешті-решт поклала б край цьому розширенню й спричинила б стиснення. Однак, якщо швидкість розширення Всесвіту сягає понад певну критичну позначку, гравітація ніколи не зможе його зупинити й Усесвіт розширюватиметься вічно. Тут проглядається віддалена схожість із ракетою, що злітає з поверхні Землі. За відносно малої швидкості тяжіння зрештою зупинить ракету, і вона почне падати на Землю. Водночас, якщо швидкість ракети вища за критичну (понад 11,2 кілометра за секунду), тяжіння не зможе її утримати, і вона назавжди залишить Землю.

Спираючись на теорію тяжіння Ньютона, могли передбачити таку поведінку Всесвіту в будь-який момент у XIX або XVIII столітті, і навіть наприкінці XVII. Однак віра

в статичний Усесвіт була настільки сильною, що омана тривала до початку ХХ століття. Навіть Ейнштейн був настільки впевнений у цьому, що 1915 року видозмнив загальну теорію відносності, штучно додавши в рівняння особливий член, який дістав назву космологічної сталої й забезпечував статичність Усесвіту. Космологічна стала виявлялась як дія якоїсь нової сили — «антигравітації», що, на відміну від інших сил, не мала жодного певного джерела, а просто була невід'ємною властивістю простору-часу. Під впливом цієї сили простір-час виявляв «вроджену» тенденцію до розширення. Добираючи величину космологічної сталої, Ейнштейн міг варіювати силу цієї тенденції. За її допомогою науковець зумів точно врівноважити взаємне тяжіння всієї наявної у світі матерії й отримати в результаті статичний Усесвіт.

Згодом Ейнштейн відкинув ідею космологічної сталої, визнавши її своєю «найбільшою помилкою». Як ми невдовзі переконаємося, сьогодні є підстави вважати, що науковець, можливо, мав-таки рацію, вводячи космологічну сталу. Але найбільше Ейнштейна, мабуть, пригнічувало те, що він дозволив своїй вірі в нерухомий Усесвіт перекреслити висновок про те, що Всесвіт розширюється, — його передбачала власна теорія науковця. Здається, тільки одна людина ладна була сприйняти серйозно цей наслідок загальної теорії відносності. Поки Ейнштейн та інші фізики дошукувалися способу уникнути нестатичності Всесвіту, російський фізик і математик Олександр Фрідман, навпаки, наполягав на тому, що той розширюється.

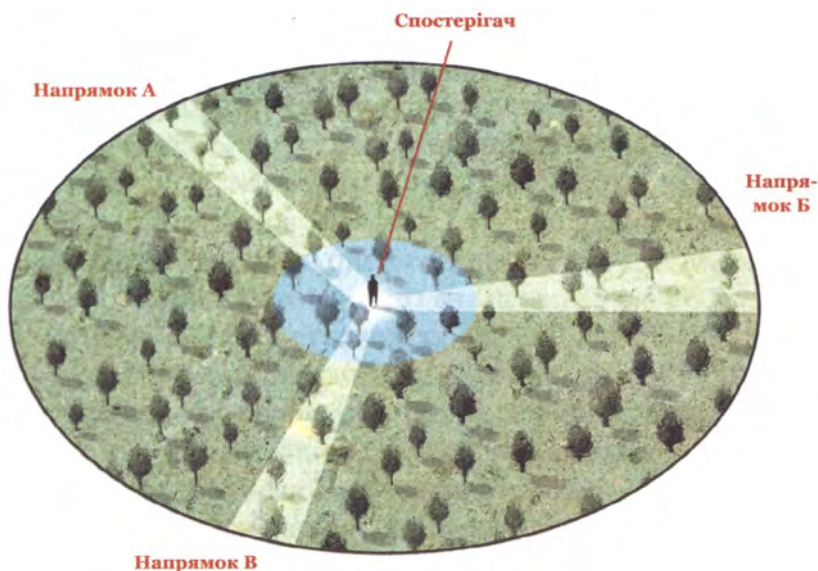
Фрідман зробив щодо Всесвіту два вельми прості припущення: що на вигляд він однаковий, куди б ми не дивилися, і що поданий здогад слушний, хоч би з якої точки ми дивимося на Всесвіт. Спираючись на ці дві ідеї й розв'язавши рівняння загальної теорії відносності, він

довів, що Всесвіт не може бути статичним. Таким чином, 1922 року, за кілька років до відкриття Едвіна Габбла, Фрідман точно передбачив те, що згодом той виявив!

Припущення, що Всесвіт на вигляд скрізь однаковий, не зовсім відповідає дійсності. Наприклад, як ми вже знаємо, зорі нашої Галактики вишиковуються на нічному небі у виразну світлу смугу — Чумацький Шлях. Але якщо ми подивимося на віддалені галактики, схоже, що зорі розподілені на небі більш-менш рівномірно. Тим-то Всесвіт на вигляд приблизно однаковий у будь-якому напрямку, якщо спостерігати його у великому масштабі порівняно з відстанями між галактиками й ігнорувати відмінності в малих масштабах. Уявіть, що ви перебуваєте в лісі, де дерева ростуть довільно. Подивившись в одному напрямку, ви побачите найближче дерево за метр від себе. У другому напрямку поряд буде дерево на відстані трьох метрів. У третьому ви побачите відразу кілька дерев за метр-два-три від себе. Не схоже, щоб ліс був хоча б десь однаковий на вигляд. Але якщо взяти до уваги всі дерева в радіусі кілометра й усереднити такі відмінності, ви побачите, що ліс однаковий в усіх напрямках.

Протягом тривалого часу однорідний розподіл зір був достатньою підставою для прийняття фрідманівської моделі як першого наближення до реальної картини Всесвіту. Але згодом щасливий випадок допоміг знайти ще одне підтвердження того, що припущення Фрідмана, на диво, точно описує Всесвіт. 1965 року два американські фізики, Арно Пензіас і Роберт Вільсон із «Bell Telephone Laboratories»¹ у Нью-Джерсі, налаштовували дуже чутливий

¹ Відома американська корпорація, створена 1925 року шляхом злиття та централізації науково-дослідних відділів компаній «AT&T» і «Western Electric». З 1996 року дослідницький підрозділ «Lucent Technologies». Потужний дослідницький центр у царині телекомунікацій, електронних та комп'ютерних систем.

*Ізотропний ліс*

мікрохвильовий приймач. (Мікрохвилями називають випромінювання з довжиною хвилі близько сантиметра.) Пензіасу й Вільсону не давало спокою те, що приймач реєстрував більший рівень шуму, ніж вони очікували. Науковці виявили на антені пташиний послід й усунули інші потенційні причини збоїв, але невдовзі вичерпали всі можливі джерела перешкод. Шум відзначався тим, що не припинявся ні вдень ні вночі протягом цілого року, хай там як Земля оберталася навколо своєї осі й Сонця. Оскільки рух Землі спрямовував приймач у різні сектори космосу, то Пензіас і Вільсон вирішили, що шум приходить із-за меж Сонячної системи й навіть із-за меж Галактики. Здавалося, він ішов рівною мірою з усіх куточків космосу. Нині ми знаємо, що, хоч би куди був спрямований приймач, цей шум залишається постійним, окрім мізерно малих варіацій. Так Пензіас і Вільсон випадково натрапили на дивовижний приклад, який доводив першу гіпотезу Фрідмана.

Звідки ж брався цей космічний фоновий шум? Приблизно в той-таки час, коли Пензіас і Вільсон досліджували загадковий шум у приймачі, двоє американських фізиків із Принстонського університету, Боб Дік і Джим Піблс, теж зацікавилися мікрохвилями. Вони вивчали припущення Джорджа Ґамова (у минулому студента Олександра Фрідмана) про те, що на ранніх стадіях розвитку Всесвіт був вельми густий і добіла розпечений. Дік і Піблс вважали, що якщо це так, то ми нібито можемо спостерігати світіння раннього Всесвіту, адже світло з дуже далеких областей космосу приходить до нас тільки зараз. Однак через розширення Всесвіту це світло, либонь, настільки зміщене в червоний кінець спектру, що перетворюється з видимого випромінювання на мікрохвильове. Дік і Піблс якраз збиралися шукати це випромінювання, коли, почувши про їхню працю, Пензіас і Вільсон збагнули, що вже знайшли його. За цю знахідку Пензіас і Вільсон були 1978 року відзначені Нобелівською премією (чим, здається, дещо образили Діка й Піблса, не кажучи вже про Ґамова).

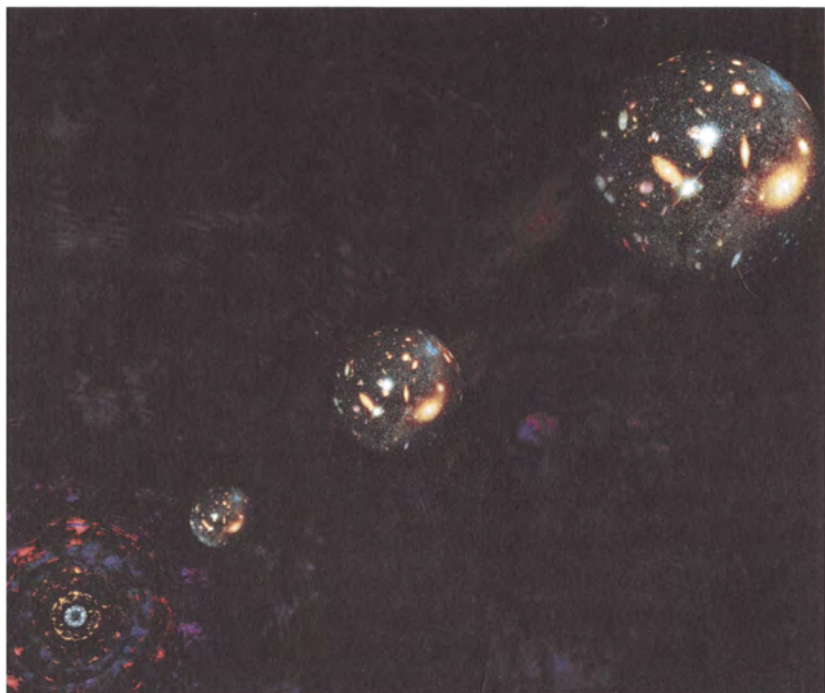
На перший погляд той факт, що Всесвіт на вигляд усюди однаковий, свідчить про те, що ми посідаємо в ньому якесь особливе місце. Зокрема, може здатися, що коли всі галактики віддаляються від нас, то ми десь-таки перебуваємо в центрі Всесвіту. Є, однак, інше пояснення цього феномена: Всесвіт може також мати однаковий вигляд у всіх напрямках, якщо дивитися на нього з будь-якої іншої галактики. Якщо ми пригадаємо, саме в цьому й полягало друге припущення Фрідмана.

У нас немає жодних наукових аргументів за й проти другої гіпотези Фрідмана. Сто років тому християнська церква визнала б її єретичною, адже церковна доктрина стверджувала, що Земля посідає особливе місце в центрі світо-

будови. Але сьогодні ми приймаємо це припущення Фрідмана з майже протилежних міркувань, переймаючись чимось на кшталт скромності: нам здалося б абсолютно дивовижним, якби Всесвіт був на вигляд скрізь однаковим тільки для нас, але не для інших спостерігачів у Всесвіті!

Згідно з фрідманівською моделлю Всесвіту, усі галактики віддаляються одна від одної. Щось таке відбувається, коли надувають повітряну кулю й кольорові плями на її поверхні розповзаються. Оскільки куля збільшується, то збільшуються й відстані між будь-якими двома плямами, але при цьому жодну з плям не можна вважати центром розширення. А якщо радіус повітряної кулі постійно збільшується, то чим далі одна від одної розташовані плями на її поверхні, тим швидше вони «тікатимуть» у процесі розширення. Припустімо, що радіус повітряної кулі щосекунди подвоюється. Тоді дві плями, розділені спочатку відстанню в один сантиметр, за секунду опиняться вже на відстані двох сантиметрів одна від одної (якщо вимірювати вздовж поверхні повітряної кулі), тож їхня відносна швидкість становитиме сантиметр за секунду. Разом із тим дві цятки, що їх розділяли 10 сантиметрів, за секунду після початку розширення розійдуться на 20 сантиметрів, тож їхня відносна швидкість становитиме 10 сантиметрів за секунду.

Точно так само в моделі Фрідмана швидкість, з якою будь-які дві галактики віддаляються одна від одної, пропорційна відстані між ними. Відповідно модель передбачає, що червоне зміщення галактики має бути прямо пропорційним її відстані від нас. Це та сама залежність, яку згодом виявив Габбл. Хоча Фрідману вдалося запропонувати вдалу модель і передбачити результати спостережень Габбла, його праця залишалася майже невідомою на Заході, поки 1935 року аналогічну модель



Розширення «повітряної кулі» Всесвіту

не запропонували американський фізик Говард Робертсон і британський математик Артур Вокер, ґрунтуючись на відкритті розширення Всесвіту, яке зробив Габбл.

Фрідман запропонував тільки одну модель Всесвіту. Але якщо його припущення справедливі, рівняння Ейнштейна допускають три класи розв'язків, тобто існує три різні типи фрідманівських моделей і три різні сценарії розвитку Всесвіту.

Перший клас розв'язків (той, який знайшов Фрідман) передбачає, що розширення Всесвіту відбувається досить повільно, через що тяжіння між галактиками поступово вповільнює й врешті-решт зупиняє його. Після цього галактики починають зближуватися, а Всесвіт — стиска-

тися. Згідно з другим класом розв'язків, Усесвіт розширюється так швидко, що гравітація лише трохи сповільнить його, але ніколи не зможе зупинити. Нарешті, є третій клас розв'язків, згідно з яким Усесвіт розширюється якраз із такою швидкістю, щоб лише уникнути стиснення. З часом швидкість розльоту галактик дедалі зменшується, але ніколи не досягає нуля.

Дивовижна особливість першої моделі Фрідмана — те, що в ній Усесвіт не безкрайній, але при цьому в просторі ніде немає жодного кордону. Гравітація така сильна, що простір загнуто й замкнено на собі. Це певною мірою схоже на поверхню Землі, яка теж скінченна, але не має меж. Якщо рухатися по поверхні Землі в певний бік, то ніколи не натрапиш на нездоланий бар'єр або край світу, проте врешті-решт повернешся туди, звідки почав шлях. У першій моделі Фрідмана простір влаштовано точно так само, але в трьох вимірах, а не у двох, як у випадку з поверхнею Землі. Ідея про те, що можна обійти Всесвіт і повернутись у вихідний пункт, — річ гарна для наукової фантастики, але практичного значення не має, адже, як можна довести, Усесвіт стиснеться в точку, перш ніж мандрівник повернеться туди, звідки вирушив. Усесвіт такий великий, що потрібно рухатися швидше за світло, щоб устигнути закінчити мандрівку там, де ви її почали, а такі швидкості заборонені¹. У другій моделі Фрідмана простір також викривлено, але в інший спосіб. І тільки в третій моделі великомасштабна геометрія Всесвіту пласка (хоча простір викривляється поблизу масивних тіл).

Яка з моделей Фрідмана описує наш Усесвіт? Чи припиниться коли-небудь розширення Всесвіту й натомість почнеться стискання? Чи, навпаки, Усесвіт розширюватиметься вічно?

¹ Точніше, їх не допускає теорія відносності.

Виявилося, що відповісти на це запитання важче, ніж науковцям здавалося спочатку. Навіть найбільш поверховий аналіз залежить передусім від двох речей — спостережуваної нині швидкості розширення Всесвіту і його сьогоденної середньої густини (кількості матерії, що припадає на одиницю об'єму простору). Що більша поточна швидкість розширення, то більша гравітація, а значить, і густина речовини, потрібної, щоб зупинити розширення. Якщо середня густина перевищує деяке критичне значення (визначене швидкістю розширення), то гравітаційне тяжіння матерії зможе зупинити розширення Всесвіту й змусити його стискатися — це відповідає першій моделі Фрідмана. Якщо середня густина менша за критичне значення, тоді гравітаційне тяжіння не зможе зупинити розширення й Усесвіт розширюватиметься вічно, як у другій фрідманівській моделі. Нарешті, коли середня густина Всесвіту точно дорівнює критичному значенню, розширення Всесвіту невпинно сповільнюватиметься, дедалі ближче підходячи до статичного стану, але ніколи не досягаючи його. Це підпадає під третю модель Фрідмана.

То яка ж модель правильна? Ми можемо визначити нинішні темпи розширення Всесвіту, якщо виміряємо швидкість, з якою віддаляються від нас інші галактики, використовуючи ефект Доплера. Це можна зробити дуже точно. Однак відстані до галактик відомі не надто добре, адже вимірювати їх ми можемо тільки опосередковано. Тому нам відомо лише те, що Всесвіт розширяється зі швидкістю 5—10 % на мільярд років. Ще більше ми гугимосся в здогадках, коли йдеться про нинішню середню густину Всесвіту. Так, якщо ми складемо маси всіх видимих зір у нашій та інших галактиках, сума буде меншою за соту частку того, що потрібно, щоб зупинити розширення Всесвіту, навіть за найнижчої оцінки швидкості розширення.

Але це далеко не все. Наша та інші галактики, певно, містять значну кількість якоїсь «темної матерії», яку ми не можемо спостерігати безпосередньо, але про існування якої знаємо завдяки її гравітаційному впливу на орбіти зір у галактиках. Можливо, за найкраще свідчення існування темної речовини правлять орбіти зір на периферії спіральних галактик, схожих на Чумацький Шлях. Зорі ці обертаються навколо своїх галактик занадто швидко, щоб їх могло утримувати на орбіті тяжіння самих лише видимих зір галактики. Окрім того, більшість галактик входять до складу скупчень, і ми можемо так само зробити висновок про наявність темної матерії між галактиками в цих скупченнях за її впливом на рух галактик. Насправді кількість темної матерії у Всесвіті значно перевищує кількість звичайної речовини. Якщо врахувати всю темну матерію, ми отримаємо приблизно десяту частину від маси, потрібної для того, щоб покласти край розширенню. Не можна, утім, виключати існування інших, іще не відомих нам форм матерії, розподілених майже рівномірно скрізь у Всесвіті, що могло б підвищити його середню густину. Наприклад, існують елементарні частинки — нейтрино, — які дуже слабо взаємодіють із речовиною і які надзвичайно важко виявити (в одному з нових нейтринних експериментів використовують підземний резервуар, заповнений 50 тисячами тонн води). Вважали, що нейтрино невагомі, тому не спричиняють гравітаційного тяжіння. Проте дослідження кількох останніх років свідчать, що нейтрино таки має мізерно малу масу, яку раніше не вдавалося зафіксувати. Якщо нейтрино мають масу, вони могли б бути однією з форм темної матерії. Тим не менш, навіть з урахуванням такої темної матерії у Всесвіті, схоже, набагато менше речовини, ніж необхідно, щоб зупинити його на шляху розширення. Тим-то більшість фізиків донедавна погоджувалися на думці, що найближча до реальності друга модель Фрідмана.

Потім, однак, з'явилися нові спостереження. За останні кілька років різні групи дослідників вивчали найдрібніші брижі того мікрохвильового фону, який виявили Пензіас і Вільсон. Розміри цих брижів можуть служити індикатором великомасштабної структури Всесвіту. Її характер, схоже, вказує, що Всесвіт таки плаский (як у третій моделі Фрідмана)! Але оскільки сумарної кількості звичайної й темної матерії для цього, здається, недостатньо, фізики теоретично припускали існування іншої, іще не виявленої субстанції — темної енергії.

І неначе для того, щоб ускладнити проблему, нещодавні спостереження засвідчили, що розширення Всесвіту не вповільнюється, а прискорюється. Моделлю Фрідмана тут і не пахне! Це дуже дивно, оскільки наявність у просторі речовини — високої чи низької густини — може тільки сповільнювати розширення, адже гравітація завжди діє як сила тяжіння. Прискорення космічного розширення — це щось на кшталт бомби, яка збирає, а не розсіює енергію після вибуху. Яка сила відповідає за прискорене розширення космосу? Ніхто не може нічого сказати про це. Проте, можливо, Ейнштейн мав-таки рацію, коли увів у свої рівняння космологічну сталу (і відповідний їй ефект антигравітації).

З розвитком нових технологій і появою чудових космічних телескопів ми активно отримуємо нові, дивовижні дані про Всесвіт. І ось гарна свіжа новина: тепер нам відомо, що він і далі розширюватиметься найближчим часом із чимраз більшою швидкістю, а час триватиме вічно, принаймні для тих, кому вистачить розважливості, щоб не потрапити в чорну діру. Але що ж було на світанні? Як починався Всесвіт і що змусило його розширюватися?

ВЕЛИКИЙ ВИБУХ, ЧОРНІ ДІРИ Й ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ

У моделі Фрідмана четвертий вимір Усесвіту — час, — як і простір, має обмежену протяжність. Він подібний до відрізка, що має два кінці або дві граничні точки, тобто має кінець і початок. Фактично всі розв'язки рівнянь Ейнштейна, отримані для тієї кількості матерії, яку ми спостерігаємо у Всесвіті, мають одну дуже важливу загальну характеристику: колись у минулому (приблизно 13,7 мільярда років тому) відстань між сусідніми галактиками, певно, дорівнювала нулю. Інакше кажучи, весь Усесвіт був стиснутий у точку нульового розміру, сферу з нульовим радіусом. Густина Всесвіту й кривизна простору-часу були тоді, либонь, нескінченними. Цей момент ми називаємо Великим Вибухом.

Усі наші космологічні теорії засновані на припущенні, що простір-час гладенький і майже плаский. Це означає, що всі дані теорії порушуються в момент Великого Вибуху, адже простір-час нескінченної кривизни важко назвати майже пласким! Таким чином, якщо щось і передувало Великому Вибуху, воно не допоможе зрозуміти те, що трапилося згодом, бо передбачуваність порушується якраз у момент Великого Вибуху. Відповідно, знаючи тільки те, що трапилося після нього, ми не можемо визначити, що було раніше. Події, які передували Великому Вибуху, не можуть мати жодних наслідків для нас, а отже, під час створення наукової

моделі Всесвіту їх можна не брати до уваги. Ми маємо виключити ці дані зі своєї моделі й вважати, що Великий Вибух поклав початок часу. Питання про те, хто створив умови для Великого Вибуху, і подібні до нього не є науковими.

Ще однією нескінченною величиною у Всесвіті нульових розмірів мала бути температура. Вважають, що в момент Великого Вибуху Всесвіт був аж надто гарячим. Мірою того, як він розширювався, температура випромінювання знижувалася. А оскільки температура є мірою середньої енергії — або швидкості — частинок, охолодження Всесвіту мало, мабуть, серйозні наслідки для матерії. За дуже високих температур частинки рухалися так стрімко, що про їхнє взаємне притягання під дією ядерних або електромагнітних сил годі було говорити, але зі зниженням температури частинки почали притягатись і з'єднуватись одна з одною. Навіть види наявних у Всесвіті частинок залежать від його температури, а значить, і від віку.

Аристотель не вірив, що речовина складається з частинок. Він вважав, що матерія безперервна. За Аристотелем, її можна без кінця ділити на чимраз менші й менші частини й ніколи не натрапити на неподільне «зерня». Утім, деякі давньогрецькі мислителі, наприклад Демокрит, вважали, що матерії властива «зернистість» і що все в природі складається із сили-силенної всіляких атомів. (Слово «атом» в перекладі з грецької означає «неподільний».) Нині ми знаємо, що так воно і є, принаймні в нашому довкіллі й за сьогочасного стану Всесвіту. Але атоми нашого Всесвіту існували не завжди, вони не є неподільними і являють собою лише невеликий відсоток від усього розмаїття частинок у Всесвіті.

