

Найкоротша історія часу
Леонард Млодинов

Стивен Уильям Хокинг

Великий мислитель і теоретик сучасності, він народився в трьохсоту річницю з дня смерті Галілея. Його називають сучасним Ейнштейном за наукові праці з космології та теоретичної фізики. Людина, чие 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 Стивен 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...

Стивен Хокинг, Леонард Млодинов

Найкоротша історія часу

© Stephen Hawking, Leonard Mlodinow, 2005

© Hemiro Ltd, видання українською мовою, 2016

© Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля», переклад і художнє оформлення, 2016

* * *

1. 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 різко 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 черепак. Тільки час (яким би він не був) це покаже.

2. 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. Десь 340 року до нашої ери давньогрецький філософ Аристотель написав твір «Про небо», у якому навів 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 назвали 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 еретика, учений поширював свою теорію анонімно.) Револьюційна 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, сплило 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 збігалось 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 відповідає 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 – «Математичні першопричини натуральної філософії» (лат.)]. (Тут і далі прим. пер.), певно найважливішу з будь-коли виданих праць у царині фізики. У «Principia» учений 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 відповідає 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 найдалішою 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.

3. 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 Всесвіту 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 нізачо 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 пов'дають 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 усемогутністю, 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 абсолютного 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 Всесвіт у термінах двох основних часткових теорій – загальної теорії відносності та квантової механіки. Це найбільші досягнення розуму першої половини XX 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 Всесвітом. 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.

4. 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 умовляю, 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'інку, 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'інку 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 проводитимете 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 поводитьсь 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, припустимо, 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.

5. 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 величину 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).

Довжина хвилі

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 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?

Різні швидкості м'ячика для пінг-понгу

Щоб узгодити теорію Максвелла із законами Ньютона, пристали на гіпотезу, буцімто всюди, навіть у вакуумі, 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 рухаєтеся 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 Клівленді[2 - Одна з найстаріших інженерних шкіл, заснована 1877 року.]. 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 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 впливали 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.

Координати в просторі

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-серкус [3 – Площа й транспортна розв'язка в центральному Лондоні, створені 1819 року.], а також стільки-то 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.

6. Викривлення простору

Загальна теорія відносності Ейнштейна ґрунтується на революційному припущенні, що гравітація – це не звичайна сила, а наслідок того, що простір-час має не плоску 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 (сплюснена), 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 обернутися 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.

Викривлення променів світла поблизу Сонця

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

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию (https://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=26104623&lfm=362673004) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.

notes

Примечания

1

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

2

Одна з найстаріших інженерних шкіл, заснована 1877 року.

3

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