Атоми складаються з частинок меншого розміру: електронів, протонів і нейтронів. Протони й нейтрони, своєю чергою, побудовані зі ще крихітніших частинок, які називаються

кварками. Окрім того, кожному типу субатомних частинок відповідають античастинки. Вони мають таку саму масу, але протилежний електричний заряд та інші характеристики. Наприклад, античастинка електрона, що називається позитроном, має позитивний заряд, протилежний негативному заряду електрона. Можливо, існують цілі антисвіти й антилюди, що складаються з античастинок. Щоправда, якщо частинка й античастинка зустрічаються, вони знищують одна одну. Тож, якщо вам доведеться зустріти своє анти-я, ні в якому разі не тисніть йому руку! Адже обое ви — бац! — зникнете в сліпучому спалаху світла.

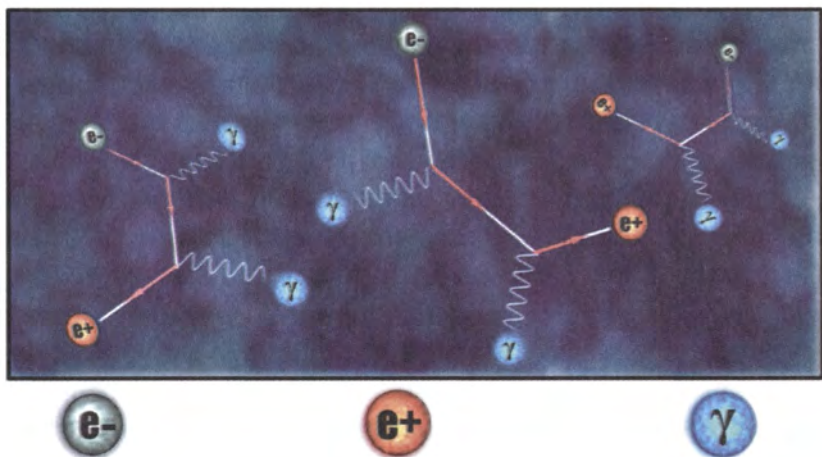
Світлову енергію переносять частинки іншого типу — невагомі фотони. Для Землі найближчим і найбільшим постачальником фотонів служить ядерне горно Сонця. Воно постачає вдосталь й інших частинок — уже згадані нейтрино (і антинейтрино). Але ці надзвичайно легкі частинки майже не взаємодіють із речовиною, тому щосекунди непомітно проходять крізь нас мільярдами. Добре відомо, що фізики виявили десятки типів елементарних частинок. У Всесвіті, що переживає складні еволюційні зміни, набір цих частинок теж еволюціонував. Саме ця еволюція уможливила виникнення планет, подібних до нашої, і живих істот, схожих на нас. Через секунду після Великого Вибуху Всесвіт розширився достатньо, щоб його температура знизилася приблизно до десяти мільярдів градусів Цельсія. Це в тисячу разів більше, ніж у центрі Сонця, але подібні температури відзначали під час вибухів водневих бомб. У той час Усесвіт містив здебільшого фотони, електрони, нейтрино та їхні античастинки, а ще нечисленні протони й нейтрони. При цьому частинки мали таку велику енергію, що, наштотуючись одна на одну, створювали безліч різних пар частинка — античастинка. Наприклад, зіткнення фотонів могло породити електрон і його античастинку — позитрон. Деякі з таких новопосталих

частинок, стикаючись зі своїми близнюками-античастинками, зникали. Щоразу, коли електрон зустрічається з позитроном, вони знищуються, але зворотний процес не такий простий. Для того щоб дві безмасові частинки, такі як фотони, могли породити пару частинка — античастинка, наприклад електрон і позитрон, безмасовим частинкам потрібна певна мінімальна енергія. Електрон і позитрон мають масу, і ця новостворювана маса повинна породжуватися енергією зіштовхуваних частинок. Оскільки Всесвіт розширювався далі й температура знижувалася, до зіткнення частинок, які мають достатню енергію для народження електрон-позитронних пар, доходило чимраз рідше, тоді як куди частіше відбувалося взаємознищення пар.

Урешті-решт більша частина електронів і позитронів взаємно анігілювалися, утворивши більше фотонів і залишивши відносно мало електронів. Нейтрино й антинейтрино, які взаємодіють між собою й з іншими частинками дуже слабо, знищували одне одного не так швидко. Вони, мабуть, і досі кружляють десь навколо нас. Якби ми могли спостерігати їх, це послужило б наочним доказом на користь описаної вище картини гарячого молодого Всесвіту. На жаль, у наші дні енергія цих частинок занадто низька, щоб спостерігати їх безпосередньо (хоча, можливо, їх вдасться виявити опосередковано).

Приблизно за сто секунд після Великого Вибуху Всесвіт охолонув до одного мільярда градусів — температури надр найгарячіших зір. У цих умовах енергії протонів і нейтронів було вже недостатньо для подолання сильної ядерної взаємодії, і вони почали зливатися, утворюючи ядра дейтерію (важкого водню), які містять один протон і один нейтрон. Відтак ядра дейтерію могли, приєднуючи протони й нейтрони, перетворитися на ядра гелію, що складаються з пари протонів і пари нейтронів, а також

породити невелику кількість ядер двох важчих елементів — літію та берилію. Можна підрахувати, що, згідно з теорією гарячого Всесвіту, близько чверті протонів і нейтронів об'єдналося в ядра гелію, причому зберігалася якась децима важкого водню та інших елементів. Нейтрони, які залишилися, у результаті розпаду перетворилися на протони — ядра звичайних атомів водню.



Рівновага фотонів та електрон-позитронних пар

Цю картину первісного гарячого Всесвіту вперше запропонував Джордж Ґамов у відомій праці, яку він написав 1948 року в співавторстві зі своїм учнем Ральфом Альфеном. Ґамов мав неабияке почуття гумору: він додав до списку авторів ім'я фізика-ядерника Ганса Бете, щоб вийшло «Альфер, Бете, Ґамов» на кшталт перших трьох літер грецького алфавіту (альфа, бета, гамма), — краще й не треба, коли йдеться про статтю, присвячену зародженню Всесвіту! У згаданій праці автори зробили чудове передбачення, що випромінювання (у формі фотонів), яке виникло на початкових, гарячих стадіях розвитку Всесвіту, має зберегтися до наших днів, але його температура повинна лише на кілька градусів перевищувати абсолютний нуль.

(Абсолютним нулем вважають температуру -273°C , за якої речовина не містить жодної теплової енергії, а отже, це найнижча з можливих температур.)

Саме це мікрохвильове випромінювання виявили Пензіас і Вільсон 1965 року. Коли Альфер і Гамов опублікували свою статтю, про ядерні реакції між протонами й нейтронами було відомо небагато. Тому передбачення співвідношень різних елементів у ранньому Всесвіті виявилися досить приблизними. Утім згодом, коли вдалося знову провести обчислення з урахуванням нових, точніших даних, з'ясувалося, що результати дуже добре узгоджуються зі спостереженнями. Залишається додати, що в якийсь інший спосіб вельми важко пояснити, чому саме чверть маси Всесвіту припадає на частку гелію.

І все ж описана картина породжує низку проблем. Тривалості ранніх етапів еволюції в моделі Великого Вибуху не вистачає для того, щоб тепло встигло поширитися з одного регіону гарячого Всесвіту в інший. Це означає, що в початковому стані Всесвіт повинен був скрізь мати строго однакову температуру, інакше ніяк не пояснити однакову температуру мікрохвильового фону у всіх напрямках. Окрім того, мало йтися про дуже чітко визначену початкову швидкість вибуху, щоб розширення відбувалося на межі критичного режиму, що дозволяє уникнути стиснення. Дуже важко пояснити, чому Всесвіт зародився саме в такому стані, якщо не допускати втручання Бога, який мав намір створити істот на кшталт нас.

Намагаючись знайти модель Усесвіту, у якій безліч різних початкових станів могла розвинутиися в щось подібне до наявної світобудови, науковець із Массачусетського технологічного інституту Алан Гут припустив, що ранній Усесвіт міг пройти період дуже швидкого розши-

рення. Це розширення називають «інфляцією», маючи на увазі, що Всесвіт у той період розширювався з дедалі більшою швидкістю. Якщо вірити Гуту, радіус Усесвіту за мізерну частку секунди збільшився в мільйон мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця з тридцятьма нулями) разів. Будь-які неоднорідності у Всесвіті просто виправилися б у процесі цього розширення, як зморшки на повітряній кульці мірою того, як її надувають. Таким чином, інфляційна теорія пояснює, як нинішній, гладенький та однорідний стан Усесвіту міг розвинутися з купи всіляких неоднорідних споконвічних станів. Тож тепер ми певною мірою впевнені в тому, що маємо правильну картину подій аж до однієї мільярдної трильйонної трильйонної частки (10^{-33}) секунди від Великого Вибуху.

Уся ця первісна метушня Великого Вибуху завершилася лише через декілька годин формуванням ядер гелію й деяких інших елементів, таких як літій. Потім десь із мільйон років Усесвіт просто розширювався далі й нічого суттєвого не відбувалося. Нарешті температура знизилася до декількох тисяч градусів. Електронам і ядрам стало замало кінетичної енергії, щоб долати силу електромагнітного тяжіння, і вони почали об'єднуватися в атоми. Усесвіт у цілому розширювався б і остигав, але в регіонах, де густина була трохи вищою за середню, розширення додатково гальмувалося гравітаційним тяжінням надлишкової речовини.

Під дією такого тяжіння розширення в цих регіонах Усесвіту зупинилося, поступившись місцем стисненню (колапсу). Мірою того як вони стягувалися, тяжіння навколишньої речовини могло надати цим регіонам ледь помітного обертання. Оскільки регіон стягується, він обертається дедалі швидше подібно до того, як фігурист прискорюється, крутячись на льоду, коли притискає до себе руки. Коли розміри такого регіону ставали досить малими, його обертання

пришвидшувалося настільки, що могло збалансувати гравітацію. Так утворилися обертові спіральні галактики. Інші регіони Всесвіту, яким пощастило уникнути обертання, стали овальними об'єктами, що їх називають еліптичними галактиками. У таких регіонах колапс призупиняється через стійке обертання окремих частин галактики навколо її центра, тоді як уся зоряна система загалом не обертається.

З часом воднево-гелієвий газ у галактиках мусив розпадатися на невеликі хмари, які руйнувалися під дією власного тяжіння. Оскільки вони стискалися й атоми в них зіштовхувалися, то температура газу зростала, поки не досягала величини, необхідної для початку реакцій ядерного синтезу. Ці реакції перетворюють водень на гелій і схожі на керований вибух водневої бомби. Тепло, що виділяється при цьому, змушує зорі світитися. Це тепло також збільшує тиск газу, поки його не вистачає на те, щоб урівноважити силу тяжіння, відтак стискання газу припиняється. Приблизно так газові хмари стають подібними до нашого Сонця зорями, які спалюють водень, перетворюючи його на гелій, і випромінюють вивільнену енергію у формі тепла й світла. Вони чимось схожі на повітряну кульку, у якій внутрішній тиск повітря на стінки, що змушує кульку розширюватися, врівноважується за рахунок пружності гумової оболонки, яка прагне зменшити розмір кульки.

Сформувавшись із хмар гарячого газу, зорі тривалий час зберігають стійкість завдяки балансу між виділенням тепла в ядерних реакціях і гравітаційним тяжінням. Утім рано чи пізно зоря вичерпує свій запас водню й іншого ядерного палива. Парадоксально, але що більший запас палива має зоря, то швидше воно закінчується. Так стається через те, що чим масивніша зоря, тим вища температура їй потрібна, щоб збалансувати своє тяжіння. А чим гарячіша зоря, тим швидше відбувається реакція ядер-

ного синтезу й швидше витрачається паливо. Нашому Сонцю, імовірно, вистачить палива ще десть на п'ять мільярдів років, але масивніші зорі здатні витратити свої ресурси лише за сто мільйонів років, що значно менше за вік Усесвіту.

Коли зоря вичерпує паливо, вона починає остигати й гравітація бере гору, спричиняючи стиснення. Стиснення зближує атоми, змушуючи зорю знову розігріватися. За достатнього нагрівання зоря може почати перетворювати гелій на важчі елементи, зокрема вуглець і кисень. Це, проте, вивільняє не надто багато енергії, тож криза неминуха. Що трапляється далі, не цілком зрозуміло, але дуже ймовірно, що центральні ділянки зорі стискаються, переходячи в дуже густий стан, і це робить їх, наприклад, чорними дірами.

Термін «чорна діра» з'явився порівняно нещодавно. Першим його вжив 1969 року американський науковець Джон Вілер, описуючи наочно ідею, висловлену щонайменше років двісті тому. Якщо зоря досить масивна, може виявитися, що навіть світло не зуміє подолати її тяжіння, і тоді всім зовнішнім спостерігачам зоря видаватиметься чорною.

Коли ця ідея була висловлена вперше, існувало дві теорії щодо природи світла. Одна, якій віддавав перевагу Ньютон, твердила, що світло складається з частинок, або ж корпускул. Друга проголошувала, що світло являє собою хвилі. Тепер ми знаємо, що обидві теорії правильні. Як ми побачимо в розділі 9, через корпускулярно-хвильовий дуалізм у квантовій механіці світло інколи поводить себе як хвиля, а часом виразно демонструє властивості частинки. «Хвиля» й «частинка» — лише загальні поняття, які придумали люди, і природа не зобов'язана конче дотримуватися їх, накидаючи всім явищам ту чи ту абстрактну категорію!

Хвильова теорія не пояснює, як має поводитися світло під дією гравітації. Але якщо вважати, що світло складається з частинок, можна очікувати, що вони реагуватимуть на гравітацію так само, як гарматні ядра, космічні кораблі й планети. Наприклад, якщо вистрелити ядром у повітря, то рано чи пізно ядро впаде на Землю за умови, що швидкість, з якою воно вилетіло з гармати, не перевищує певної величини. Називається ця швидкість другою космічною швидкістю вивільнення.



*Гарматне ядро за швидкості,
меншої або більшої за швидкість вивільнення*

Друга космічна швидкість вивільнення залежить від сили земного тяжіння, тобто від маси Землі, але вона не зале-

жить від маси гарматного ядра з тієї ж таки причини, з якої прискорення вільного падіння тіл не залежить від їхньої маси. І якщо вже швидкість вивільнення не залежить від маси тіла, то можна припустити, що наведені міркування правильні й для частинок світла, незважаючи на те, що їхня маса дорівнює нулю! Тому резонно припустити, що частинки світла мають рухатися з деякою мінімальною швидкістю, щоб вирватися з поля тяжіння зорі.

Спочатку вважали, що частинки світла рухаються безмежно швидко, тому гравітація не здатна їх уповільнити, однак відкриття Ремера, який установив, що швидкість світла кінцева, означало, що гравітація може мати істотний вплив на світло. У досить масивної зорі швидкість вивільнення може виявитися більшою за швидкість світла, і все випромінювання, що його випускає така зоря, до неї вертатиметься. Виходячи з цього припущення, професор Кембриджського університету Джон Мічелл 1783 року опублікував у *«Філософських працях Лондонського королівського товариства»* доповідь, у якій вказав, що зоря певної маси та густини повинна мати таке сильне гравітаційне поле, що світло не зможе її покинути. Будь-яке світло, випромінене поверхнею зорі, буде притягнуте назад, перш ніж устигне «відбігти» далеченько від неї. Такі об'єкти ми тепер називаємо чорними дірами, адже вони являють собою чорні порожнечі в космосі.

Однак не зовсім правильно порівнювати світло з якимись гарматними ядрами, що підкоряються закону тяжіння Ньютона, адже швидкість світла має стале значення. Коли вистрелити гарматне ядро вгору, його сповільнюватиме гравітація, поки воно не зупиниться й не впаде; фотон же має рухатися вгору з постійною швидкістю. Послідовної картини того, як гравітація впливає на світ, не було до 1915 року, коли Ейнштейн запропонував загальну теорію

відносності. На запитання, що ж відбувається з випромінюванням масивної зорі за загальною теорією відносності, уперше відповів молодий американський науковець Роберт Оппенгеймер 1939 року.

Картина, яку запропонував у своїй праці Оппенгеймер, має такий вигляд. Гравітаційне поле зорі змінює траєкторію світлових променів у просторі-часі. Цей ефект проявляється у відхиленні світла далеких зір, спостережуваному під час сонячного затемнення. Траєкторії світла в просторі-часі, що проходять поряд із зорею, трохи викривлені в бік її поверхні. Стискаючись, зоря стає густішою, і гравітаційне поле на її поверхні посилюється. (Можна уявляти гравітаційне поле, що походить із точки в центрі зорі; коли зоря стискається, точки, що лежать на її поверхні, наближаються до центра, потрапляючи в сильніше поле.) Потужніше поле сильніше вигинає траєкторії світлових променів. Урешті-решт, коли зоря стискається до деякого критичного радіуса, гравітаційне поле на її поверхні стає таким сильним, а світлові промені вигинаються такою мірою, що світлу вже не «втекти».

Згідно з теорією відносності, ніщо не здатне рухатися швидше за світло. Тож якщо навіть світло не може вирватися, то й нічому іншому це теж не під силу — усе затягне назад гравітаційне поле. Навколо компактної зорі формується зона простору-часу, яку ніщо не може покинути, щоб досягти віддаленого спостерігача. Зона ця — чорна діра. Зовнішню межу чорної діри називають горизонтом подій¹. Сьогодні завдяки телескопам, які працюють у рентгенівському й гамма-діапазоні, ми знаємо, що чорні діри — звичайнісіньке явище, куди буденніше, ніж видавалося раніше.

¹ Інша назва — «сфера Шварцшільда» за ім'ям німецького астронома й фізика Карла Шварцшільда (1873—1916), який уперше виявив цю межу, або сферу, 1916 року.

Один супутник відшукав 1500 чорних дір на порівняно невеликій ділянці неба. Виявили ми й чорну діру в центрі нашої Галактики, причому її маса в мільйон разів перевищує масу Сонця. Біля цієї надмасивної чорної діри знайшлася зоря, яка обертається навколо неї зі швидкістю, рівною близько 2 % від швидкості світла, тобто швидше, ніж у середньому обертається електрон навколо ядра в атомі!

Щоб зрозуміти, що відбувається, коли доходить до колапсу масивної зорі та формування чорної діри, слід згадати, що теорія відносності не визнає абсолютного часу. Інакше кажучи, кожен спостерігач прикладає до часу власну мірку. Хід часу для спостерігача на поверхні зорі відрізнятиметься від ходу часу для спостерігача на відстані, адже на поверхні зорі гравітаційне поле сильніше.

Уявімо безстрашного астронавта, який стоїть собі на поверхні стискуваної зорі. У певний момент за його годинником — скажімо, об 11:00 — зоря стиснеться до критичного радіуса, за яким гравітаційне поле посилюється настільки, що з нього неможливо вирватися. Тепер припустимо, що за інструкцією астронавт має щосекунди за своїм годинником посылати сигнал космічному кораблю, орбіта якого лежить на деякій фіксованій відстані від центра зорі. Астронавт починає передавати сигнали о 10:59:58, тобто за дві секунди до 11:00. Що зареєструє екіпаж на борту космічного корабля?

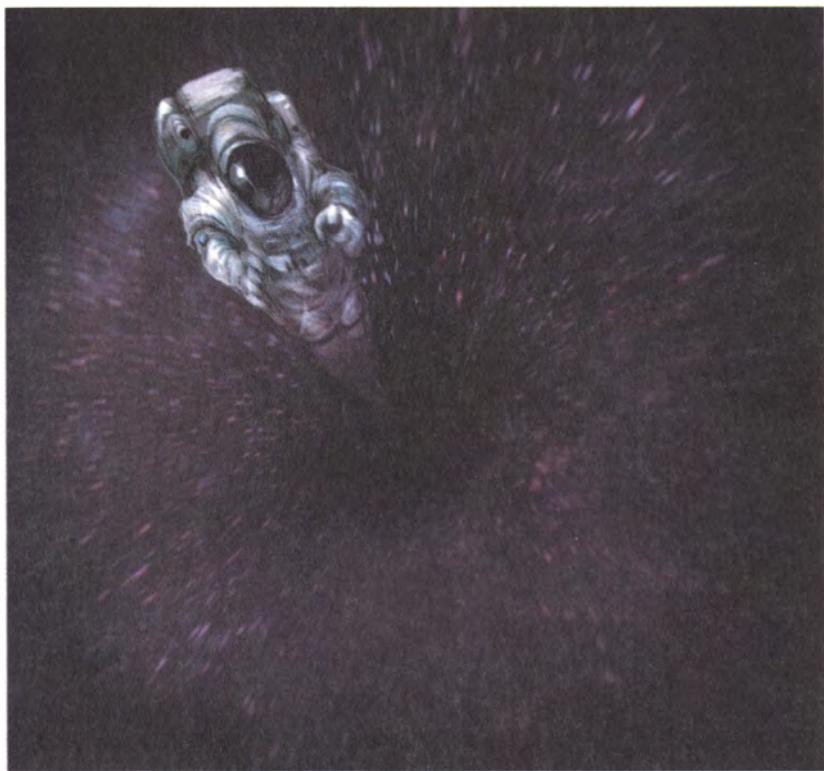
Раніше, провівши уявний експеримент із передаванням світлових сигналів усередині ракети, ми переконалися, що гравітація вповільнює час; і чим вона сильніша, тим значніший ефект. Астронавт на поверхні зорі перебуває в сильнішому гравітаційному полі, ніж його колеги на орбіті, тож одна секунда за його годинником триватиме довше, ніж секунда за годинником корабля. А оскільки астронавт разом із поверхнею рухається до центра зорі й поле, що діє

на нього, стає все сильнішим і сильнішим, то інтервали між його сигналами, прийнятими на борту космічного корабля, постійно збільшуються. Це розтягнення часу буде дуже незначним до 10:59:59, тож для астронавтів на орбіті інтервал між сигналами, переданими о 10:59:58 та о 10:59:59, зовсім ненабагато перевищить секунду. Але сигналу, відправленого об 11:00, на кораблі вже не дочекаються.

Усе, що відбувається на поверхні зорі між 10:59:59 та 11:00 за годинником астронавта, розтягнеться за годинником космічного корабля на нескінченний період часу. З наближенням до 11:00 інтервали між прибуттям на орбіту послідовних гребенів і западин світлових хвиль, випущених зорею, дедалі довшатимуть; це ж трапиться і з проміжками часу між сигналами астронавта. Оскільки частота випромінювання визначається числом гребенів (або западин), які приходять за секунду, то на космічному кораблі реєструватимуть дедалі нижчу частоту випромінювання зорі. Світло зорі чимраз більше червонітиме й водночас тьмянішатиме. Зрештою зоря потьмяніє настільки, що спостерігач із космічного корабля її вже не помічатиме; усе, що залишиться, — чорна діра в космосі. Однак дія тяжіння зорі на космічний корабель збережеться, і він далі обертатиметься по орбіті.

Цей сценарій, утім, не цілком реалістичний, адже є певна проблема. З віддаленням від центра зорі гравітація слабшає, через що ноги нашого безстрашного астронавта притягувалися б сильніше за його голову. Ця різниця сил призвела б до того, що тіло астронавта витягнулося б, наче спагеті, або розірвалося на частини, перш ніж зоря досягнула б критичного радіуса, на якому формується горизонт подій! Однак ми вважаємо, що у Всесвіті існують об'єкти куди більшого розміру, наприклад центральні зони галактик, які теж можуть зазнавати гравітаційного колапсу, породжуючи над-

масивні чорні діри на кшталт розташованої в центрі нашої Галактики. Якби наш астронавт перебував на такому об'єкті, то його не розірвало б на гамуз, перш ніж утворилася чорна діра. Досягнувши критичного радіуса й не відчувши нічого особливого, він перетнув би фатальну межу непомітно для себе. Хоча зовнішні спостерігачі фіксували б, що його сигнали вповільнюються, доки врешті-решт ті не зникли б. І тільки через кілька годин (за вимірюваннями астронавта) його розірвало б на друзки через різницю гравітаційних сил, які впливають на голову й ноги.



Іноді, коли доходить до колапсу дуже масивної зорі, її зовнішні шари може викинути в космос колосальний вибух, який називається спалахом наднової. Вибух цей такий

потужний, що наднова світить яскравіше за всі зорі цілої галактики. Прикладом може служити наднова Крабоподібної туманності. Китайські літописи згадували її 1054 року. Хоча вибух зорі відділяло від Землі 5000 світлових років, його кілька місяців можна було спостерігати неозброєним оком, і сяяла зоря так яскраво, що була помітна навіть удень, а вночі за її світла можна було читати. Спалах наднової за 500 світлових років від нас — у десять разів ближче за туманність — був би в сто разів яскравішим і буквально перетворив би ніч на день. Щоб відчувати потужність подібного вибуху, уявіть, що спалах суперничав би із сяйвом Сонця навіть при тому, що зоря перебувала б у десятки мільйонів разів далі за нього (нагадуємо, що наше Сонце розташоване лише за вісім світлових хвилин від Землі). Досить близький спалах наднової зорі хоча й не зруйнував би Землю, але супроводжувався б випромінюванням, здатним убити все живе на нашій планеті. Нещодавно висловили припущення, що вимирання морських організмів, яке сталося два мільйони років тому, було спричинене сплеском космічного випромінювання, породженого спалахом наднової поблизу Землі. Деякі науковці вважають, що високоорганізоване життя може розвинутися тільки в тих куточках галактик, де не надто багато зір, — у так званих зонах життя, — адже в регіонах щільнішого скупчення зір спалахи наднових — явища такі буденні, що вони періодично знищують будь-які паростки біологічної еволюції. Щодня у Всесвіті спалахують сотні тисяч наднових зір. В окремій галактиці наднові з'являються приблизно раз на століття. Але це середні показники. На жаль (принаймні, для астрономів), останній спалах наднової в Чумацькому Шляху стався 1604 року, до винайдення телескопа.

Головною претенденткою на роль наступної наднової в нашій Галактиці є зоря Ро Кассіопеї. На щастя, розташована вона на цілком безпечній для нас відстані 10 000 світлових

років. Належить ця зоря до нечисленного класу жовтих надгігантів. У всьому Чумацькому Шляху є лише сім зір цього типу. Міжнародна група астрономів почала вивчати Ро Кассіопеї 1993 року. За минулі роки в зорі спостерігали періодичні коливання температури на кількасот градусів. Потім, улітку 2000 року, її температура раптом знизилася приблизно від 7000 до 4000 градусів. У цей час дослідники виявили в атмосфері зорі окис титану, який, як вважають, входить до складу оболонки, викинутої з поверхні зорі потужною ударною хвилею.

Коли спалахує наднова, низка важких елементів, які утворилися наприкінці життєвого циклу зорі, викидається назад у міжзоряне середовище, стаючи сировиною для формування наступного покоління зір. Наше Сонце містить приблизно 2 % таких важких елементів. Це зоря другого або третього покоління, яка сформувалася десь п'ять мільярдів років тому з хмари обертового газу, що містив викиди ранніх наднових. Значна частина газу з тієї хмари пішла на формування Сонця або була викинута назовні, але невелика частина важких елементів змогла зібратися разом та утворити подібні до Землі планети, які тепер обертаються навколо Сонця. І золото в наших коштовностях, і уран у наших ядерних реакторах — усе це залишки наднових зір, які спалахнули ще до народження Сонячної системи!

Коли Земля ще тільки конденсувалася, вона була дуже гарячою й не мала атмосфери. З часом вона охолола й загорнулася в оболонку газів, що виділялися зі скельних порід. Ми не змогли б вижити в цій первинній атмосфері. Кисню в ній не було, натомість первісна атмосфера містила безліч інших, отруйних для нас газів, наприклад сірководень (яким смердять тухлі яйця). Утім існують деякі примітивні форми життя, що бувають саме в таких умовах. Імовірно, вони розвинулися в океанах унаслідок

випадкового з'єднання атомів у великі структури, — макромолекули, — що були здатні збирати інші атоми в океані в схожі структури. Таким чином, ці структури відтворювали самих себе й розмножувалися. Подекуди в процесі відтворення траплялися помилки. Ішлося здебільшого про те, що новопостала макромолекула не могла відтворювати себе й урешті-решт руйнувалася. Однак деякі похибки спричинялися до появи нових макромолекул, які відтворювалися ще краще. Маючи таку перевагу, вони успішно витісняли вихідні макромолекули. Так було покладено початок процесу еволюції, який спричинився до розвитку дедалі складніших самовідтворювальних організмів. Перші примітивні форми життя споживали різні речовини, зокрема сірководень, і виділяли кисень. Поступово це змінило склад атмосфери, наблизивши його до сучасного, і послужило передумовою для виникнення вищих форм життя — риб, рептилій, ссавців і, нарешті, людей.

Описана картина Всесвіту заснована на загальній теорії відносності. Вона узгоджується з усіма сучасними спостереженнями. Однак математика насправді не може оперувати нескінченними числами, тому, стверджуючи, що Всесвіт почався з Великого Вибуху, загальна теорія відносності тим самим прогнозує, що у Всесвіті існує точка, де сама ця теорія втрачає чинність. Подібна точка — приклад того, що математики називають сингулярністю. Коли теорія передбачає сингулярності на кшталт нескінченної температури, густини й кривизни, це знак того, що її слід якось змінити. Загальна теорія відносності неповна, оскільки вона не пояснює, як з'явився Всесвіт.

XX століття стало свідком того, як змінилися погляди людини на Всесвіт. Ми зрозуміли, яке скромне місце посідає наша планета в неосяжному Всесвіті; виявили, що час і простір викривлені й невіддільні одне від одного;

відкрили, що Всесвіт розширюється й що він мав початок у часі. Однак ми також переконалися, що, малюючи нову картину великомасштабної структури Всесвіту, загальна теорія відносності дає маху, описуючи початок часів.

Минуле століття також викликало до життя й іншу велику часткову фізичну теорію — квантову механіку. Вона має справу з явищами, які відбуваються у вельми маленьких масштабах. Наша концепція Великого Вибуху каже, що, мабуть, на початку свого існування Всесвіт був такий малий, що навіть під час вивчення його «великомасштабної структури» не можна ігнорувати ефекти квантової механіки, важливі в мікроскопічних масштабах. І сьогодні, прагнучи досягнути Всесвіт цілком, найбільші надії ми покладаємо на об'єднання цих двох часткових теорій у єдину квантову теорію гравітації. Далі ми переконаємося, що об'єднання загальної теорії відносності з прийнятим у квантовій механіці принципом невизначеності вможливорює існування скінченного простору й безмежного часу. І можливо також, що звичайні фізичні закони діють повсюди, зокрема й на світанні часів, не потребуючи жодних сингулярностей.

КВАНТОВА ГРАВІТАЦІЯ

Успіх наукових теорій, зокрема теорії тяжіння Ньютона, привів французького науковця П'єра Симона Лапласа на початку XIX століття до переконання, що Всесвіт цілком детермінований. Інакше кажучи, Лаплас вважав, що має існувати низка законів природи, які дозволяють — принаймні загалом — передбачити все, що трапиться у Всесвіті. Для цього потрібно «лише» підставити в такі закони повну інформацію про стан Усесвіту в деякий довільно обраний момент часу. Називається це заданням «початкового стану», або «граничних умов».

(У разі граничних умов ідеться про межу в просторі або часі; граничний стан у просторі — це стан Усесвіту біля зовнішніх його кордонів, якщо такі є.) Лаплас вважав, що, маючи повний набір законів і знаючи початкові або граничні умови, ми зможемо точно визначити стан Усесвіту в той чи той момент часу.

Необхідність знати початкові умови, мабуть, інтуїтивно очевидна: різні поточні стани, поза сумнівом, приведуть до різних станів у майбутньому. Потреба знати граничні умови в просторі трохи важча для розуміння, але в принципі це те саме. Рівняння, що лежать в основі фізичних теорій, можуть мати вельми різноманітні розв'язки, вибір

між якими ґрунтується на початкових або граничних умовах. Тут простежується віддалена аналогія зі станом банківського рахунку, на який надходять і з якого списують великі суми. Те, чи станете ви банкрутом або ж багатієм, залежить не тільки від перераховуваних сум, але й від початкового стану рахунку.

Якщо Лаплас мав рацію, тоді фізичні закони дозволять нам за відомим сьогоdnішнім станом Усесвіту визначити його стани в минулому й майбутньому. Наприклад, знаючи положення та швидкості Сонця й планет, ми можемо за допомогою законів Ньютона обчислити стан Сонячної системи в будь-який момент минулого чи майбутнього. Коли йдеться про планети, детермінізм здається абсолютно очевидним. Зрештою, астрономи дуже точно передбачають такі події, як затемнення. Але Лаплас пішов далі, припустивши, що подібні закони керують і всім іншим, зокрема людською поведінкою.

Однак чи справді науковці здатні вирахувати наперед усе, що ми зробимо згодом? Число молекул у склянці води перевищує десять у двадцять четвертому степені (одиниця з двадцятьма чотирма нулями). На практиці ми не маємо ані найменшої надії визначити стан кожної з них. Іще менше в нас шансів дізнатися про точний стан Усесвіту або навіть свого власного тіла. Тож, говорячи про детермінованість Усесвіту, ми маємо на увазі, що, навіть якщо наших інтелектуальних здібностей обмаль для цих обчислень, майбутнє визначене.

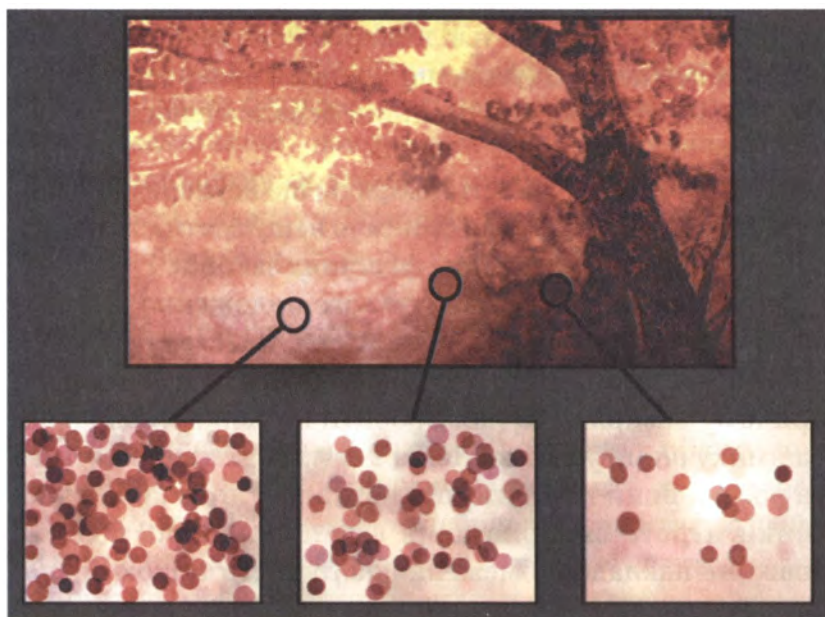
Таку доктрину наукового детермінізму рішуче відкидало чимало тих, хто відчував, що вона обмежує свободу Бога правити світом, як йому заманеться. Проте детермінізм залишався в науці загальноприйнятим припущенням до початку ХХ століття. Одну з перших указівок на те, що

від цього принципу доведеться відмовитися, зробили англійські фізики Джон Вільям Релей і Джеймс Джинс, вирахувавши випромінювання чорного тіла, на яке має впливати нагріте тіло, наприклад зоря (у розділі 7 ми вже згадували, що будь-який матеріальний об'єкт, нагрівшись, генерує випромінювання чорного тіла).

Згідно з тогочасними уявленнями, гаряче тіло мало випускати електромагнітні хвилі однаково на всіх частотах. Якби так воно й було, однакові енергії припадали б на кожен колір видимого спектру випромінювання, на кожен частоту мікрохвильового випромінювання, радіохвиль, рентгенівських променів та ін. Нагадаємо, що частотою хвилі називають кількість її коливань за секунду, тобто кількість «хвиль за секунду». З погляду математики твердження, що гаряче тіло однаково випускає хвилі на всіх частотах, означає, що воно випромінює ту саму кількість енергії у всіх діапазонах частот: від нуля до мільйона хвиль за секунду, від одного до двох мільйонів, від двох до трьох мільйонів і так до нескінченності. Інакше кажучи, якась одиниця енергії випромінюється з хвилями, частота яких лежить у діапазоні від нуля до мільйона за секунду й у всіх подальших інтервалах. Тоді повна енергія, що випромінюється на всіх частотах, становитиме один плюс один плюс один... і так до нескінченності. І оскільки немає обмежень на можливу кількість хвиль за секунду, це додавання енергій ніколи не закінчиться. Згідно з таким міркуванням, повна випромінювана енергія має бути нескінченною.

Щоб уникнути цього явно абсурдного висновку, німецький науковець Макс Планк 1900 року припустив, що видиме світло, рентгенівські промені та інші електромагнітні хвилі можуть випускатися тільки деякими дискретними порціями, які він назвав «квантами». Сьогодні ми називаємо квант світла фотоном. Що вища частота світла, то більша енергія

його фотонів. Тому, хоча фотони будь-якого поданого кольору або частоти цілком ідентичні, фотони різних частот, згідно з Планком, несуть різну кількість енергії. Це означає, що у квантовій теорії «найслабкіше» світло будь-якого поданого кольору — світло, представлене одним-єдиним фотоном, — несе енергію, величина якої залежить від кольору. Наприклад, частоти фіолетового світла вдвічі вищі за частоти червоного, а отже, один квант фіолетового світла несе вдвічі більше енергії, ніж один квант червоного. Таким чином, найменша порція фіолетової світлової енергії вдвічі більша за найменшу порцію червоної.



Найменша кількість світла

Як це розв'язує проблему абсолютно чорного тіла? Мінімальна кількість електромагнітної енергії, яку чорне тіло може випустити на будь-якій заданій частоті, дорівнює енергії одного фотона цієї частоти. На вищих частотах й енергія фотонів вища. Тобто на високих частотах найменша

кількість енергії, яку може випустити абсолютно чорне тіло, виявляється більшою. Для досить високої частоти енергія одного кванта перевищує всю енергію тіла. На такій частоті світло не випускається, що встановлює межу для суми, яку доти вважали нескінченною. Таким чином, за теорією Планка, інтенсивність випромінювання на високих частотах має знижуватися. У результаті рівень енергетичних втрат тіла стає скінченною величиною, що й розв'язує проблему абсолютно чорного тіла.

Квантова гіпотеза дуже добре пояснила спостережувану інтенсивність випромінювання гарячих тіл, але її наслідки для детермінізму не усвідомлювали до 1926 року, коли інший німецький науковець, Вернер Гайзенберг, сформулював славнозвісний принцип невизначеності.

Принцип невизначеності говорить, що всупереч переконанням Лапласа природа обмежує нашу здатність передбачати майбутнє на підставі фізичних законів. Річ у тому, що для передбачення майбутнього положення й швидкості частинки ми повинні мати можливість виміряти її початковий стан, тобто поточні положення й швидкість, причому виміряти точно. Зробити це можна, піддавши частинку впливу світла. Деякі з світлових хвиль частинка розсіє. Вони вкажуть спостерігачеві положення частинки. Проте використання світлових хвиль поданої довжини накладає обмеження на точність, з якою визначають положення частинки: точність ця лімітується відстанню між гребенями хвилі. Таким чином, бажаючи якнайточніше виміряти положення частинки, ви повинні використовувати світлові хвилі короткої довжини, а значить, високої частоти. Проте, згідно з квантовою гіпотезою Планка, можна оперувати довільно малою кількістю світла: вам доведеться використати щонайменше один квант, енергія якого зі збільшенням частоти

зростає. Отже, що точніше ви прагнете виміряти положення частинки, то вищою має бути енергія кванта світла, який ви в неї спрямовуєте.

Квантова теорія твердить, що навіть квант світла порушить рух частинки, непередбачуваним чином змінивши її швидкість. І що вища енергія кванта світла, то більші ймовірні порушення. Намагаючись підвищити точність вимірювання положення, ви скористаєтеся квантом вищої енергії, і швидкість частинки зазнає значних змін. Що точніше ви намагаєтеся виміряти положення частинки, то менш точно ви можете виміряти її швидкість, і навпаки. Гайзенберг показав, що невизначеність положення частинки, помножена на невизначеність її швидкості й масу частинки, не може бути меншою за певну сталу величину. Отже, зменшивши, наприклад, удвічі невизначеність положення частинки, ви маєте подвоїти невизначеність її швидкості, і навпаки. Природа назавжди обмежила нас умовами цієї угоди.

Наскільки погані подані умови? Це залежить від згаданої «певної сталої величини». Її називають сталою Планка, і вона мізерно мала. З огляду на мізерність сталої Планка наслідки описаної угоди та квантової теорії в цілому, подібно до ефектів теорії відносності, непомітні в щоденному житті. (Зрештою, квантова теорія таки впливає на наше життя, зокрема постаючи основою сучасної електроніки.) Наприклад, визначивши швидкість тенісного м'ячика масою один грам із точністю до одного сантиметра за секунду, ми можемо встановити його місцезнаходження набагато точніше, ніж нам зазвичай треба знати. Але якщо виміряти положення електрона з точністю приблизно до розмірів атома, то неможливо визначити його швидкість із похибкою, меншою за ± 1000 кілометрів за секунду, що ніяк не назвеш точним вимірюванням.

Межа, встановлена принципом невизначеності, не залежить ані від способу, за допомогою якого вимірюють положення або швидкість, ані від типу частинки. Принцип невизначеності Гайзенберга відображає фундаментальну, питому властивість природи, що веде до глибоких змін у наших поглядах на сам світ. Навіть через сімдесят із гаком років потому чимало філософів не зовсім розуміють ці зміни, які досі залишаються предметом значних світоглядних розбіжностей. Принцип невизначеності ознаменував кінець лапласівської мрії про наукову теорію, модель Усесвіту, яка була б цілком детерміністською: годі точно передбачити майбутні події, якщо неможливо точно визначити навіть сучасний стан Усесвіту!

Ми поки ще можемо припустити, що існує якийсь набір законів, які цілком визначають наперед події для якоїсь надприродної істоти, котра, на відміну від нас, може спостерігати наявний стан Усесвіту, не порушуючи його. Однак такі моделі Всесвіту не надто цікаві нам, звичайним смертним. Схоже, доцільніше використовувати так званий принцип бритви Оккама й відкинути всі елементи теорії, які не мають спостережуваних проявів. Цей підхід у 1920-х роках привів Гайзенберга, Ервіна Шредінгера й Поля Дірака до заміни ньютонівської механіки на нову теорію — квантову механіку, засновану на принципі невизначеності. У цій теорії частинки не мають окремих, чітких положень і швидкостей. Натомість у них є квантовий стан — комбінація положень і швидкостей, відомих лише в межах, які допускає принцип невизначеності.

Одна з революційних особливостей квантової механіки полягає в тому, що ця теорія не передбачає єдиного певного результату спостереження. Вона пропонує безліч можливих результатів і відзначає, наскільки ймовірний кожен із них. Інакше кажучи, якщо виконати однакові

вимірювання з великою кількістю однотипних систем, які перебувають в однаковому вихідному стані, то в деякому числі випадків вимірювання дадуть результат А, ще в якійсь кількості випадків — результат В тощо. Можна приблизно передбачити, скільки разів випаде результат А або В, але не можна передбачити певний результат одного конкретного вимірювання.

Уявіть, наприклад, що ви кидаєте дротики, граючи в дартс. Згідно з класичними (іще не квантовими) теоріями, дротик або вцілить у «яблучко», або ні. Знаючи швидкість дротика в момент кидка, силу тяжіння та інші умови, ви можете вирахувати, влучить він у мішень чи ні. Однак квантова теорія говорить, що неможливо передбачити таке напевно. Згідно з нею, існує певна ймовірність того, що дротик вцілить у «яблучко», і відмінна від нуля ймовірність, що він встромиться в будь-яке інше місце на дошці. Маючи справу з такими великими об'єктами, як у грі в дартс, ви можете бути впевнені в прогнозі, якщо класична теорія — у поданому випадку механіка Ньютона — передбачає влучання дротика в мішень. Принаймні, шанси, що цього не станеться (згідно з квантовою теорією) такі малі, що, кидаючи дротики й далі в той-таки спосіб до кінця існування Всесвіту, ви, імовірно, ніколи б не схибили. Але в масштабах атомів усе відбувається по-іншому. Імовірність влучання дротика, що складається з одного атома, у центр мішені, дорівнювала б 90 %, шанс, що він встромиться в інше місце на дошці, становив би 5 %, і ще 5 % припало б на те, що дротик узагалі пролетить повз дошку. Ви не можете сказати заздалегідь, що саме станеться. Усе, що ви можете, — це стверджувати, що, коли експеримент раз у раз повторювати, у середньому 90 разів зі 100 дротик влучить у «яблучко».

Квантова механіка внесла неминучий елемент непередбачуваності, або випадковості, у науку. Ейнштейн затято

протестував проти цього, хоча сам відіграв важливу роль у розвитку заперечуваних ідей. Адже насправді науковець отримав Нобелівську премію саме за внесок у створення квантової теорії. Однак Ейнштейн ніколи не примирився з тим, що Всесвітом керує випадок, образно висловивши свою незгоду фразою: «Господь не грає в кості».

Якість наукової теорії, як ми вже говорили, визначається її здатністю передбачати результати експерименту. Квантова теорія обмежує таку нашу здатність. Чи не обмежує квантова теорія можливості науки? Коли наука розвивається, то шляхи її поступу має диктувати сама природа. У поданому випадку природа вимагає, щоб ми переглянули те, що маємо на увазі під передбаченням: ми не здатні точно передбачити результат експерименту, але можемо багаторазово повторити експеримент і підтвердити, що різні його результати виявляються з імовірностями, які передбачила квантова теорія. Таким чином, принцип невизначеності не змушує відмовлятися від віри в те, що світом керують фізичні закони. Насправді більшість науковців нарешті визнали квантову механіку саме тому, що вона чудово узгоджується з експериментом.

Один із найважливіших наслідків принципу невизначеності полягає в тому, що подекуди частинки поведуться як хвилі. Як ви вже знаєте, вони не мають певного положення, а «розмазані» в просторі згідно з певним розподілом імовірностей.

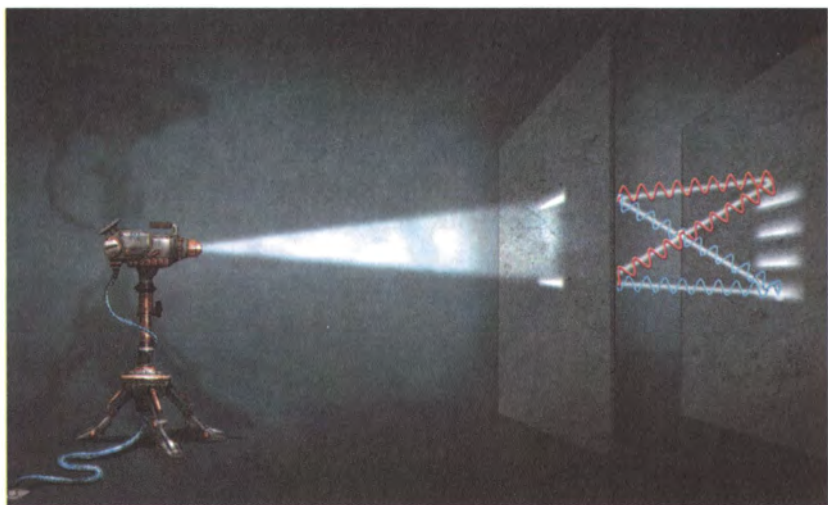
Точно так само, хоча світло являє собою хвилі, у певному ракурсі воно поводить себе так, ніби складається з частинок: світло може випромінюватися або поглинатися тільки певними порціями — квантами. Фактично квантова механіка заснована на абсолютно новому математичному апараті, який уже не описує реальний світ ані в термінах

частинок, ані в термінах хвиль. Для деяких цілей зручно розглядати частинки як хвилі, для інших — уважати хвилі за частинки, але подібний підхід — здебільшого умовність, прийнята для нашої зручності. Це те, що фізики називають корпускулярно-хвильовим дуалізмом квантової механіки.



«Розмазане» квантове положення

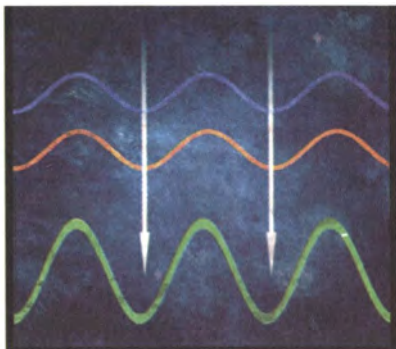
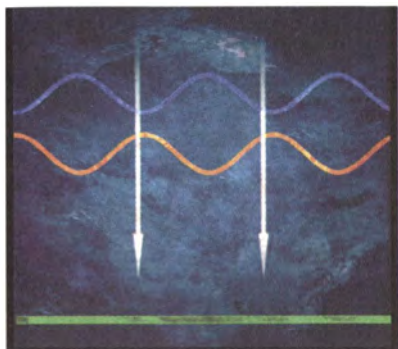
Важливий наслідок хвильової квантово-механічної поведінки — можливість спостерігати інтерференцію між двома наборами частинок. Про інтерференцію прийнято думати як про явище хвильової природи. За зіткнення хвиль гребені одного їх набору можуть співпасти із западинами іншого (у такому разі говорять, що хвилі перебувають «у протифазі»).



Шляхи світлових хвиль та інтерференція

Коли таке трапляється, два набори хвиль зводять один одного нанівець, а не утворюють сильнішу хвилю, як можна було б очікувати. Буденний приклад інтерференції світла — райдужне забарвлення мильних бульбашок. Спричинене воно віддзеркаленням світла від зовнішньої й внутрішньої поверхонь тонкої водяної стінки бульбашки. Біле світло складається зі світлових хвиль різної довжини, а значить, різного кольору. Гребені хвиль певної довжини, відбиті від одного боку водяної стінки, збігаються із западинами хвиль, відбитих від другого боку. Кольори, що відповідають цим довжинам хвиль, відсутні у відбитому світлі, яке тому й здається забарвленим. Але квантова теорія говорить, що завдяки корпускулярно-хвильовому дуалізму інтерференцію можна спостерігати й у частинок.

Найвідоміший приклад — так званий експеримент із двома щілинами. Уявіть перегородку (тонку стінку), у якій є дві вузькі паралельні щілини. Перш ніж розглядати, що трапляється під час проходження частинок через ці щілини, досліджуємо, що стається, коли на них падає світло.



Хвилі, які перебувають у протифазі й збігаються у фазі

По один бік від перепони розташуємо джерело світла певного кольору (тобто з фіксованою довжиною хвилі). Велика частина випущеного світла потрапить на перегородку, але певна кількість пройде через щілини. Тепер припустімо, що по інший бік перегородки встановлено екран. Розглянемо будь-яку точку на цьому екрані. Її досягнуть хвилі, що пройшли через обидві щілини. Проте загалом світло, що пройшло через одну щілину, на шляху від джерела до нашої точки подолає іншу відстань, ніж світло, що пройшло через іншу щілину. Через цю різницю у відстанях хвилі, що прийшли до точки від двох різних щілин, не співпадуть за фазою.

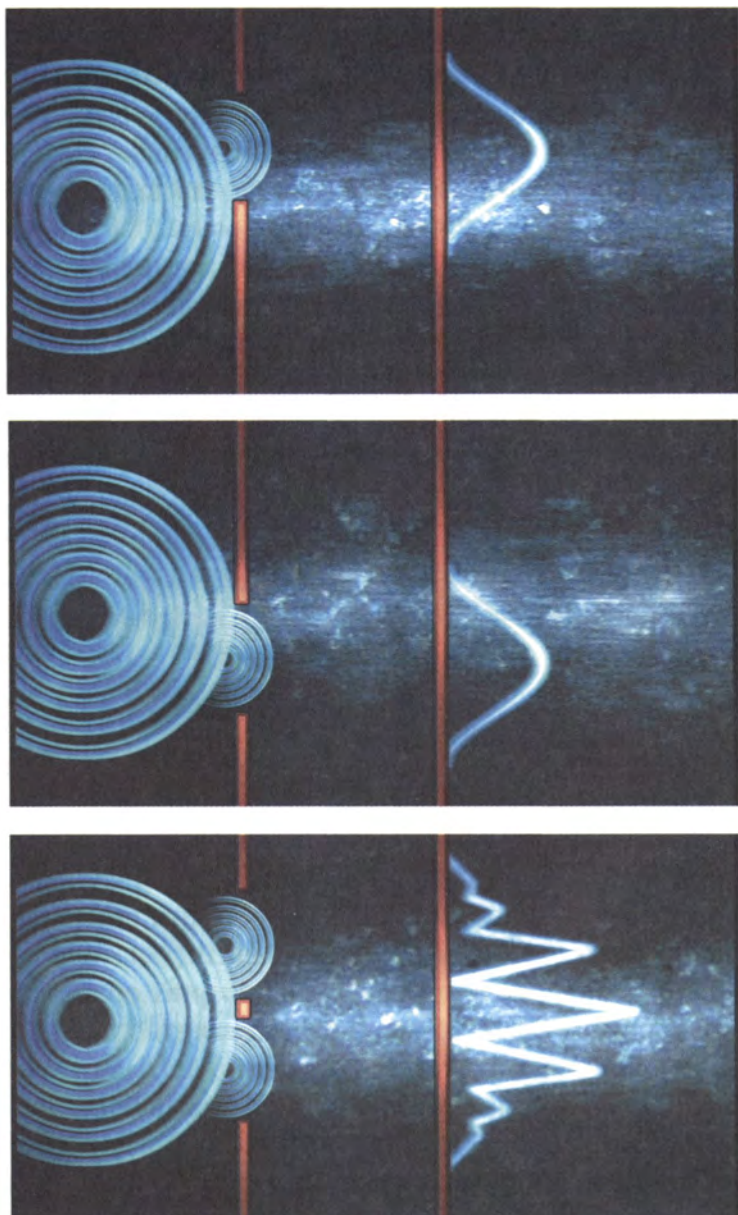
У деяких місцях западини однієї хвилі співпадуть із гребенями іншої, і ці хвилі взаємно знищуються; в інших гребені співпадуть із гребенями, а западини — із западинами, і хвилі взаємно посиляться; але в більшості точок можна буде спостерігати якийсь проміжний стан. Результат — характерне чергування світлих і темних смуг.

Прикметно, що ту саму картину спостерігають, якщо джерело світла замінити на джерело, яке випускає частинки, наприклад електрони, що мають однакову швидкість (а значить, і відповідні хвилі матерії мають однакову довжину).

Припустімо, що у вас є лише одна щілина й ви вирішуйте бомбардувати стінку електронами. Стінка зупинить більшість електронів, однак деякі пройдуть крізь щілину й доберуться до екрана, розташованого по той бік. Тому напрашується висновок, що достатньо відкрити в перегородці другу щілину, щоб просто збільшити кількість електронів, які потрапляють у кожную точку екрана. Однак коли ви відкриваєте другу щілину, то кількість електронів, які потрапляють на екран, у деяких точках збільшується, а в інших — зменшується, наче електрони зазнають інтерференції подібно до хвилі, а не поводяться як частинки.

Тепер уявімо, що ми посилаємо електрони крізь щілину по одному за раз. Чи збережеться в цьому випадку інтерференція? Можна було б очікувати, що кожен електрон проходить через одну з двох щілин і в результаті інтерференційна картина зникне. Насправді ж, навіть якщо бомбардувати щілини одиночними електронами, інтерференцію спостерігатимуть і далі. Отже, кожен електрон повинен одночасно проходити через *обидві* щілини й зіштовхуватися сам із собою!

Явище інтерференції частинок мало принципове значення для розуміння будови атомів — основних елементів, з яких складаємося ми самі й усе навколо нас. На початку ХХ століття вважали, що подібно до того, як планети обертаються навколо Сонця, електрони (негативно заряджені частинки) в атомах обертаються навколо ядра, що має позитивний заряд. Передбачали, що тяжіння між позитивним і негативним електричними зарядами утримує електрони на орбітах, так само як тяжіння Сонця не дає планетам зійти з їхніх орбіт. Одна біда: класичні закони механіки й електрики — до квантової механіки — передбачали, що електрони, які обертаються в такий



Розподіл електронів в експерименті з однією щілиною, загальний результат двох експериментів з однією щілиною та розподіл електронів в експерименті з двома щілинами

спосіб, мають випускати випромінювання. Через це вони неминуче втрачали б енергію й рухалися по спіралі до ядра, доки не зіштовхнулися б із ним. Отже, атоми — і взагалі вся матерія — мали б стрімко стиснутися в стан надзвичайно високої густини, чого явно не відбувається!

Данський науковець Нільс Бор почасти розв'язав цю проблему 1913 року. Він припустив, що електрони, можливо, здатні обертатися не на будь-якій відстані від ядра, а тільки на деяких специфічних відстанях. Якщо також припустити, що тільки один або два електрони можуть обертатися навколо ядра на кожній із цих фіксованих відстаней, то проблему колапсу можна розв'язати, бо після заповнення обмеженого числа внутрішніх орбіт рух електронів по спіралі до ядра припиняється. Подана модель переконливо пояснила структуру найпростішого атома — атома водню, у якому навколо ядра обертається один-єдиний електрон. Але залишалося незрозумілим, як поширити цю модель на складніші атоми. Окрім того, ідея щодо обмеженого набору дозволених орбіт виглядала звичайнісіньким вивертом. Цей виверт діяв із погляду математики, проте не пояснював, чому фізичні процеси відбуваються так, а не інакше і який фундаментальний закон — якщо такий існує — за цим стоїть. Нова теорія — квантова механіка — дозволила подолати ці труднощі. Вона показала, що електрон, котрий обертається навколо ядра, можна розглядати як хвилю, довжина якої залежить від швидкості її поширення. Уявіть хвилю, що оббігає ядро на певній відстані, як постулював Бор. Довжина кола деяких орбіт відповідатиме цілому (не дробовому) числу довжин хвилі електрона. На таких орбітах гребені хвиль із кожним обертом опинятимуться в тих самих положеннях, тож хвилі «складатимуться». Ці орбіти відповідають дозволеним орбітам Бора. Водночас на орбітах, де не збирається ціле число довжин хвиль, гребені накла-

датимуться на западини, спричиняючи загасання хвиль. Це заборонені орбіти. Таким чином, закон Бора про дозволені й заборонені орбіти дістав пояснення.

Вдалим прикладом наочного уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм є так звані інтеграли за траєкторіями, які запропонував американський науковець Річард Фейнман. Цей підхід, на відміну від класичного, неквантового, не передбачає, що частинка має якусь єдину історію, або, інакше кажучи, траєкторію в просторі-часі. Натомість науковець вважав, що частинка рухається з точки А в точку В по всіх можливих траєкторіях.

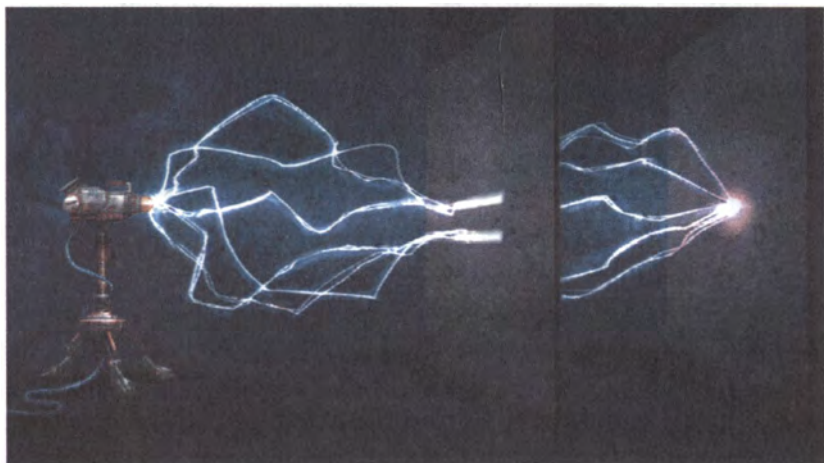


Хвилі на атомних орбітах

З кожною траєкторією між А і В Фейнман пов'язав пару чисел. Одне з них являє амплітуду, або розмах, хвилі. Друге — фазу, тобто положення в циклі коливання (гребінь або западина). Імовірність того, що частинка потрапить з А у В, визначається складанням хвиль для всіх траєкторій, які з'єднують А і В. Зазвичай якщо порівняти набори сусідніх траєкторій, то фази, тобто положення в циклі коливань, істотно відрізнятимуться. Отже, хвилі, що триматимуться поданих траєкторій, майже точно нейтралізують одна одну. Проте в деяких наборах сусідніх траєкторій відмінність фаз не надто значна. Хвилі, що поширюються

по таких траєкторіях, не знищуватимуть одна одну. Подібні траєкторії відповідають дозволеним орбітам Бора.

Втілення викладених ідей у конкретну математичну форму дало змогу відносно легко обчислювати дозвалені орбіти в складних атомах і навіть у молекулах, які складаються із сили-силенної атомів, пов'язаних електронами, орбіти котрих охоплюють відразу кілька ядер. А оскільки будова молекул та їхня взаємодія становлять основу хімії та біології, то квантова механіка дозволяє нам загалом передбачати майже все, що ми бачимо навколо, у рамках обмежень, установлених принципом невизначеності. (На практиці, щоправда, нам не під силу розв'язати рівняння для жодного атома, окрім найпростішого — атома водню, у якому тільки один електрон, тож ми користуємося наближеннями й комп'ютерами, аналізуючи складніші атоми й молекули.)



Безліч траєкторій електрона в експерименті з двома щілинами

Квантова теорія виявилася напрочуд успішною й лягла в основу майже всієї сучасної науки й техніки. Вона керує поведінкою транзисторів й інтегральних схем — найважливіших компонентів електронних пристроїв, зокрема телевізорів

і комп'ютерів, і є фундаментом сучасної хімії та біології. Єдина галузь фізичної науки, у яку квантова механіка поки що не проникла, — це гравітація й великомасштабна структура Всесвіту. Загальна теорія відносності Ейнштейна не бере до уваги квантово-механічний принцип невизначеності, що потрібно для узгодження з іншими теоріями.

Як уже було показано в попередньому розділі, загальна теорія відносності вимагає видозмінювання. Передбачивши існування точок із нескінченною щільністю — сингулярностей, — класична (тобто не квантова) загальна теорія відносності тим самим провістила свій занепад подібно до того, як класична механіка визначила свій крах, передбачивши, що абсолютно чорні тіла мають випромінювати нескінченну енергію, а атоми — колапсувати, досягаючи нескінченної щільності. І, як й у випадку з класичною механікою, ми сподіваємося усунути ці неприйнятні сингулярності, перетворивши класичну загальну теорію відносності на квантову теорію, тобто створивши квантову теорію гравітації.

Якщо загальна теорія відносності неправильна, чому ж усі дотеперішні експерименти її підтверджують? Причина того, що ми досі не помітили жодних розбіжностей між теорією й спостереженнями, полягає в тому, що всі гравітаційні поля, з якими нам зазвичай доводиться мати справу, дуже слабкі. Але, як ми вже відзначали, у Всесвіті на початку його існування, коли вся речовина й енергія були зосереджені в мізерно малому об'ємі, гравітаційне поле мало бути дуже сильним. У наявності таких сильних полів ефекти квантової теорії мають відігравати не останню роль.

Хоча квантова теорія гравітації ще не створена, ми знаємо безліч властивостей, які, на нашу думку, їй притаманні. По-перше, вона має містити фейнманівську схему, що виводить квантову теорію в термінах інтегралів

за траєкторіями. По-друге, частиною будь-якої остаточної теорії, на наше переконання, має бути ідея Ейнштейна про те, що гравітаційне поле являє собою викривлення простору-часу: у викривленому просторі частинки прагнуть рухатися по шляху, найбільш наближеному до прямої лінії, але оскільки простір-час не є плоским, то їхні траєкторії на вигляд зігнуті, неначе під дією гравітаційного поля. Коли ми застосовуємо фейнманівські інтеграли за траєкторіями до поглядів Ейнштейна на гравітацію, аналогом траєкторії частинки стає увесь викривлений простір-час, що репрезентує історію всього Всесвіту.

Класична теорія гравітації передбачає лише два вірогідні сценарії поведінки Всесвіту: або він існував завжди, упродовж нескінченного часу, або веде свій початок від сингулярності, яка мала місце в минулому, деякий скінченний час тому. Виходячи з міркувань, які були подані вище, ми вважаємо, що Всесвіт не існував завжди. Але якщо він мав початок, то, згідно з класичною загальною теорією відносності, щоб дізнатися, який саме розв'язок рівнянь Ейнштейна описує Усесвіт, нам потрібно знати його початковий стан, тобто точний стан, з якого почався розвиток Усесвіту. Можливо, Бог і встановив спочатку закони природи, але, здається, відтоді Він дозволив Усесвіту розвиватися відповідно до них без божественного втручання. Як Він вибирав початковий стан або конфігурацію Всесвіту? Які були «граничні умови» на початку часів? Ці запитання спричиняють труднощі у використанні класичної загальної теорії відносності, бо застосувати її до моменту зародження Всесвіту не можна.

Водночас квантова теорія гравітації відкриває нові можливості для розв'язання зазначеної проблеми. У квантовій теорії простір-час може бути скінченним за протяжністю й водночас не мати сингулярностей, які окреслюють

межу. Такий простір-час скидається на поверхню Землі, тільки з двома додатковими вимірами. Як уже було відзначено, мандруючи куди-небудь поверхнею Землі, ніколи не зустрінеш нездоланного бар'єра або краю й урешті-решт повернешся туди, де почав шлях, не ризикуючи звалитися з краю світу або зникнути в сингулярності. Тож, якби нам поталанило створити квантову теорію гравітації, вона дозволила б позбутися сингулярностей, у яких втрачають чинність закони природи.

Якщо простір-час не має жодних меж, то ні до чого з'ясовувати, як він поводить себе на границі, — немає потреби знати початковий стан Усесвіту. Не існує краю простору-часу, що змушує нас звертатися до ідеї Бога або шукати якийсь новий закон, щоб встановити граничний стан простору-часу. Це можна висловити так: граничний стан Усесвіту полягає в тому, що він не має жодних меж. Такий Усесвіт буде цілком самодостатнім, закритим для зовнішніх впливів. Його не можна ні створити, ні зруйнувати. Він просто є. Поки ми вважали, що Всесвіт має початок, роль Творця здавалася зрозумілою. Але якщо Всесвіт справді абсолютно автономний й не має ні меж, ні початку, ні кінця, то відповідь на запитання, у чому полягає роль Творця, уже не така очевидна.

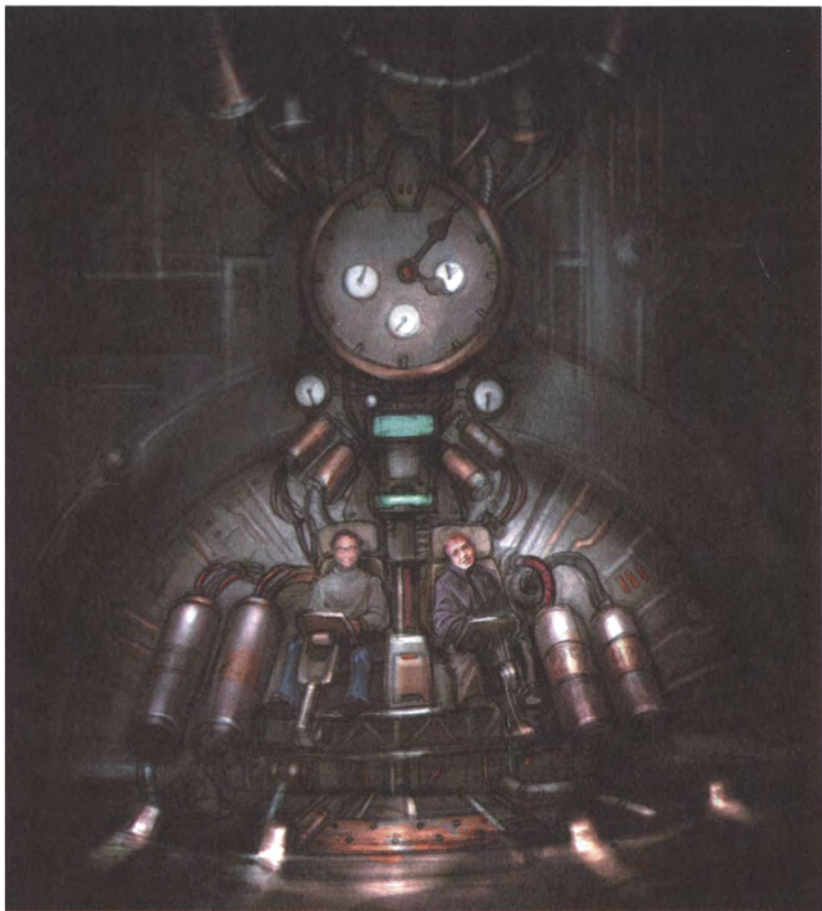
КРОТОВИНИ Й МАНДРІВКИ В ЧАСІ

У попередніх розділах ми показали, як змінювалися погляди на природу часу з розвитком наукової думки. До початку XX століття люди вірили в абсолютний час. Інакше кажучи, кожній події можна було однозначно приписати число, назване «часом», і всі справні годинники мали показувати однаковий інтервал часу між двома подіями. Однак відкриття постійності швидкості світла для будь-якого спостерігача незалежно від його руху призвело до створення теорії відносності й відмови від ідеї єдиного абсолютного часу. Відтепер моменти часу для подій годі було встановити однозначно. Виявилося, що кожен спостерігач має свою власну мірку часу, яку фіксує його годинник, і зовсім необов'язково, що покази годинників різних спостерігачів збігатимуться. Таким чином, час став більш суб'єктивним поняттям, що стосувалося спостерігача, який його вимірював. Проте час трактували так, ніби це пряма залізнична колія, якою можна рухатися тільки вперед або назад. А що, коли залізнична колія має відгалуження або окружні шляхи й поїзд, рухаючись уперед, повертається на станцію, яку вже проїздив? Інакше кажучи, чи можна подорожувати в майбутнє чи в минуле? Таку можливість вивчав Герберт Веллс у *«Машині часу»*, а слідом за ним і багато інших фантастів. Однак чимало ідей наукової фантастики, як-от

підводні човни й мандрівки на Місяць, стали науковими фактами. То які перспективи мандрівок у часі?

Мандрівки в майбутнє можливі. Теорія відносності показує, що можна створити машину часу, яка перенесе вас у майбутнє. Ви входите в неї, чекаєте, виходите й виявляєте, що на Землі минуло значно більше часу, аніж сплигло для вас. Сьогодні в нас немає технологій, які дозволили б таке здійснити, але це лише справа техніки: ми знаємо, що це можливо. Один зі способів збудувати таку машину часу — скористатися парадоксом близнят, який ми обговорювали в розділі 6. Цей спосіб передбачає, що машина часу, у якій ви сидите, злітає, розганяється близько до швидкості світла, рухається так якийсь час (залежно від того, як далеко вперед у часі ви хочете потрапити) і потім вертається назад. Вас не повинно дивувати, що машина часу є водночас космічним кораблем, бо, згідно з теорією відносності, час і простір взаємопов'язані. У кожному разі впродовж усієї процедури єдиним «місцем» для вас буде приміщення машини часу. Коли ж ви вийдете назовні, то переконаєтеся, що на Землі минуло більше часу, ніж сплигло для вас. Ви здійснили мандрівку в майбутнє. Але чи зможете повернутися? Чи можемо ми створити умови, необхідні для подорожі *назад* у часі?

Перший натяк на те, що закони фізики дозволяють людям подорожувати назад у часі, з'явився 1949 року, коли Курт Гедель знайшов новий розв'язок рівнянь Ейнштейна, тобто нову структуру простору-часу, допустиму з погляду загальної теорії відносності. Рівнянням Ейнштейна задовольняє чимало різних математичних моделей Усесвіту. Вони різняться, наприклад, початковими або граничними умовами. Ми маємо перевірити їхні фізичні передбачення, щоб вирішити, чи відповідають ті Всесвіту, у якому ми живемо.



Автори в машині часу

Як математик Гедель уславився своїм доведенням того, що не всі істинні твердження можна довести, навіть якщо справа зводиться до спроби довести всі істинні твердження предмета так чітко окресленого й формального, як арифметика. Подібно до принципу невизначеності теорема Геделя про неповноту може бути фундаментальним обмеженням нашої здатності пізнавати й передбачати Всесвіт. Науковець познайомився із загальною теорією відносності, коли на схилі віку працював з Ейнштейном у Принстонському

інституті перспективних досліджень. Простір-час Геделя мав цікаву особливість: увесь Усесвіт у нього обертався.

Який зміст має твердження, що обертається весь Усесвіт? Обертатися — значить крутитися навколо чогось, але чи не означає це існування нерухомого центра обертання? Тож можна було б запитати: обертається щодо чого? Відповідь має дещо технічний характер, але зводиться здебільшого до того, що віддалена матерія обертається щодо напрямків, на які вказують осі дзиг або гіроскопів. У просторі-часі Геделя обертання має математичний побічний ефект, який полягає в тому, що якби хтось віддалився на велику відстань від Землі, а потім повернувся, то міг би потрапити на Землю до того моменту, коли вирушив у путь.

Ейнштейна неабияк засмучувало те, що його рівняння допускають подібний розв'язок. Він вважав, що загальна теорія відносності не повинна дозволяти подорожі в часі. Але розв'язок Геделя, хоча й задовольняє рівнянням Ейнштейна, не відповідає Всесвіту, у якому ми живемо. Спостереження показують, що наш Усесвіт не обертається (принаймні, це непомітно). Окрім того, Усесвіт Геделя не розширюється, як наш. Однак за минулі роки науковці, що аналізують рівняння Ейнштейна, знайшли інші, прийнятні з точки зору загальної теорії відносності структури простору-часу, що допускають подорож у минуле. Проте спостереження мікрохвильового фону й дані про поширеність легких елементів свідчать, що ранній Усесвіт не був викривлений так, як передбачають ці моделі і як потрібно, щоб стали можливі мандрівки в часі. Той-таки висновок випливає і з теоретичних засад за умови, що припущення про відсутність кордонів справедливе. Отже, запитання звучить так: «Якщо Всесвіт від початку не викривлений так, як потрібно для мандрівок у часі, чи вдасться нам згодом деформувати окремі ділянки простору-часу, щоб це

ВМОЖЛИВИТИ?»

І оскільки час і простір взаємопов'язані, то вас знову-таки не має дивувати, що питання про подорожі назад у часі тісно переплітається з проблемою переміщення на надсвітлових швидкостях. Неважко показати, що подорожі в часі передбачають надсвітлове пересування: зробивши останній етап вашої подорожі переміщенням назад у часі, ви зможете здійснити всю свою одісею в найкоротший термін, а значить, зможете пересуватися з необмеженою швидкістю! Але, як ми побачимо, правильне й зворотне твердження: якщо ви здатні переміщатися з необмеженою швидкістю, то зможете й подорожувати назад у часі — одне неможливе без іншого.

Проблема подорожей із надсвітловою швидкістю дуже цікавить фантастів. Її суть полягає в такому: згідно з теорією відносності, відправивши космічний корабель до найближчої зорі, Альфи Центавра, розташованої на відстані близько чотирьох світлових років, ми не можемо розраховувати, що його команда повернеться до нас і повідомить про свої відкриття раніше, ніж років за вісім. А якби експедиція вирушила до центра нашої Галактики, цей термін становив би щонайменше сто тисяч років. Кепська ситуація для історій про міжгалактичні війни!

Теорія відносності залишає одну втіху, що знову-таки стосується парадоксу близнюків: можна зробити так, що космічним мандрівникам подорож здасться набагато коротшою, ніж тим, хто залишився на Землі. Але невелика втіха, коли, провівши в космічному рейсі кілька років, ви виявите по поверненні, що всі, кого ви залишили, відійшли у вічність тисячу років тому. І щоб підігріти природну людську цікавість до своїх історій, фантасти змушені були припустити, що одного разу ми навчимося пересуватися

швидше за світло. Більшість із них, здається, не усвідомлює того, що можливість переміщатися таким чином тягне за собою, згідно з теорією відносності, і можливість подорожей у минуле, як сказано в лімерику:

Панянка Вайт — де правду діти?! —
Здолала обігнати світло.
Одного дня вона в світі
Собі надумала піти
І звечора вернула звідти.

Пояснення цього взаємозв'язку полягає в тому, що, згідно з теорією відносності, не тільки не існує ніякої єдиної для всіх спостерігачів міри часу, але й що за певних умов немає потреби навіть у тому, щоб спостерігачі погоджувалися щодо черговості подій. Зокрема, якщо дві події А і В відбуваються так далеко одна від одної в просторі, що ракета має переміщатися швидше за світло, щоб устигнути від події А до події В, тоді два спостерігачі, що пересуваються з різними швидкостями, можуть не зійтись у тому, що сталося раніше: подія А чи подія В.

Припустімо, наприклад, що подія А — це фініш заключного стометрового забігу на Олімпійських іграх 2012 року, а подія В — відкриття 100004-го Конгресу Альфи Центавра. Припустімо, що для спостерігача на Землі подія А передуює події В. Скажімо, подія В відбувається за рік — 2013 року за часом Землі. Оскільки Землю й Альфу Центавра розділяє близько чотирьох світлових років, ці дві події задовольняють зазначеним вище критеріям: хоча А відбувається раніше, ніж В, щоб устигнути від А до В, ви маєте пересуватися швидше за світло. За таких умов спостерігачеві на Альфі Центавра, який віддаляється від Землі зі швидкістю, близькою до швидкості світла, здавалося б, що події мають зворотний порядок: подія В відбувається *раніше*

за подію А. Цей спостерігач стверджував би, що, коли пересуватися швидше від світла, можна встигнути від події В до події А. Отже, якби у вас був дар обганяти світло, ви змогли б повернутися назад від А до В до початку забігу й зробити ставку, знаючи напевно, хто переможе!

Тут виникає проблема, пов'язана з подоланням світлового бар'єру. Теорія відносності стверджує, що мірою наближення до швидкості світла космічному кораблю для прискорення потрібно дедалі більше енергії. Це має експериментальні підтвердження, отримані не для космічних кораблів, а для елементарних частинок, які розганяються на прискорювачах (такі мають, наприклад, Національна прискорювальна лабораторія імені Енріко Фермі в США або Європейський центр ядерних досліджень). Нам вдається прискорювати частинки до 99,99 % від швидкості світла, але не перескочити світловий бар'єр, скільки б не нарощували потужність установки. Так і з космічними кораблями: незалежно від потужності ракети вони не можуть розганятися більше за швидкість світла. А оскільки мандрівка в минуле можлива тільки тоді, коли можлива надсвітлова швидкість, цей факт, здавалося б, виключає й швидкісні космічні перельоти, і подорожі назад у часі.

Тут, однак, можливий якийсь обхідний маневр. Можна було б спробувати деформувати простір-час так, щоб відкрився короткий шлях із А в В. Один із способів полягає в тому, щоб створити з А у В так звану кротовину. Як підказує сам термін, кротовина являє собою тонку просторово-часову трубку, яка може з'єднувати дві далекі одна від одної сфери майже плаского простору.

Це щось на кшталт того, як ви стоїте біля підніжжя найвищого гірського хребта. Щоб опинитися потойбіч, треба довго дертися вгору, а потім спускатися. Але без цього

можна обійтися, якщо зробити гігантський горизонтальний тунель крізь товщу скельної породи.



Кротовина

Припустімо, що можна створити або знайти кротовину, що веде з нашої Сонячної системи до Альфи Центавра. Протяжність такої нори могла б становити лише кілька мільйонів кілометрів, хоча у звичайному просторі відстань між Землею й Альфою Центавра дорівнюєдесь сорока мільйонам мільйонів кілометрів. Якби ми передали через кротовину звістку про підсумки стометрового забігу, наше повідомлення встигло б досягти мети задовго до відкриття конгресу. Але тоді спостерігач, який летить до Землі, теж знайшов би кротовину, яка дозволила б йому дістатися Землі після відкриття конгресу на Альфі Центавра й перед початком забігу. Тож кротовини подібно до будь-яких інших способів надсвітлового переміщення дозволили б подорожувати в минуле.

Ідею кротовин, які з'єднують різні сфери простору-часу, не вигадали фантасти, вона походить із вельми авторитетного джерела. 1935 року Альберт Ейнштейн і Натан Розен написали працю, у якій доводили, що загальна теорія відносності допускає утворення того, що вони назвали «мостами» й що нині відоме як кротовини. Мости Ейнштейна — Розена не могли існувати достатньо довго для того, щоб через них пройшов космічний корабель: варто було б

кротовині замкнутися, і корабель потрапляв би в сингулярність. Однак було висловлено пропозицію, що технологічно розвинена цивілізація могла б тримати кротовину відкритою. Можна показати, що для досягнення цього або для згортання простору-часу в будь-який інший спосіб, який допускає мандрівки в часі, потрібен регіон простору-часу з негативною кривизною, подібною до поверхні сідла. Звичайна матерія, що відзначається позитивною густиною енергії, надає простору-часу позитивної кривизни, що нагадує поверхню сфери. Тому для такої деформації простору-часу, яка дозволить подорожувати в минуле, знадобиться матерія з негативною густиною енергії.

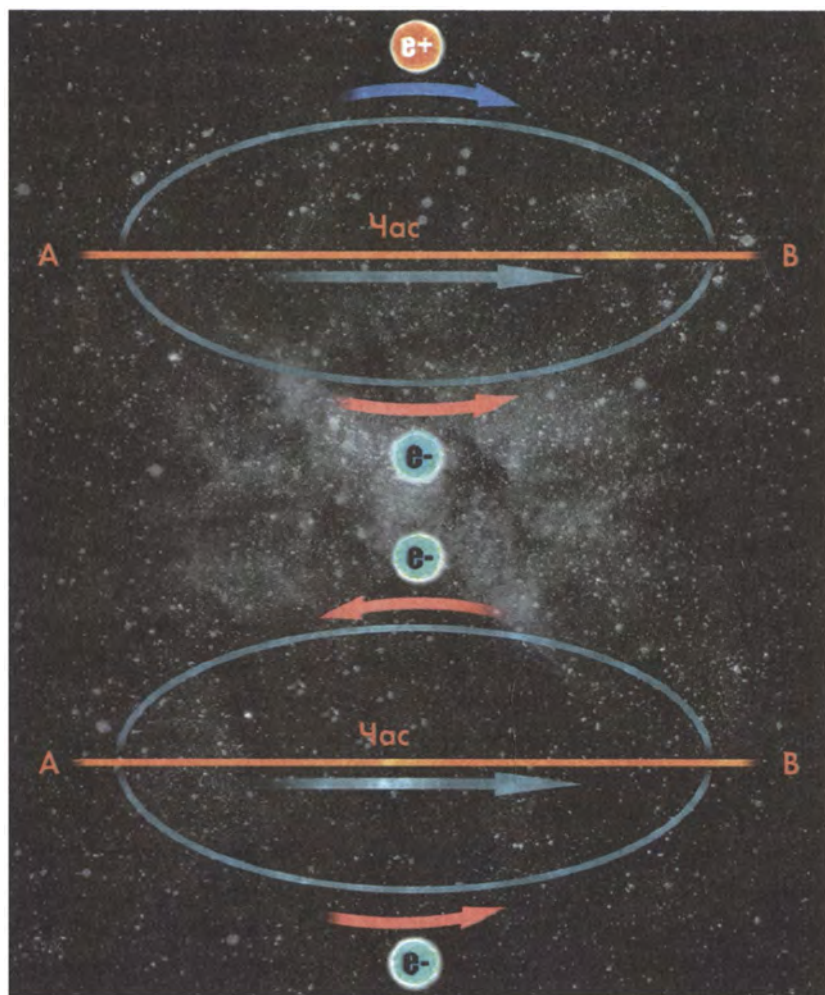
Що означає негативна густина енергії? Енергія чимось нагадує гроші: маючи позитивний баланс, ви можете по-різному розподіляти кошти за рахунками, але, згідно з класичними законами, які визнавали на початку ХХ століття, з жодного рахунку не можна зняти більше грошей, аніж на ньому лежить. Таким чином, ці класичні закони виключали негативну густину енергії і, отже, будь-яку можливість мандрівок назад у часі. Однак, як ми показали в попередніх розділах, класичні закони поступилися місцем квантовим, заснованим на принципі невизначеності. Квантові закони ліберальніші й допускають перевитрату коштів на одному або двох рахунках за умови, що загальний баланс позитивний. Інакше кажучи, квантова теорія допускає негативну густину енергії в деяких сферах простору за умови, що вона компенсується позитивною густиною енергії в інших так, щоб енергія в цілому залишалася позитивною. Тож у нас є підстави вважати, що простір-час можливо деформувати, причому згорнути його можна так, що це зробить можливими мандрівки в часі.

Згідно з фейнманівським методом інтегралів за траєкторіями своєрідні мандрівки в минуле відбуваються в масшта-

бі окремих частинок. У моделі Фейнмана частинка, що рухається вперед у часі, еквівалентна античастинці, що пересувається назад у часі. Його математичний апарат дозволяє розглядати пару з частинки й античастинки, які виникають разом і потім взаємно знищуються, як одну частинку, що пересувається по замкнутій петлі в просторі-часі. Щоб побачити це, спочатку зобразимо процес у традиційний спосіб. У певний момент — скажімо, у момент А — утворюються частинка й античастинка. Обидві вони рухаються вперед у часі. Згодом, у момент В, частинка й античастинка вступають у взаємодію й знищують одна одну. До моменту А й після моменту В жодних частинок не існує. Проте, якщо дотримуватися теорії Фейнмана, ви можете поглянути на це інакше. У момент А виникає єдина частинка. Вона рухається вперед у часі до моменту В, а потім повертається назад у часі до моменту А. Замість частинки й античастинки, що спільно рухаються вперед у часі, існує лише один об'єкт, який пересувається по петлі від моменту А до моменту В і назад. Коли об'єкт рухається вперед у часі (від моменту А до моменту В), він називається частинкою. Коли ж він пересувається назад у часі (від моменту В до моменту А), це античастинка, що мандрує вперед у часі.

Така мандрівка в часі здатна зумовити спостережувані ефекти. Тому правомірно запитати: «Чи допускає квантова теорія мандрівки в часі макроскопічного масштабу, які люди могли б використовувати?» На перший погляд здається, що допускає. Фейнманівські інтеграли за траєкторіями мають охоплювати всі можливі сценарії, а значить, і ті, у яких простір-час деформовано такою мірою, що він допускає мандрівки в минуле.

Якщо враховувати ці теоретичні міркування, можна було б сподіватися, що прогрес науки й техніки дозволить нам



Античастинка за Фейнманом

урешті-решт сконструювати машину часу. І все-таки, навіть якщо вважати, що відомі закони фізики не виключають можливості мандрівок у часі, чи є інші причини сумніватися в тому, що вони можливі?

Передусім виникає запитання: «Якщо можна мандрувати в минуле, чому ніхто не прибув до нас із майбутнього й не

сказав, як це робити?» Не виключено, що є вагомі причини, чому було б нерозумно розкривати таємницю мандрівок у часі нам, що стоять на примітивному щаблі розвитку. І якщо людська натура не зміниться радикально, марно сподіватися, що який-небудь гість із майбутнього не втримає язика за зубами. Звичайно, дехто стверджуватиме, нібито НЛО — свідчення того, що до нас навідуються або інопланетяни, або люди з майбутнього. (Враховуючи відстані до інших зір, дістатися до нас за більш-менш прийнятний час інопланетяни могли б, тільки пересуваючись швидше за світло, тож ці дві можливості, мабуть, можна вважати еквівалентними.) Відсутність візитерів із майбутнього правомірно також списати на те, що минуле зафіксоване, адже ми спостерігали його й переконалися, що воно не має деформацій, необхідних для мандрівок назад із майбутнього. Разом із тим майбутнє невідоме й відкрите і в ньому цілком може трапитися необхідне викривлення. Це означало б, що будь-які мандрівки в часі обмежені майбутнім по відношенню до нас часом, а в сьогоденні немає жодних шансів на появу капітана Кірка й зорельота «Enterprise»¹.

Сказане, може, і пояснює, чому ми поки не спостерігаємо напливу туристів із майбутнього, але не розв'язує іншої проблеми, яка виникне, коли хтось повернеться назад у часі й змінить перебіг подій. Як ми тоді позбудемося клопотів з історією? Уявіть, наприклад, що хтось повернувся в минуле й передав нацистам секрет атомної бомби. Або ж ви повернулися назад і відправили на той світ свого прапрадіда, перш ніж він надбав дітей. Є багато версій цього парадоксу, але суть у них одна — протиріччя, пов'язані з можливістю вільно змінювати минуле. Схоже, є два способи усунення парадоксів, пов'язаних із мандрівками в часі.

¹ Ідеться про героя відомої фантастичної саги «Зоряний шлях» й однойменних повнометражних фільмів, а також про зореліт, на якому він мандрував зі своєю командою астронавтів.

Перший підхід можна назвати концепцією узгодженої історії. Він передбачає, що, навіть якщо простір-час деформовано таким чином, що можна переміститися в минуле, те, що відбувається в просторі-часі, має бути узгодженим розв'язком фізичних рівнянь. Інакше кажучи, ви не зможете переміститися назад у часі, якщо історія вже зафіксувала, що ви не поверталися, не випускали душу зі свого прапрадіда й не вчинили нічого такого, що суперечило б історії того, як ви досягли свого поточного стану в теперішньому часі.

Більше того, повернувшись у минуле, ви б не могли змінити зафіксовану історію — просто слідували б їй. У поданій картині минуле й майбутнє зумовлені: вони позбавляють вас свободи волі, можливості чинити на свій розсуд.

Звичайно, можна стверджувати, що вільна воля — усе одно ілюзія. Якщо справді існує всеосяжна фізична теорія, яка керує всім сущим, то слід вважати, що вона детермінує й наші дії. Однак подана теорія робить це так, що її наслідки годі перелічити для такого складного організму, як людська істота, і, крім того, вона містить певний елемент випадковості, що відповідає квантово-механічним ефектам. Це дозволяє говорити, що наші декларації про вільну волю людини виникають із неможливості передбачити, що вона робитиме. Однак, якщо людина полетить на космічному кораблі й повернеться раніше, ніж вирушила, ми зможемо передбачити, що вона зробить, оскільки це буде частиною зафіксованої історії. Таким чином, у подібній ситуації мандрівник у часі не мав би свободи волі в жодному розумінні.

Інший можливий спосіб розв'язання парадоксів мандрівки в часі можна називати гіпотезою альтернативної історії. Його ідея полягає в тому, що, коли мандрівники в часі повертаються в минуле, вони потрапляють в альтернативні версії історії, які відрізняються від зафіксованої. Таким

чином, вони можуть діяти вільно, бо нічого не пов'язує їх із попередньою історією. Стівен Спілберг удосталь розважився, обігруючи ці уявлення в стрічках серії *«Назад у майбутнє»*: Марті Макфлай, повернувшись у минуле, зміг змінити на краще історію взаємин своїх батьків.

Гіпотеза альтернативної історії вельми нагадує те, як Річард Фейнман пояснює квантову теорію за допомогою інтегралів за траєкторіями. Цей підхід стверджує, що у Всесвіті немає однієї-єдиної історії — правильніше вважати, що в ньому існують усі можливі історії, причому кожна — з тією чи тією ймовірністю. Проте між методом Фейнмана й гіпотезою альтернативної історії, схоже, є важлива відмінність. В інтегралах Фейнмана кожна траєкторія цілком охоплює простір-час і все, що в ньому міститься. Простір-час може бути деформований таким чином, що на ракеті вдалося б вирушити в минуле. Але ракета лишилася б у тому самому просторі-часі, а значить, у тій-таки історії, яка має бути послідовною. Таким чином, фейнманівська теорія інтегралів за траєкторіями радше підтримує гіпотезу послідовної, а не альтернативної історії.

Уникнути зазначених проблем допомогло б прийняття тези, яку можна назвати гіпотезою про захист хронології. Ця теза стверджує, що закони фізики забороняють перенесення інформації в минуле макроскопічними тілами. Подана гіпотеза не доведена, але є підстави вважати, що вона правильна. Як показують обчислення, за умов деформації простору-часу, достатньої для мандрівок у минуле, на заваді таким мандрівкам здатні стати квантово-механічні ефекти. Щоправда, цілковитої впевненості в цьому ще немає й питання про можливість мандрівок у часі поки залишається відкритим. Але в жодному разі не бийтеся з кимось об заклад: раптом ваш опонент шахраює, знаючи майбутнє наперед?

СИЛИ ПРИРОДИ Й ОБ'ЄДНАННЯ ФІЗИКИ

Як ми вже відзначали в розділі 3, було б дуже важко побудувати повну об'єднану теорію всього у Всесвіті відразу. Натомість людство рухалося вперед шляхом створення часткових теорій, які описують обмежене коло явищ, нехтуючи іншими ефектами або даючи їм наближену чисельну оцінку. Відомі нам сьогодні закони фізики містять чимало числових величин, подібних до заряду електрона або співвідношення між масами протона й електрона, які ми не можемо — принаймні поки що — вивести з теорії. Ми змушені визначати їх у дослідний спосіб і підставляти в рівняння. Одні називають ці числа фундаментальними константами, інші — поправковими коефіцієнтами.

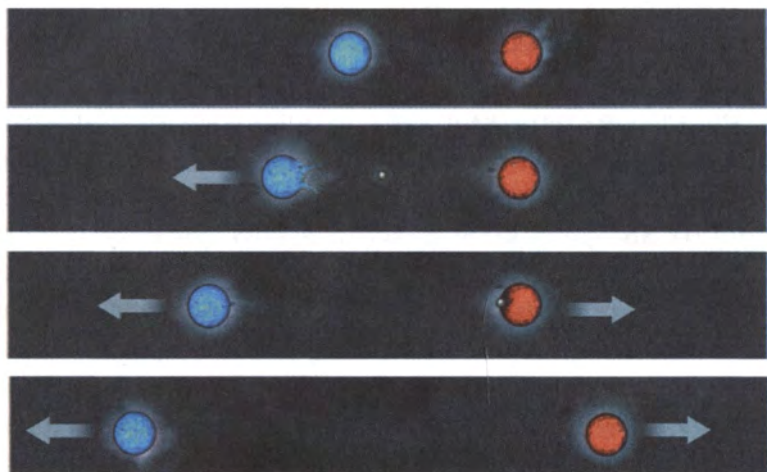
Однак, хоч би якої точки зору ви не дотримувалися, залишається вельми прикметним фактом те, що значення подібних чисел неначе навмисно вибрані так, щоб уможливити розвиток життя. Наприклад, якби заряд електрона був трохи іншим, це порушило б баланс електромагнітних і гравітаційних сил у зорях і вони або не змогли б спалювати водень і гелій, або вже не вибухали б. Можна сподіватися, що врешті-решт буде створена повна, послідовна, об'єднана теорія, яка вбере в себе всі часткові теорії як наближення і яку не доведеться підганяти під спостережувані факти шляхом добору довільних сталих, як-от величина заряду електрона.

Пошуки такої теорії відомі як робота з «об'єднання фізики». В останні роки життя Ейнштейн витратив багато зусиль, марно намагаючись намацати підступи до об'єднаної теорії, але час для неї тоді ще не настав: існували часткові теорії гравітаційної та електромагнітної взаємодій, але про ядерні сили було відомо обмаль. Окрім того, Ейнштейн відмовився визнавати реальність квантової механіки, попри ту важливу роль, яку він відіграв у її розвитку. Утім принцип невизначеності, схоже, є фундаментальною властивістю Всесвіту, у якому ми живемо. Тому успішна об'єднана теорія конче повинна містити цей принцип.

Перспективи створення такої теорії сьогодні видаються набагато реалістичнішими, адже ми набагато більше знаємо про Всесвіт. Але слід остерігатися зайвої самовпевненості: нас уже захоплювали «блискучі» думки! На початку ХХ століття, наприклад, вважали, що все можна пояснити в термінах властивостей безперервної матерії, таких як пружність і теплопровідність. Відкриття будови атома й принципу невизначеності розвіяли це переконання. І знову 1928 року лауреат Нобелівської премії фізик Макс Борн сказав групі відвідувачів Геттінгенського університету: «Фізиці, якою ми її знаємо, за шість місяців буде покладено край». Його впевненість ґрунтувалася на недавньому відкритті Дірака — рівнянні, яке описувало електрон. Тоді вважали, що подібне рівняння буде виведене й для протона — єдиної відомої на той час іншої частинки — і це покладе край теоретичній фізиці. Однак відкриття нейтрона і ядерних сил перекреслило таку можливість. Незважаючи на сказане, є підстави для обережного оптимізму: можливо, наші пошуки абсолютних законів природи наближаються-таки до завершення.

Квантова механіка припускає, що носіями всіх сил, тобто взаємодій між частинками матерії, теж є частинки. Що від-

бувається, коли така частинка матерії — скажімо, електрон або кварк — випускає частинку, що виступає носієм взаємодії? Віддача від її випускання змінює швидкість частинки матерії подібно до того, як постріл змушує гармату відкочуватися назад. Частинка-переносник взаємодії стикається з іншою частинкою матерії, і та її поглинає, змінюючи свій рух. Урешті-решт випускання й поглинання дає той самий результат, як якби існувала сила, що діє між двома частинками матерії.



Обмін частинками

Кожну силу переносять частинки особливого типу. Якщо частинки, що переносять силу, мають велику масу, це ускладнює їхнє утворення та обмін ними на значних відстанях. Отже, сили, носіями яких виступають частинки, мають відносно невеликий радіус дії. І навпаки, під час перенесення сил частинками, що не мають власної маси, радіус дії сили істотно збільшується. Частинки-переносники сил, якими обмінюються частинки матерії, називаються віртуальними, адже, на відміну від «реальних», їх не можна безпосередньо виявити за допомогою детектора частинок. Ми знаємо, однак, що вони існують завдяки породжувано-

му цими частинками й вимірюваному ефекту: вони зумовлюють взаємодію частинок матерії.

Частинки-переносники можна розділити на чотири категорії. Потрібно підкреслити, що цей розподіл є штучним, надається до побудови часткових теорій і не має глибшого сенсу. Більшість фізиків сподіваються вийти зрештою на об'єднану теорію, яка представить усі чотири взаємодії як різні аспекти єдиної взаємодії. Мабуть, багато хто погодиться, що це основна мета сучасної фізики.

Першу категорію становить гравітаційна сила, чи сила тяжіння. Це універсальна сила, тобто кожна частинка відчуває на собі дію гравітації пропорційно до своєї маси або енергії. Гравітаційне тяжіння можна представити як обмін віртуальними частинками — гравітонами. Гравітація — найслабкіша з чотирьох сил; вона настільки слабка, що ми взагалі не помічали б цю силу, якби не дві її особливі властивості: гравітація може діяти на великих відстанях і вона завжди притягує. Це означає, що найслабкіші гравітаційні сили між окремими частинками двох великих тіл на кшталт Землі й Сонця здатні складатися в сумарну дуже істотну силу. Три інші сили або близькодійні, або можуть як притягати, так і відштовхувати, а тому виявляють тенденцію до взаємної нейтралізації.

Наступна категорія — електромагнітна взаємодія, що виникає між електрично зарядженими частинками, такими як електрони й кварки, але не впливає на нейтральні частинки на кшталт нейтрино. Електромагнітна взаємодія набагато сильніша за гравітацію: електричні сили між двома електронами приблизно в мільйон мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів мільйонів (одиниця із сорока двома нулями) разів сильніші за гравітаційні. Однак електричний заряд буває двох типів: позитивний і негативний. Між двома позитивними або двома негативними

зарядами виникає відштовхування, а між позитивним і негативним — притягання.

Велике тіло на кшталт Землі або Сонця містить майже однакову кількість позитивних і негативних зарядів. Таким чином, тяжіння й відштовхування між окремими частинками майже врівноважують одне одного, і електромагнітна сила, що виникає внаслідок цього, дуже невелика. Однак у масштабах атомів і молекул електромагнітні сили домінують. Електромагнітне тяжіння між негативно зарядженими електронами й позитивно зарядженими протонами атомного ядра утримує електрони на орбіті навколо ядра атома, так само як гравітаційне тяжіння змушує Землю обертатися навколо Сонця. Електромагнітне тяжіння зазвичай пояснюване обміном великої кількості частинок, які називаються фотонами. Знову-таки ці фотони — віртуальні частинки. Але коли електрон переміщається з однієї орбіти на іншу, ближче до ядра, то вивільняється енергія й випускається реальний фотон. За відповідної довжини хвилі його може реєструвати людське око або такий детектор фотонів, як, наприклад, фотоплівка. І навпаки, коли реальний фотон стикається з атомом, він може перемістити електрон на більш віддалену від ядра орбіту. На це йде енергія фотона, тому він поглинається.

Третя категорія називається слабкою ядерною взаємодією. У щоденному житті ми не стикаємося з нею безпосередньо. Слабка взаємодія відповідальна за радіоактивність — мимовільний розпад атомних ядер. Природа слабких ядерних сил залишалася не цілком зрозумілою до 1967 року, коли Абдус Салам з Імперського коледжу в Лондоні й Стівен Вайнберг із Гарварду незалежно один від одного запропонували теорії, які об'єднували слабку взаємодію з електромагнітною подібно до того, як Максвелл об'єднав учення про електрику й магнетизм десь на століття раніше. Теоретичні передбачення так точно збіглися з результатом експерименту, що

1979 року Салама й Вайнберга вшанували Нобелівською премією з фізики разом зі ще одним науковцем із Гарварду — Шелдоном Глешоу, який теж запропонував схожу об'єднану теорію електромагнітних і слабких ядерних сил.

До четвертої категорії належить найпотужніша з усіх сил — сильна ядерна взаємодія. Вона також не стосується безпосередньо нашого щоденного досвіду, але це та сама сила, яка «зв'язує» більшу частину нашого світу. Вона утримує кварки всередині протонів і нейтронів і не дає протонам і нейтронам покинути ядро атома. Якби не сильна ядерна взаємодія, відштовхування позитивно заряджених протонів розірвало б усі атомні ядра у Всесвіті, окрім ядер водню, що складаються з одного протона. Вважають, що переносником сильної ядерної взаємодії є глюон — частинка, яка взаємодіє тільки сама із собою і з кварками.

Успішне об'єднання електромагнітної й слабкої ядерної взаємодій підштовхнуло до численних спроб додати до них концепцію сильної ядерної взаємодії в рамках доктрини, названої «великим об'єднанням». У цій назві є частка перебільшення: отримувані теорії не такі вже великі та не цілком об'єднані, якщо вони не беруть до уваги гравітацію. Окрім того, ці об'єднані теорії не назвеш повними, адже вони містять безліч параметрів, величину яких не можна передбачити теоретично — їй доводиться підбирати експериментально. Але так чи інакше ці теорії можуть стати наступним кроком до повної, вичерпної об'єднаної теорії.

Основна складність у пошуках теорії, яка об'єднає гравітацію з іншими силами, полягає в тому, що загальна теорія відносності, яка описує гравітацію, є єдиною неквантовою теорією: вона не бере до уваги принцип невизначеності. Часткові теорії, що описують усі інші взаємодії, ґрунтуються на квантовій механіці, тому для об'єднання з ними теорії

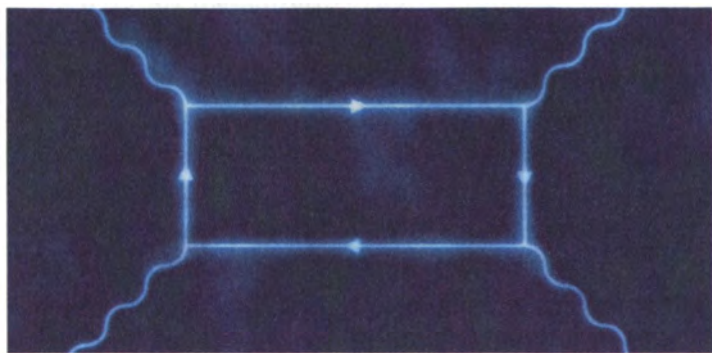
гравітації потрібно знайти спосіб, який дозволяв би включити принцип невизначеності в загальну теорію відносності, тобто сформулювати квантову теорію гравітації. Це завдання поки що ніхто не зміг вирішити.

Створити квантову теорію гравітації так важко тому, що, згідно з принципом невизначеності, навіть «порожній» простір заповнений віртуальними парами частинка — античастинка. В іншому випадку, якби «порожній» простір був справді геть порожнім, усі поля — гравітаційне, електромагнітне та інші — точно дорівнювали б нулю. Однак величина поля й швидкість її зміни в часі пов'язані між собою так само, як положення частинки та її швидкість (тобто зміна положення). З принципу невизначеності випливає, що чим точніше ми знаємо одну з цих величин, тим менш точні наші знання про іншу. Якби поле в порожньому просторі точно дорівнювало нулю, воно мало б точну (нульову) величину й точну (знову-таки нульову) швидкість зміни, що суперечило б принципу невизначеності. Таким чином, має існувати певний мінімальний рівень невизначеності чи квантових флуктуацій величини поля.

Ці коливання можна розглядати як пари частинок, що разом з'являються в певний момент, розлітаються, а потім знову зближуються й знищують одна одну.

Це віртуальні частинки, подібні до тих, які виступають переносниками сил. На відміну від реальних, їх неможливо безпосередньо спостерігати за допомогою детекторів частинок. Однак породжувані ними непрямі прояви, як-от невеликі зміни енергії електронних орбіт, цілком вимірювані й, на диво, точно узгоджуються з теоретичними передбаченнями. У випадку з флуктуаціями електромагнітного поля йдеться про віртуальні фотони, а у випадку з флуктуаціями гравітаційного — про віртуальні гравітони. Однак

флуктуації полів слабкої й сильної взаємодій являють собою віртуальні пари частинок речовини, таких як електрони або кварки. У подібних віртуальних парах один елемент буде частинкою, а другий — античастинкою (коли йдеться про світло й гравітацію, частинки й античастинки однакові).



*Фейнманівська діаграма віртуальної пари
частинка — античастинка*

Проблема полягає в тому, що віртуальні частинки мають енергію. І оскільки існує нескінченне число пар віртуальних частинок, вони фактично повинні були б мати нескінченну енергію, а значить — згідно з відомим рівнянням Ейнштейна $E = mc^2$, — і нескінченну масу. Відповідно до загальної теорії відносності, це призвело б до такого гравітаційного викривлення простору, що Всесвіт стиснувся б до нескінченно малих розмірів. Однак нічого такого явно не відбувається! Аналогічні — мабуть, абсурдні — нескінченності виникають і в інших часткових теоріях — сильної, слабкої й електромагнітної взаємодій. Але для них існує так звана процедура перенормування, яка дозволяє позбуватися нескінченностей. Завдяки їй ми й змогли створити квантові теорії цих взаємодій.

Перенормування вводить нові нескінченності, які математично скорочуються з нескінченностями, що виникають

у теорії. Однак це скорочення не обов'язково має бути повним. Можна вибрати нові нескінченності так, щоб за скорочення залишалися невеликі рештки. Ці рештки називаються перенормованими величинами в теорії.

Хоча подібна операція досить сумнівна з точки зору математики, вона, здається, таки працює. Застосування цієї операції в теоріях сильної, слабкої й електромагнітної взаємодій дає передбачення, які неймовірно точно узгоджуються зі спостереженнями. Проте використання перенормування для пошуків повної фізичної теорії має серйозний недолік, оскільки означає, що маси частинок і сили взаємодій не можна передбачити теоретично, а слід підганяти під результати експериментів. Спроби застосувати перенормування для усунення квантових нескінченностей із загальної теорії відносності поки дозволили привести до придатного вигляду тільки дві величини — силу тяжіння й космологічну сталу, яку Ейнштейн увів у свої рівняння, будучи впевненим, що Всесвіт не розширюється (див. розділ 7). Як виявляється, їх коригування недостатньо для позбавлення від усіх нескінченностей. Тому квантова теорія гравітації й далі передбачає, що деякі величини, наприклад викривлення простору-часу, нескінченні, тоді як на практиці вони цілком піддаються вимірюванню й виявляються кінцевими! Науковці давно підозрювали, що ця обставина стане перепорою на шляху включення принципу невизначеності в загальну теорію відносності, але 1972 року їхні побоювання були нарешті підкріплені детальними обчисленнями. Через чотири роки було запропоноване можливе розв'язання проблеми, назване супергравітацією. Однак з'ясування того, чи залишає супергравітація місце для будь-яких нескінченностей, вимагало таких складних і важких обчислень, що ніхто за них не взявся. За попередніми оцінками, навіть комп'ютеру на це знадобилися б роки, і дуже високою була ймовірність того, що в підрахунки вкралася б при-

наймні одна помилка, а може, і більше. Тож упевнитися в правильності результату можна було б тільки в тому разі, якби хтось іще повторив обчислення й отримав той самий результат, що здавалося вкрай мало ймовірним! Незважаючи на ці проблеми й на те, що частинки, які фігурують у теоріях супергравітації, схоже, ніяк не співвідносяться з відомими науці частинками, більшість науковців вважали, що супергравітація придатна до перенормування і, ймовірно, є розв'язанням проблеми об'єднання фізики. Цю ідею сприймали як найкращий спосіб об'єднання гравітації з рештою взаємодій. Але 1984 року відбувся дивовижний поворот у бік сімейства теорій, які називаються теоріями струн.

До появи теорій струн вважали, що кожна з фундаментальних елементарних частинок може перебувати в певній точці простору. У теоріях струн фундаментальні об'єкти не точкові частинки, а протяжні, тобто мають довжину, але без жодних інших вимірів, як струна з нескінченно малим поперечним перерізом. Ці об'єкти можуть мати кінці (так звані відкриті струни) або згортатися в кільце (замкнуті струни). Частинка в кожен момент часу займає одну точку простору. Струна ж у кожен момент часу займає в просторі лінію. Дві струни можуть злитися в одну. При цьому якщо йдеться про відкриті струни, то просто з'єднуються їхні кінці, а якщо про закриті — це нагадує те, як дві холоші з'єднуються в одну пару штанів. Точнісінько так само одна струна може розділитися на дві.

Якщо елементарні об'єкти у Всесвіті являють собою струни, що ж таке тоді точкові частинки, які ми, схоже, спостерігаємо в експериментах? У теоріях струн те, що раніше вважали різними точковими частинками, розглянуто як різні види хвиль, що поширюються по струнах, на кшталт тих, які пробігають посмикуваною мотузкою повітряного змія. Самі ж струни разом зі своїми коливаннями настільки

малі, що навіть найкращі наші технології не здатні виявити їхню форму, тому-то у всіх експериментах вони й поводяться як крихітні, безформні точки. Уявіть, що ви розглядаєте крихітну порошок. Зблизька або через збільшувальне скло ви можете побачити, що вона має неправильну або навіть струноподібну форму, однак на відстані порошок здається якоюсь невиразною цяткою.

У теорії струн випускання або поглинання однієї частинки іншою відповідає поділу або злиттю струн. Наприклад, у фізиці елементарних частинок гравітаційний вплив Сонця на Землю пояснюється тим, що частинки сонячної речовини випускають гравітони — частинки-переносники взаємодії, — а частинки речовини Землі їх поглинають. У теорії струн цей процес видається Н-подібною діаграмою, що нагадує з'єднання труб (теорія струн узагалі чимось нагадує водогін). Дві вертикальні палички букви «Н» відповідають частинкам речовини Сонця й Землі, а горизонтальна поперечина — гравітон, який сновигає між ними.

Теорія струн має цікаву історію. Вона була сформульована наприкінці 1960-х років, під час пошуків теорії сильної взаємодії. Ідея полягала в тому, що такі частинки, як протон і нейтрон, можна розглядати як коливання струни. Сильна взаємодія між частинками відповідала б відрізкам струни, що з'єднують інші струни, як у павутинні. Щоб ця теорія передбачала спостережувану величину сильної взаємодії між частинками, струни мали скидатися на гумові стрічки, натягнуті із зусиллям близько 10 тонн.

1974 року Жоель Шерк із Парижа й Джон Шварц із Каліфорнійського технологічного інституту опублікували статтю, у якій показали, що теорія струн може описати природу гравітаційної взаємодії, але тільки якщо натяг струни становитиме близько тисячі мільйонів мільйонів мільйонів

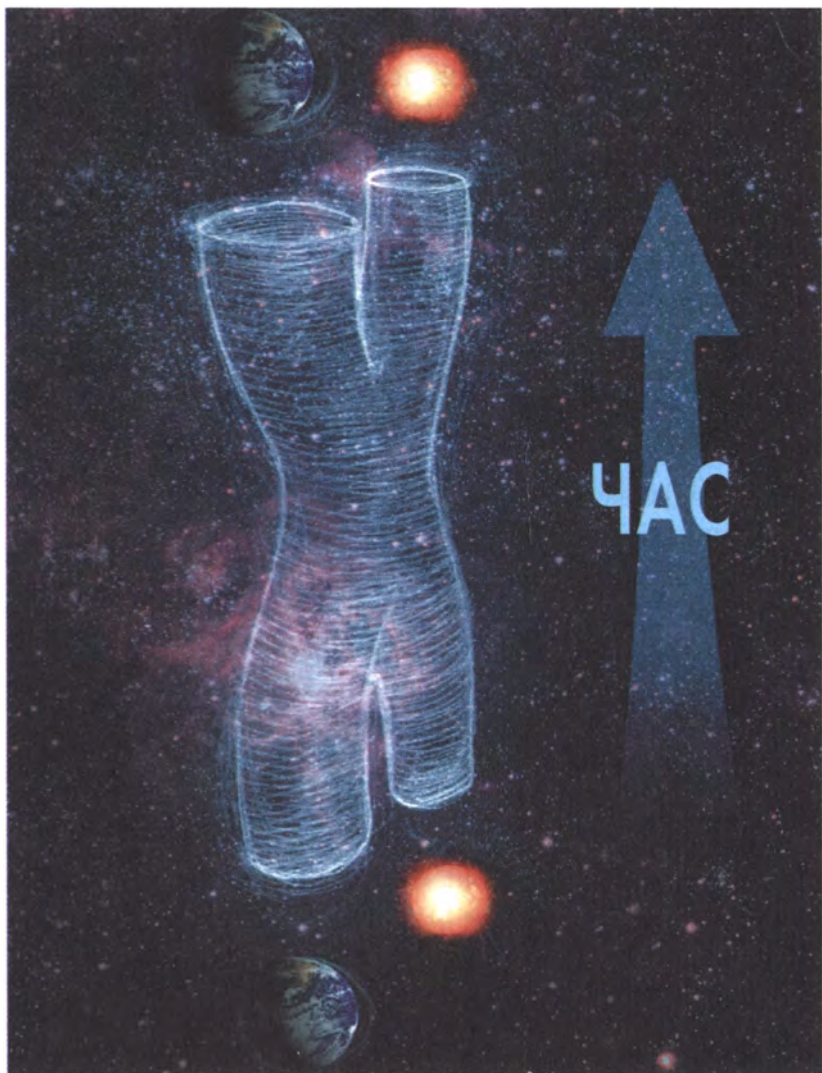
мільйонів мільйонів мільйонів тонн (одиниця з тридцятьма дев'ятьма нулями). У звичайних масштабах довжини теорія струн давала ті самі передбачення, що й загальна теорія відносності, але на дуже маленьких відстанях — менших від тисячної мільйонної мільйонної мільйонної мільйонної частки сантиметра (тобто від сантиметра, діленого на одиницю з тридцятьма трьома нулями) — їхні передбачення розходилися. Стаття не привернула до себе великої уваги лише тому, що того часу більшість науковців відмовилися від тлумачення сильної взаємодії в термінах теорії струн на користь теорії кварків і глюонів, яка, здавалося, набагато більше відповідала спостереженням. Шерк помер за трагічних обставин (він хворів на діабет і впав у кому, а поряд не виявилось нікого, хто міг би ввести йому інсулін). Тож Шварц залишився фактично єдиним прихильником теорії струн, причому тепер уже струн із набагато вищим передбачуванним натягом.

1984 року цікавість до струн раптово відродилася, і на це було дві причини. З одного боку, не увінчалися особливим успіхом спроби довести, що супергравітація не містить нескінченностей і здатна пояснити існування спостережуваних видів елементарних частинок. З другого — побачила світ нова стаття Джона Шварца, цього разу написана спільно з Майком Гріном із лондонського Коледжу королеви Марії. Ця праця показувала, що теорія струн здатна пояснити існування експериментально спостережуваних частинок, які мають щось на кшталт вродженої «ліворукості». (Поведінка більшості частинок не змінилася б, якби експериментальну установку замінили її дзеркальним відображенням; але поведінка поданих частинок змінюється, ніби вони є «лівшами» або «правшами», а не володіють однаково обома руками.)

Хай там як, а багато науковців незабаром заходилися працювати над теорією струн, і була створена її нова версія,

яка, здавалося, могла пояснити існування спостережуваних частинок.

Теорії струн також ведуть до нескінченності, але вважають, що в правильній версії теорії всі вони взаємно знищуються



Фейнманівська діаграма в теорії струн

(хоча це ще невідомо напевно). Набагато серйозніша інша проблема: теорії струн сумісні тільки з простором-часом, який має або десять, або двадцять шість вимірів замість звичайних чотирьох!

Звісно, наявність у простору-часу додаткових вимірів — це такий собі загальник наукової фантастики. Справді, вони пропонують ідеальний спосіб подолання обмежень, які загальна теорія відносності накладає на надсвітлові переміщення й мандрівки в минуле (див. розділ 10). Ідея полягає в тому, щоб дістатися до мети через додаткові виміри. Уявіть, що простір, у якому ми існуємо, має тільки два виміри й зігнутий, наче поверхня якірного кільця або бублика. Якщо ви перебуваєте на внутрішній стороні поверхні й хочете дістатися в діаметрально протилежну точку кільця, вам доведеться рухатися до мети по колу з внутрішнього боку кільця. Але якби ви могли вийти в третій вимір, вам удалося б відірватися від поверхні кільця й зрізати шлях.

Чому ми не спостерігаємо всі ці додаткові виміри, якщо вони справді існують? Чому для нашого сприйняття доступні тільки три просторові виміри й один часовий? Найпевніше, тому, що інші виміри не схожі на ті, до яких ми звикли. Вони згорнуті до дуже невеликого розміру, щось на кшталт однієї мільйонної мільйонної мільйонної мільйонної мільйонної частки дюйма. Це так мало, що просто непомітно для нас: ми фіксуємо лише один вимір часу й три виміри простору, у яких простір-час практично плаский. Щоб зрозуміти, що воно таке, уявіть поверхню соломинки. Глянувши на неї зблизька, ви зауважите, що поверхня двовимірна. Тобто положення точки на соломинці описується двома числами — відстанню, вимірюною уздовж соломинки, і відстанню, вимірюною впоперек її довжини, по колу. Але поперечний розмір набагато менший за поздовжній. Ось чому здалеку здається, ніби соломинка позбавлена

товщини, одновимірна, і, схоже, задати положення точки на ній можна одним, поздовжнім виміром. Прихильники теорії струн стверджують, що так само стоїть справа і з простором-часом: у мізерно малих масштабах він десятивимірний і сильно викривлений, але в більших масштабах ні викривлення, ані додаткових вимірів ви не помітите.

Якщо описана картина правильна, це кепська новина для людей, які мріють про космічні мандрівки: додаткові виміри, мабуть, занадто малі, щоб вмістити космічний корабель. Однак цей опис ставить велике питання й перед науковцями: чому тільки деякі, а не всі виміри скручені в маленьку кульку? Імовірно, у молодому Всесвіті всі виміри були сильно викривлені. Чому один часовий і три просторові виміри розрівнялися, а інші й далі тісно скручені?

Одна з можливих відповідей — антропний принцип, який можна сформулювати таким чином: ми бачимо Всесвіт таким, яким він є, адже ми існуємо. Існує дві версії антропного принципу — слабка й сильна. Слабкий антропний принцип стверджує, що у Всесвіті, неймовірно великому або навіть нескінченному в просторі і/або часі, умови, необхідні для розвитку розумного життя, трапляються тільки в деяких регіонах, обмежених у просторі й часі. Тому розумним істотам, які проживають у таких регіонах, не випадає дивуватися тому, що їхнє місцеперебування у Всесвіті відповідає умовам, необхідним для життя. Вони чимось схожі на багатія, що живе у фешенебельному районі й не бачить злиднів.

Деякі теоретики йдуть набагато далі й пропонують сильну версію принципу. Згідно з нею, існує або багато різних усесвітів, або багато різних регіонів одного Всесвіту, кожен із яких має власну початкову конфігурацію і, можливо, власний набір фізичних законів. У більшості таких усе-

світів фізичні умови не сприяють розвитку складних організмів, і лише деякі всесвіти, подібні до нашого, стали колись розумних істот, які замислилися над запитанням: «Чому Всесвіт такий, яким ми його бачимо?» Тоді відповідь проста: «Якби він був інший, нас би тут не було!»

Мало хто візьметься оскаржувати дієвість або користь слабого антропного принципу, але сильний принцип як пояснення спостережуваного стану Всесвіту може наштотуватися на безліч заперечень. Наприклад, що мають на увазі, коли кажуть, буцімто всі ці різні всесвіти існують? Якщо вони справді відокремлені один від одного, тоді те, що відбувається в іншому всесвіті, вочевидь, аж ніяк не може позначитися на тому, що діється в нашому. Отже, дотримуючись принципу економії, ми повинні виключити їх із нашої теорії. Якщо ж це лише різні регіони одного Всесвіту, у кожному з них повинні діяти ті самі фізичні закони, адже інакше не можна було б безперервно пересуватися з одного регіону в інший. У цьому разі єдина відмінність між регіонами полягала б у їхніх початкових конфігураціях, через що сильний антропний принцип звівся б до слабого.

Антропний принцип дає одну з можливих відповідей на запитання, чому додаткові виміри теорії струн скручені. Двох просторових вимірів, схоже, недостатньо для розвитку таких складних істот, як ми. Наприклад, двовимірним тваринам, що живуть на одновимірній Землі, доводилося б перелазити одна через одну, щоб розійтися. Якби двовимірне створіння з'їло щось таке, що не змогло б повністю перетравити, то змушене було б викинути неперетравлені залишки назовні тим же шляхом, яким проковтнуло, адже наявність наскрізного проходу через тіло ділила б таке створіння на дві окремі частини: наше двовимірне створіння просто розвалилося б. Так само важко уявити, як у двовимірному створінні могла б циркулювати кров.

Наявність більш ніж трьох просторових вимірів також створила б проблеми. У цьому разі гравітаційне тяжіння між двома тілами зменшувалося б із їх віддаленням одне від одного швидше, ніж якби вимірів було три. (У трьох вимірах, коли відстань збільшується удвоє, тяжіння слабшає вчетверо. У чотирьох вимірах воно зменшувалося б при цьому у вісім разів, у п'яти вимірах — у шістнадцять тощо.) Це може призвести до того, що орбіти планет, які обертаються навколо Сонця (таких як Земля), стануть нестійкими: найменше відхилення від колової орбіти (наприклад, спричинене гравітаційним тяжінням інших планет) призвело б до того, що Земля, рухаючись по спіралі, почала б віддалятися від Сонця або наближатися до нього. Ми б або замерзли, або спопеліли. У світі більш ніж трьох просторових вимірів ця ж зміна поведінки сили тяжіння зі зміною відстані насправді не дозволила б самому Сонцю існувати в стійкому стані, коли тиск урівноважує силу тяжіння. Сонце або розвалилося б на шматки, або стиснулося б, перетворившись на чорну діру. У всякому разі воно не могло б служити джерелом тепла й світла для життя на Землі. У масштабах атома електричні сили, які утримують електрони на орбітах навколо ядра, поводитися б подібно до гравітації. Таким чином, електрони, пересуваючись по спіралях, або залишали б атом, або врзалися б у його ядро. Так чи інакше, існування атомів у відомому нам вигляді було б неможливим.

Отже, видається очевидним, що життя — принаймні відоме нам — може існувати лише в тих регіонах простору-часу, де є тільки один вимір часу й три виміри простору, не скручені до мізерно малих розмірів. Це означає, що можна було б звернутися до слабкого антропного принципу, якби вдалося довести, що теорія струн принаймні допускає існування подібних областей Усесвіту. А вона, схоже, таке допускає. Можливо, існують інші області Всесвіту або інші всесвіти (що б це не означало), у яких усі

виміри скручені або ж розгорнуто понад чотири виміри, але в таких регіонах не буде розумних істот, які змогли б спостерігати іншу кількість вимірів.

Іще одна проблема з теорією струн полягає в тому, що є мінімум п'ять різних її версій (дві теорії відкритих струн і три — замкнутих) і мільйони способів, у які, згідно з теорією, можуть бути скручені додаткові виміри. Чому потрібно вибрати тільки одну теорію струн і один вид скручення? Протягом певного часу здавалося, що відповіді на це запитання немає, і наука тупцювала на місці. Але десь із 1994 року науковці почали виявляти властивість, яка дістала назву «дуальність»: різні теорії струн і способи скручення додаткових вимірів вели до тих самих результатів у чотирьох вимірах. Також, окрім частинок, які займають окрему точку в просторі, і струн, які є лініями, були знайдені інші об'єкти, які називаються p -бранами й займають у просторі об'єми з двома й більше вимірами. (Можна вважати, що частинка — це 0-брана, струна — 1-брана, але, крім них, є ще p -брани, у яких p може набувати значень від 2 до 9. 2-брану можна розглядати як якусь подобу двовимірної мембрани. Важче уявити брани з численними вимірами!) Схоже, зараз має місце своєрідна рівноправність (у сенсі рівності голосів) теорій супергравітації, струн і p -бран: вони, здається, узгоджуються, але жодну не можна вважати основною. Усі ці часткові теорії виглядають як різні наближення до якоїсь більш фундаментальної, причому кожна з них правильна у своїй сфері.

Науковці шукають цю фундаментальну теорію, але поки що марно. Не виключено, що може не бути єдиного формулювання фундаментальної теорії, як не можна, за Геделем, викласти арифметику в термінах єдиного набору аксіом. Ця ситуація нагадує проблеми, що постають у картографії: ви не зможете обійтися однією пласкою мапою, щоб



Якби існувало більше ніж три просторових вимірів, орбіти планет були б нестабільними і планети або упали б на зірку, або покинули її поле тяжіння

відобразити сферичну поверхню Землі або поверхню якірного кільця (тора). Вам знадобляться щонайменше два аркуші мапи для Землі й чотири для тора, щоб коректно відтворити всі точки. Кожна мапа справедлива для обмеженого регіону, але різні ділянки мап мають області перекривання. Колекція мап забезпечує повний опис поверхні. Можливо, й у фізиці необхідно використовувати різні формулювання теорії в різних ситуаціях, але два різні формулювання мають узгоджуватися в ситуаціях, де можна застосувати обидва. Якщо це справді так, то всі добірки різних формулювань можна було б розцінювати як повну об'єднану теорію, нехай і не виражену у формі одного набору постулатів. Але й це може бути більшим від того, що допускає природа. Що, коли створити об'єднану теорію неможливо в принципі? Чи не женемося ми за міражем? Здається, є три можливості:

1. Створення повної об'єднаної теорії (або добірок взаємно перекриваних формулювань) можливе, і коли-небудь ми її сформулюємо, якщо вистачить розуму.
2. Не існує жодної остаточної теорії Всесвіту, є лише нескінченна послідовність теорій, які описують Усесвіт дедалі точніше, проте ніколи не досягають абсолютної точності.
3. Не існує взагалі жодної теорії Всесвіту: поза визначеними рамками події годі передбачити, адже відбуваються вони випадковим і довільним чином.

Дехто схиляється на користь третьої можливості на тій підставі, що існування вичерпного набору законів позбавило б Бога свободи змінювати Свій задум і втручатися в хід світотворення. Однак оскільки Господь усесильний, то чи не міг би Він обмежити Свою свободу, якби захотів? Це чомусь схоже на давній парадокс: чи здатен Бог створити такий важкий камінь, що сам не здолає його підняти? Фактично ідея про те, що Бог міг би передумати, є прикладом помилки, на яку вказував іще Блаженний Августин, говорячи про те, що уявляють, ніби Бог існує в часі, тоді як час — це лише властивість Усесвіту, який Він створив. Господь, як можна припустити, знав, що робить, створюючи світ!

З появою квантової механіки ми прийшли до усвідомлення того, що події не можна передбачити з абсолютною точністю: завжди залишається елемент невизначеності. Якщо хочеться, можна приписати випадковість втручання Бога. Але це було б дуже дивне втручання: відсутній навіть натяк на те, що воно має певну мету. В іншому випадку це за визначенням не було б випадковістю. Сьогодні ми фактично усунули третю з перерахованих можливостей, переглянувши мету науки: ми прагнемо сформулювати

набір законів, який дозволить передбачати події в межах, встановлених принципом невизначеності.

Друга можливість, тобто існування нескінченної послідовності дедалі досконаліших теорій, поки узгоджується з усім нашим досвідом. У багатьох випадках експериментатори підвищували точність вимірювань або виконували спостереження нового типу тільки для того, щоб виявити непередбачені наявною теорією нові явища, для тлумачення яких створювали досконалішу теорію. Вивчаючи елементарні частинки, які взаємодіють із чимраз вищими енергіями, ми можемо очікувати відкриття нових рівнів будови матерії, більш фундаментальних за кварки й електрони, які нині вважають «елементарними» частинками.

Гравітація може покласти край цій низці захованих одна в одну «коробочок». Якби існувала частинка з енергією, що перевищує так звану енергію Планка, концентрація її маси була б така висока, що вона відрізала б себе від решти Всесвіту й перетворилася б на невелику чорну діру. Таким чином, послідовність дедалі досконаліших теорій, схоже, повинна мати певну межу за переходу до чимраз вищих енергій, а отже, має існувати якась остаточна теорія Всесвіту. Утім, енергія Планка дуже далека від енергій, які ми здатні отримати на сучасних лабораторних установках. І ми не зможемо подолати цей розрив за допомогою прискорювачів елементарних частинок, які з'являться в осяжному майбутньому. А саме такі енергії, либонь, існували на світанні еволюції Всесвіту. Є непогані шанси, що вивчення раннього Всесвіту й вимоги математичної узгодженості приведуть до повної об'єднаної теорії в межах часу життя декого з нас, якщо, звичайно, доти людство саме не висадить себе в повітря!

Яке значення мало б відкриття остаточної теорії Всесвіту?

Як було пояснено в розділі 3, ми ніколи не можемо бути цілком упевнені, що справді створили точну теорію, оскільки теорії не можна довести. Але якби теорія була математично послідовною й завжди давала б передбачення, що узгоджувалися б зі спостереженнями, було б розумно вважати, що вона правильна. Це поставило б крапку в довгому й чудовому розділі історії спроб людського розуму пізнати Всесвіт. Але це також революційно змінило б розуміння пересічною людиною законів, які керують Усесвітом.

За часів Ньютона освічена людина могла опанувати всі знання, накопичені цивілізацією, принаймні в загальних рисах. Але відтоді темпи розвитку науки зробили це неможливим. Оскільки теорії постійно переглядають з урахуванням нових спостережень, то їх ніколи не викладають досить стисло й просто для пересічних людей. Для цього потрібно бути фахівцем, але навіть тоді ви маєте право сподіватися на повне розуміння лише дешифрі наукових теорій. Окрім того, прогрес науки такий стрімкий, що в школі чи університеті завжди викладають дещо застарілі знання. Лише небагатьом людям вдається стежити за швидко розширюваними межами знання, якщо вони присвячують цьому весь свій час і обмежуються вузькою сферою. Натомість більшість населення Землі не має уявлення про здійснені прориви й спричинене ними пожвавлення. Водночас, якщо вірити Еддінгтону, сімдесят років тому тільки дві людини розуміли загальну теорію відносності. Нині її розуміють десятки тисяч випускників університетів і не один мільйон людей принаймні знайомий з ідеями Ейнштейна. Якби вдалося створити повну об'єднану теорію, то поява стислого й простого її викладу була б лише питанням часу, і подібно до теорії відносності її почали б викладати в школах, принаймні загально. Ми всі змогли б тоді дістати певне уявлення про закони, які керують Усесвітом і відповідають за наше існування.

Однак навіть відкриття повної об'єднаної теорії не означало б появу можливості передбачити всі події. На це є дві причини. Перше обмеження накладає на нашу передбачувальну здатність квантово-механічний принцип невизначеності. Немає ніяких способів його обійти. На практиці, однак, це перше обмеження менш жорстке, ніж друге. Друге обмеження випливає з того факту, що ми, швидше за все, не зможемо розв'язати рівняння такої теорії, окрім тих, що описують вельми прості ситуації. Як уже було відзначено, ніхто не може точно розв'язати квантові рівняння для атома, у якому навколо ядра обертається більш ніж один електрон. Ми навіть не маємо точного розв'язку задачі про рух трьох тіл у такій простій теорії, як закон усесвітнього тяжіння Ньютона. І труднощі стає тим більше, чим більша кількість тіл і чим складніша теорія. Наближені розв'язки зазвичай задовольняють наші практичні потреби, але вони навряд чи відповідають великим очікуванням, пов'язаним із поняттям «об'єднана теорія всього сущого»!

Сьогодні ми вже знаємо закони, що керують поведінкою матерії у всіх станах, окрім найбільш екстремальних. Зокрема, ми знаємо закони, які постають фундаментом хімії та біології. Але ми, безумовно, не можемо вважати завдання цих дисциплін вирішеними. І наразі ми досягли не дуже великих успіхів у прогнозуванні людської поведінки за допомогою математичних рівнянь! Отже, навіть знайшовши набір основних законів, ми опинимося перед складним для людської думки завданням удосконалення наближених методів, не вирішивши яке, не навчимося прогнозувати можливі наслідки в складних реальних ситуаціях. Повна узгоджена об'єднана теорія — це лише перший крок. Наша мета полягає у всеосяжному поясненні подій, які відбуваються навколо нас, і нашого власного існування.

ВИСНОВОК

Ми розуміємо, що живемо в загадковому, приголомшливому світі. Ми прагнемо досягнути сенс того, що бачимо навколо, і ставимо складні запитання: «Яка природа Всесвіту? Яке наше місце в ньому? Звідки він і ми з'явилися? І чому Всесвіт такий, який він є?» Намагаючись відповісти на ці запитання, ми приймаємо ту або ту «картину світу». І нескінченна вежа з черепах, які підтримують пласку Землю, — така ж «картина», як і теорія суперструн. Вони обидві є концепціями будови Всесвіту, хоча остання набагато більш математична й точніша за першу. Їм обом бракує наочних підтверджень: ніхто ніколи не бачив велетенську черепаху, на спині якої стоїть Земля, але ніхто не спостерігав і суперструн. Утім, черепащачу теорію не назвеш гарною науковою концепцією, адже вона передбачає, що люди можуть звалитися з краю світу. Цей прогноз не узгоджується з досвідом, якщо тільки не виявиться, що він пояснює згодом зникнення людей у Бермудському трикутнику!

Найбільш ранні спроби теоретичного опису й пояснення Всесвіту містили ідею про те, що перебігом подій і природних явищ керують духи з людськими емоціями, діючи так само непередбачувано, як і люди. Ці духи населяли природні об'єкти, як-от річки й гори, а також небесні

тіла на кшталт Сонця й Місяця. Їх потрібно було умиряти й задобрювати, щоб земля родила, а пори року змінювали одна одну. Згодом, однак, було помічено існування певних закономірностей: Сонце завжди вставало на сході й сідало на заході незалежно від того, були принесені жертви богу денного світила чи ні. Окрім того, Сонце, Місяць і планети рухалися по небу по тих самих визначених шляхах, які вдавалося досить точно передбачити. Сонце й Місяць іще могли вважати богами, але боги ці підкорялися суворим законам, очевидно ніколи не порушуючи їх, якщо не зважати на такі історії, як переказ про Ісуса Навіна, який зупинив Сонце.



*Від черепах до викривленого простору.
Античний та сучасний погляд на Всесвіт*

Спочатку ці правила й закономірності виявлялися тільки під час спостережень за зоряним небом і в деяких інших ситуаціях. Однак із розвитком цивілізації, надто в останні триста років, таких законів і правил відкривали дедалі більше. Успіхи, досягнуті завдяки цим законам, спонукали Лапласа на початку XIX століття постулювати науковий детермінізм. Він припустив, що має існувати набір законів, які точно визначають розвиток Усесвіту з огляду на його стан у певний момент часу.

Лапласівський детермінізм мав два недоліки: він нічого не говорив про те, якими повинні бути закони, і не визначав початкову конфігурацію Всесвіту. Цей вибір було залишено Богові. Той вирішував, як починатиметься Всесвіт і яким законам він має підкорятися, але після зародження Всесвіту Бог не мав втручатися. Фактично прерогативи Бога обмежували тими питаннями, які не розуміла наука XIX століття.

Сьогодні ми знаємо, що надії, які Лаплас покладав на детермінізм, не виправдалися, принаймні так, як він передбачав. Принцип невизначеності квантової механіки має на увазі, що деякі пари фізичних величин, наприклад положення й швидкість елементарної частинки, не можна одночасно передбачити як завгодно точно. Квантова механіка дає собі раду з цією ситуацією завдяки групі теорій, у яких елементарні частинки не мають точних положень і швидкостей, а постають у вигляді хвиль. Ці квантові теорії є детерміністськими в тому розумінні, що вони визначають точні закони еволюції хвилі в часі. Якщо відомі характеристики хвилі в один момент часу, то можна обчислити, якими вони будуть у будь-який інший момент. Елемент непередбачуваності, випадковості виникне, тільки якщо ми спробуємо інтерпретувати хвилю в термінах положень і швидкостей частинок. Але, можливо, ми помиляємося й немає ніяких частинок із положеннями й швидкостями, а є самі лише хвилі. І ми просто намагаємося підігнати ці хвилі під наші упереджені уявлення про положення й швидкості. Як наслідок маємо невідповідність — причину удаваної непередбачуваності.

По суті, ми вже переглянули завдання науки: це відкриття законів, які дозволять передбачати події в межах, установлених принципом невизначеності. Однак залишається

запитання: «Як або чому обрано ці закони й початковий стан Усесвіту?»

У цій книжці особливу увагу було приділено законам, які керують гравітацією, адже саме вона зумовлює великомасштабну структуру Всесвіту, хоча і є найслабкішою з чотирьох основних сил. Закони гравітації несумісні з панівним донедавна поглядом, згідно з яким Усесвіт незмінний у часі: те, що гравітація завжди притягує, означає, що Всесвіт має або розширюватися, або стискатися. Згідно із загальною теорією відносності, у далекому минулому мав існувати стан Усесвіту з нескінченною густиною — Великий Вибух, який можна вважати початком часу. Якщо Всесвіт знову стиснеться, то в майбутньому на нього має очікувати інший стан нескінченної густини — «велике стискання», яке стане кінцем часу. Навіть якщо Всесвіт у цілому не стиснеться, сингулярності мають виникнути в обмежених його регіонах, де колапс призведе до утворення чорних дір. Ці сингулярності стали б кінцем часу для будь-кого, хто потрапив би в чорну діру. За Великого Вибуху й інших сингулярностей порушуються всі фізичні закони й Всевишньому, як і раніше, цілком вільно вирішувати, що повинно статися і як має початися Всесвіт.

Об'єднання квантової механіки із загальною теорією відносності, схоже, відкриває нам нову, незнану досі можливість — обмежений чотиривимірний простір-час без сингулярностей або кордонів, який подібний до поверхні Землі, однак відзначається більшою кількістю вимірів. Схоже, ця ідея дозволяє пояснити чимало спостережуваних властивостей Усесвіту, наприклад його великомасштабну однорідність і відхилення від однорідності в меншому масштабі, подібні до галактик, зір і навіть людей. Але якщо Всесвіт цілком автономний, не має

сингулярностей або меж і його цілком можна описати об'єднаною теорією, то це змушує докорінно переглянути роль Бога як Творця.

Ейнштейн якось запитав: «Чи мав Господь свободу, коли створював Усесвіт?» Якщо припущення про відсутність у Всесвіті кордонів слушне, то Бог не міг похвалитися свободою вибору початкових умов. Звичайно, Він усе ще міг би вибирати закони, яким підкоряється Всесвіт. Але й це насправді не назвеш великим вибором: можливо, лише одна або якась невелика кількість повних об'єднаних теорій на кшталт теорії струн є несуперечливими й допускають існування таких складних структур, як люди, здатні досліджувати закони Всесвіту й ставити запитання про природу Бога.

Але навіть якщо існує тільки одна повна об'єднана теорія, вона являє собою щонайбільше набір правил і рівнянь. Що ж «вдихає життя» у формули й створює Всесвіт, який вони описують? Звичайний підхід науки — побудова математичної моделі — не дозволяє відповісти на запитання про те, чому повинен існувати Всесвіт, описуваний моделлю. Навіщо Всесвіт має нести тягар існування? Невже об'єднана теорія така чарівна, що викликає до життя сама себе? Інакше їй потрібен Творець, а якщо так, то чи має Він іншу владу над Усесвітом? І хто створив Його самого?

Досі більшість науковців були надто зайняті створенням нових теорій, які пояснюють, *що* таке Всесвіт, замість того щоб шукати відповіді на запитання, *навіщо* він існує. Водночас філософи, справа яких — питати «Навіщо?», не могли захопитися за прогресом природничих доктрин. У XVIII столітті філософи вважали все людське знання, зокрема природничі науки, сферою своїх зацікавлень і обговорювали питання на кшталт «Чи був у Всесвіту початок?». Однак

у XIX й XX століттях природничі науки занадто тісно переплелися з технікою й математикою, щоб залишатися доступними розумінню філософів або кого-небудь іще, окрім небагатьох фахівців. Філософи скоротили царину своїх досліджень настільки, що найвідоміший мислитель XX століття Вітгенштайн відзначив: «Єдине завдання, що залишилося філософії, — це аналіз мови». Який занепад після славетної традиції філософії від Аристотеля до Канта!

Однак, якщо ми все-таки створимо повну теорію, згодом її основні принципи мають стати зрозумілі кожному, а не тільки кільком обраним. Тоді ми всі — філософи, науковці й пересічні люди — зможемо долучитися до дискусії на тему, чому існуємо ми самі й наш Усесвіт. Якщо ми знайдемо відповідь, це буде остаточний тріумф людського розуму, адже тоді нам відкриється божественний задум.

АЛЬБЕРТ ЕЙНШТЕЙН

Зв'язок Ейнштейна з політикою ядерного озброєння загальновідомий: він підписав знаменитий лист до президента Франкліна Рузвельта, переконуючи, що Сполучені Штати мають серйозно поставитися до ідеї створення атомної бомби, і він же в повоєнні роки докладав усіх зусиль для відвернення ядерної війни. Але це були не просто окремі вчинки науковця, втягнутого у світ політики. Життя Ейнштейна, кажучи його власними словами, «розривалося між політикою й рівняннями».

Початок політичної діяльності науковця збігся з Першою світовою війною, коли він був професором у Берліні. Зневажаючи війну, яку вважав марнуванням людських життів, Ейнштейн почав брати участь в антивоєнних демонстраціях. Своїми виступами на захист акцій грома-

дянської непокори й публічною підтримкою тих, хто відмовлявся служити у війську, він не здобув поваги з боку колег. Після війни науковець доклав чималих зусиль, прагнучи замирити нації й покращити міжнародні відносини. Це також не додало Ейнштейну популярності, і невдовзі політичні погляди ускладнили йому в'їзд до Сполучених Штатів навіть для читання лекцій.

Другим за вагомістю мотивом для Ейнштейна був сіонізм. Єврей за походженням, він відкидав біблійну ідею Бога. Однак зростання антисемітизму як перед Першою світовою війною, так і під час неї поступово привело Ейнштейна до солідарності з єврейською спільнотою, а згодом він став відкритим прихильником сіонізму. І знову непопулярність не завадила науковцеві відкрито висловлювати свої думки. Його теорії зазнавали нападок, була навіть створена антиейнштейнівська організація. Одного зухвальця було засуджено за підбурювання до вбивства Ейнштейна й оштрафовано аж на шість доларів. Але науковець не звертав на це жодної уваги. Після виходу у світ книжки *«Сто авторів проти Ейнштейна»* він зауважив: «Якби я помилявся, вистачило б і одного!»

1933 року до влади в Німеччині прийшов Гітлер. Ейнштейн саме перебував в Америці, тож оголосив, що не повернеться на батьківщину. Коли нацисти влаштували наліт на будинок науковця й відібрали в нього банківський рахунок, берлінська газета вийшла із заголовком: «Гарні новини від Ейнштейна — він не повернеться». З огляду на загрозу нацистської агресії Ейнштейн відмовився від пацифізму й, побоюючись, що німецькі науковці створять ядерну бомбу, заявив, що Сполучені Штати мають розробити власну. Але ще до першого атомного вибуху він публічно попереджав про небезпеку ядерної війни й пропонував встановити міжнародний контроль над ядерним озброєнням.

Боротьба за мир, яку Ейнштейн вів усе своє життя, імовірно, мало чим прислужилася науковцеві і, звичайно, не сприяла розширенню кола його друзів. Ейнштейнова публічна підтримка справи сіонізму була, однак, належним чином оцінена 1952 року, коли науковцеві запропонували стати президентом Ізраїлю. Ейнштейн відмовився, пославшись на те, що недосвідчений у політиці. Але, можливо, реальна причина полягала в іншому, і тут ми знову пошлемося на його слова: «Рівняння для мене важливіші, адже політика для сьогодення, а рівняння для вічності».

ГАЛІЛЕО ГАЛІЛЕЙ

Галілей, можливо, більше, ніж будь-хто, відповідальний за народження сучасної науки. Відомий конфлікт із римо-католицькою церквою має ключове значення для його філософії, адже Галілей одним із перших заходився доводити, що людина здатна пізнати, як влаштований світ, і, крім того, зробити це шляхом спостереження за реальними явищами.

Учений від самого початку вірив у теорію Коперника, за якою планети обертаються навколо Сонця, але почав публічно висловлюватися на її підтримку тільки тоді, коли знайшов необхідні докази. Галілей написав про теорію Коперника італійською (а не звичною для тодішніх науковців латиною), і невдовзі його погляди здобули широку підтримку за межами університетських стін. Це роздратовало прихильників Аристотеля, які об'єдналися проти Галілея, прагнучи домогтися від католицької церкви заборони на вчення Коперника.

Учений, стурбований цим, вирушив до Рима, щоб поговорити з духовними авторитетами. Він доводив, що Святе

Письмо створене не для того, щоб служити джерелом наукових теорій, і ті фрагменти, де воно суперечить здоровому глузду, — це звичайнісінькі алегорії. Але католицька церква, побоюючись скандалу, який міг би завадити її боротьбі з протестантством, вдалася до репресивних заходів. 1616 року вона оголосила вчення Коперника «помилковим» і зажадала, щоб Галілей ніколи більше «не захищав і не дотримувався» цієї доктрини. З важким серцем Галілей погодився.

1623 року давній друг ученого став Папою Римським. Галілей відразу спробував домогтися скасування постанови 1616 року. Він ухопив шилом патоки, проте примудрився дістати дозвіл на написання книжки про системи Аристотеля й Коперника за двох умов: не ставати ні на чий бік і дійти висновку, що людина не може вирішувати, як влаштований світ, адже Бог здатен домогтися тих самих результатів, удаючись до способів, недоступних розумінню людини, якій не до снаги обмежити всемогутність Бога.

Книжка *«Діалог про дві найголовніші системи світу — Птолемеєву і Коперникову»* була закінчена й видана 1632 року за цілковитої підтримки цензорів і миттю здобула визнання у всій Європі як літературний і філософський шедевр. Невдовзі Папа Римський, усвідомивши, що книжку сприйняли як переконливий аргумент на користь вчення Коперника, пошкодував, що дав дозвіл на її публікацію. Папа стверджував, що, хоча книжка вийшла з офіційного благословення цензорів, однак Галілей порушив постанову 1616 року. Учений постав перед судом інквізиції, який покарав його довічним домашнім арештом і наказав публічно зректися вчення Коперника. І знову Галілей знехотя погодився.

Галілей залишався відданим католиком, але його віра в незалежність науки не була підірвана. За чотири роки

до смерті, 1642 року, коли вчений досі перебував під домашнім арештом, голландському видавцеві був таємно переправлений рукопис його другої головної книжки. Саме ця праця — «*Бесіди і математичні докази двох нових наук*» — навіть сильніше, ніж підтримка моделі Коперника, дала поштовх народженню сучасної фізики.

ІСААК НЬЮТОН

Ісаак Ньютон мав круту вдачу. Його кепські стосунки з іншими вченими були сумнозвісні, а останні роки життя науковець провів у палких суперечках. Після публікації «*Principia Mathematica*» («*Математичних начал*») — поза сумнівом, найважливішої з будь-коли написаних фізичних праць — Ньютон швидко зажив великої популярності. Його було призначено президентом Королівського товариства й першим з учених посвячено в лицарі.

Невдовзі Ньютон посварився з королівським астрономом, директором Грінвіцької обсерваторії Джоном Флемстідом, який доти надавав ученому дані, украй важливі для його «Начал», а нині ігнорував його потребу в інформації. Ньютон не міг змиритися з відмовою: він домогся свого призначення в розпорядчу раду Королівської грінвіцької обсерваторії, а відтак спробував наполягти на негайній публікації даних. Урешті-решт учений доклав рук до викрадення праці Флемстіда й допоміг підготувати її до друку смертельному ворогові останнього — Едмундові Галлею. Однак Флемстід подав позов до суду й в останній момент той наклав заборону на поширення вкраденої праці. Розгніваний Ньютон помстився тим, що систематично видаляв усі посилання на Флемстіда з наступних видань «Начал».

Куди серйозніший конфлікт стався в Ньютона з німецьким філософом Готфрідом Лейбніцом. Лейбніц і Ньютон незалежно один від одного створили нову галузь математики, названу аналізом, на якій значною мірою ґрунтується сучасна фізика. Хоча, як ми тепер знаємо, Ньютон відкрив математичний аналіз на кілька років раніше за Лейбніца, результати своєї праці він оприлюднив значно пізніше. Учені заходилися ламати списи, намагаючись з'ясувати, кому ж належить пріоритет відкриття. Прикметно, що більшість статей на свій захист Ньютон написав власноруч, хоча попідписувані публікації іменами його друзів! Оскільки конфлікт не вщухав, а тільки набирал обертів, Лейбніц звернувся до Королівського товариства з проханням розв'язати суперечку... і поплатився за свою необережність. Будучи президентом товариства, Ньютон призначив «неупереджену» комісію для розслідування, яка «випадково» складалася винятково з його друзів! Але це ще не все: Ньютон сам написав висновок комісії й наполог, щоб Королівське товариство його опублікувало, офіційно звинувативши Лейбніца в плагіаті. Усе ще не задоволений, учений надрукував анонімний огляд висновку комісії в періодичному виданні Королівського товариства. Кажуть, після смерті Лейбніца Ньютон заявив, буцімто чувається на сьомому небі, «розбивши Лейбніцу серце».

У той час, коли точилися ці дві суперечки, Ньютон уже покинув Кембридж та академічну спільноту. У Кембриджі, а потім у парламенті він активно провадив антикатолицьку політику, і на подяку за це його призначили на тепле місце доглядача Монетного двору. Тут Ньютон навчився куди корисніше для суспільства застосовувати свої спритність і злобу, з успіхом узявшись за боротьбу з фальшивомонетниками й навіть відправивши кількох на шибеницю.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

Абсолютний нуль — найнижча можлива температура, за якої речовина не має теплової енергії.

Античастинка — кожному типові частинок відповідають свої античастинки. Коли частинка стикається з античастинкою, вони руйнуються, залишаючи тільки енергію.

Антропний принцип — принцип, згідно з яким ми бачимо Всесвіт таким, а не іншим, адже якби він був іншим, нас би тут не було й ми не могли б його спостерігати.

Атом — основна одиниця звичайної речовини, яка складається з крихітного ядра, сформованого з протонів і нейтронів та оточеного електронами, що обертаються навколо нього.

Вага — сила, породжувана дією на тіло гравітаційного поля. Вага пропорційна масі, проте не тотожна їй.

Велике стискання — сингулярність наприкінці еволюції Всесвіту.

Великий Вибух — сингулярність на початку еволюції Всесвіту.

Відсутність граничних умов — уявлення про те, що Всесвіт кінцевий, але не має меж.

Віртуальна частинка — у квантовій механіці частинка, яку неможливо виявити безпосередньо й існування якої, утім, зумовлює вимірювані ефекти.

Гамма-випромінювання — електромагнітне випромінювання з дуже короткою довжиною хвилі, що породжується радіоактивним розпадом і зіткненнями елементарних частинок.

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

Горизонт подій — межа чорної діри.

Довжина хвилі — відстань між двома сусідніми западинами або двома сусідніми гребенями хвилі.

Дуальність — відповідність між різними на перший погляд теоріями, яка веде до ідентичних фізичних результатів.

Електричний заряд — властивість частинки, завдяки якій вона може відштовхувати (або притягувати) інші частинки, що мають заряд того самого (або протилежного) знака.

Електромагнітна взаємодія — взаємодія, що виникає між частинками, які мають електричний заряд; друга за силою з чотирьох фундаментальних взаємодій.

Електрон — частинка з негативним електричним зарядом, яка обертається навколо ядра атома.

Елементарна частинка — частинка, яку вважають неподільною.

Енергія електрослабкого об'єднання — енергія (близько 100 гігаелектронвольтів), вище від якої зникає відмінність між електромагнітною й слабкою взаємодіями.

Загальна теорія відносності — теорія А. Ейнштейна, заснована на ідеї, що закони фізики мають бути однаковими для всіх спостерігачів незалежно від того, як вони рухаються. Дає пояснення гравітаційній взаємодії в термінах викривлення чотиривимірного простору-часу.

Квантова механіка — теорія, розвинена на основі квантового принципу Планка й принципу невизначеності Гейзенберга.

Квантовий принцип Планка — уявлення про те, що світло (або будь-які інші класичні хвилі) може випромінюватися й поглинатися тільки дискретними порціями (квантами), енергія яких пропорційна довжині хвилі.

Кварк — заряджена елементарна частинка, яка бере участь у сильній взаємодії. Протони й нейтрони складаються з трьох кварків.

Координати — числа, які задають положення точки в просторі й часі.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм — у квантовій механіці концепція, згідно з якою між хвилями й частинками немає різниці; частинки можуть іноді поводитися, як хвилі, а хвилі — як частинки.

Космологічна стала — математичний метод, який використав А. Ейнштейн, щоб наділити простір-час схильністю до розширення.

Космологія — наука, що вивчає Всесвіт як ціле.

Кротовина — тонка трубка простору-часу, що з'єднує віддалені регіони Всесвіту. Кротовини можуть також з'єднувати паралельні або новоявлені всесвіти й забезпечувати можливість мандрівок у часі.

Магнітне поле — поле, відповідальне за магнітні сили. Нині його розглядають спільно з електричним полем як прояв єдиного електромагнітного поля.

Маса — кількість матерії в тілі; його інерція, або опір прискоренню.

Мікрохвильове фонове випромінювання — випромінювання, що залишилося від гарячого раннього Всесвіту й зазнавало дотепер

такого сильного червоного зміщення, що зі світла воно перетворилося на мікрохвиль (радіохвиль з довжиною хвилі кілька сантиметрів).

Міст Ейнштейна — Розена — тонка трубка простору-часу, що з'єднує дві чорні діри. Див. також **Кротовина**.

Нейтрино — надзвичайно легка (можливо, безмасова) частинка, яка схильна до дії тільки слабких сил і гравітації.

Нейтрон — незаряджена частинка, дуже схожа на протон. Нейтрони становлять близько половини частинок атомного ядра.

Нейтронна зоря — холодна зоря, яка утримується в рівновазі завдяки принципу заборони Паулі, що зумовлює відштовхування між нейтронами.

Подія — точка в просторі-часі, яка характеризується часом і місцем.

Позитрон — позитивно заряджена античастинка електрона.

Поле — сутність, розподілена в просторі й часі на противагу частинці, яка існує тільки в одній точці в кожен момент часу.

Принцип виключення (принцип заборони Паулі) — уявлення, згідно з яким дві ідентичні частинки не можуть мати одночасно (у межах, встановлених принципом невизначеності) однакового положення й швидкості.

Принцип невизначеності Гайзенберга — принцип, який стверджує, що не можна одночасно точно визначити і положення, і швидкість частинки; чим точніше ми знаємо одне, тим менш точно — інше.

Прискорення — темп зміни швидкості об'єкта.

Прискорювач елементарних частинок — установка, здатна прискорювати рухомі заряджені частинки, передаючи їм енергію за допомогою електромагнітів.

Пропорційність — вислів «величина X пропорційна Y » означає, що коли Y множиться на довільне число, те саме відбувається з X ; вислів «величина X обернено пропорційна Y » означає, що, коли Y множиться на довільне число, X ділиться на це число.

Простір-час — чотиривимірний простір, точки якого є подіями.

Просторовий вимір — будь-який із відомих нам вимірів, окрім часу.

Протон — позитивно заряджена частинка, дуже схожа на нейтрон. У більшості атомів протони становлять близько половини від усіх частинок у ядрі.

Радар — система, яка використовує імпульси радіохвиль для визначення положення об'єктів шляхом вимірювання часу, потрібного імпульсу на те, щоб досягти об'єкта і, відбившись, повернутися назад.

Радіоактивність — спонтанний розпад атомного ядра, що перетворює його на ядро іншого типу.

Світлова секунда (світловий рік) — відстань, яку проходить світло за секунду (рік).

Сильна взаємодія — найсильніша з чотирьох фундаментальних взаємодій із найкоротшим радіусом дії. Сильна взаємодія утримує кварки всередині протонів і нейтронів, а також утримує разом протони й нейтрони, завдяки чому утворюються атоми.

Сингулярність — точка в просторі-часі, де його (або якоїсь іншої фізичної величини) викривлення досягає нескінченного значення.

Слабка взаємодія — друга за слабкістю з чотирьох фундаментальних сил із дуже коротким радіусом дії. Впливає на всі частинки речовини, але не зачіпає частинки-переносники взаємодій.

Спектр — сукупність частот, які утворюють хвилі. Видиму частину сонячного спектра можна бачити у веселці.

Спеціальна теорія відносності — теорія А. Ейнштейна, заснована на ідеї, що закони фізики мають бути однакові для всіх спостерігачів незалежно від того, як вони рухаються, за відсутності гравітаційних явищ.

Темна матерія — матерія в галактиках, їхніх скупченнях і, можливо, між скупченнями, яку не можна спостерігати безпосередньо, але можливо виявити за її гравітаційним тяжінням. На темну матерію може припадати до 90 % маси Всесвіту.

Теорія великого об'єднання — теорія, яка об'єднує електромагнітну, сильну й слабку взаємодії.

Теорія струн — фізична теорія, у якій частинки описані як хвилі на струнах. Струни мають довжину, але в них відсутні інші виміри.

Фаза (хвилі) — положення в циклі хвильового процесу у фіксований момент часу; міра того, чи припадає відлік на гребінь хвилі, на западину або на якийсь проміжний стан.

Фотон — квант світла.

Частота (хвилі) — число повних циклів коливання за секунду.

Червоне зміщення — зумовлене ефектом Доплера почервоніння світла зорі, яка від нас віддаляється.

Чорна діра — регіон простору-часу, який ніщо, навіть світло, не може покинути через надто сильну гравітацію.

Ядерний синтез — процес, у якому два ядра стикаються й зливаються, утворюючи важче ядро.

Ядро — центральна частина атома, яка складається тільки з протонів і нейтронів, утримуваних разом сильною взаємодією.

ЗМІСТ

1. Розмірковуючи про Всесвіт.....	5
2. Розвиток картини світу	8
3. Суть наукових теорій	14
4. Усесвіт Ньютона.....	20
5. Відносність.....	27
6. Викривлення простору	38
7. Розширення Всесвіту.....	50
8. Великий Вибух, чорні діри й еволюція Всесвіту.....	69
9. Квантова гравітація	88
10. Кротовини й мандрівки в часі.....	108
11. Сили природи й об'єднання фізики.....	122
12. Висновок	145
<i>Альберт Ейнштейн.....</i>	<i>150</i>
<i>Галілео Галілей.....</i>	<i>152</i>
<i>Ісаак Ньютон.....</i>	<i>154</i>
<i>Словник термінів</i>	<i>156</i>

НАЙКОРОТША ІСТОРІЯ ЧАСУ

Великий мислитель і теоретик сучасності, він народився в трьохсоту річницю з дня смерті Галілея. Його називають сучасним Енштейном за наукові праці з космології та теоретичної фізики. Людина, чиє тіло ув'язнене в полоні тяжкої хвороби та чий розум проникає до найвіддаленіших куточків Усесвіту в пошуках відгадок таємниць чорних дір і паралельних часових вимірів... Це Стівен Гокінг. Професор Кембриджського університету й геніальний учений, він, як ніхто інший, багато зробив для популяризації сучасної науки, закликаючи всіх бути допитливими.

«Найкоротша історія часу» уперше побачила світ 1988 року й чотири роки була в списку бестселерів лондонської «The Sunday Times». За наступні 20 років книжка була видана 10 мільйонами примірників, перекладена 35 мовами, переписана в дусі нових відкриттів — і здобуває собі все нових і нових захоплених читачів.

Людство зібрало силу-силенну знань про космос, за допомогою надшвидких комп'ютерів та надпотужних телескопів побачило народження та смерть далеких зірок. Але коли народився сам Усесвіт? Яка природа часу та чи існував він до Великого вибуху? Чи можливий його зворотний біг і чи такі вже фантастичні мрії про подорожі в часі?

Пояснити суть найскладніших наукових теорій зрозумілою мовою за допомогою єдиної формули — задача, підвладна лише Гокінгу. Та головне питання він лишає відкритим...

www.bookclub.ua

ISBN 978-617-12-1054-7

