

Сім основних уроків з фізики
Карло Ровеллі

Ці уроки створені для тих, хто знає мало або зовсім нічого не знає про сучасну науку. У них подано експрес-огляд найцікавіших аспектів великої революції, що відбулась у фізиці в XX столітті, а також запитань і таємниць, які ця революція відкрила людству. Адже наука показує не тільки шляхи до кращого розуміння світу, а й величезний обсяг невідомого...

Карло Ровеллі

Сім основних уроків з фізики

© Carlo Rovelli, 2015

© Hemiro Ltd, видання українською мовою, 2016

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

First published in Italian under the title *Sette brevi lezioni di fisica* by Carlo Rovelli, 2015

Передмова

Ці уроки створені для тих, хто знає мало або зовсім нічого не знає про сучасну науку. У них подано експрес-огляд найцікавіших аспектів великої революції, що відбулась у фізиці в XX столітті, а також запитань і таємниць, які ця революція відкрила людству. Адже наука показує не тільки шляхи до кращого розуміння світу, а й величезний обсяг невідомого.

Перший урок присвячений загальній теорії відносності Альберта Ейнштейна, «найпрекраснішій з теорій». Другий – квантовій механіці, в якій розглядаються найбільш таємничі аспекти сучасної фізики – що й досі лишаються нерозкритими. Третій урок присвячено космосу: архітектурі Всесвіту, який ми населяємо; четвертий – елементарним частинкам. На п'ятому уроці ми розглянемо квантову гравітацію. У шостому уроці йдеться

про ймовірність існування чорних дір і про їх випромінювання. У заключному розділі книжки ми поміркуємо, чи можливо зрозуміти наше існування, описавши світ з точки зору фізики.

Ці уроки – серія статей, опублікованих автором у недільному додатку до італійської газети «Sole 24 ore» («Сонце. Протягом 24 годин»). Я хотів би подякувати, зокрема, Армандо Массаренті за відкриття в ній спеціалізованих сторінок, присвячених науці. Це дає змогу висвітлювати багато життєво важливих питань.

1. Найпрекрасніша з Теорій

В юності Альберт Ейнштейн майже цілий рік вештався без певної мети. Ви не дістанетесь нікуди, не гаючи часу, – дрібничка, про яку зазвичай забувають батьки підлітків. Альберт відмовився від освіти в Німеччині, бо не витримав строгих правил закладу, де навчався, і жив у Павії із сім'єю. Це був початок XX століття, який в Італії збігся з початком промислової революції. Альбертів батько, інженер, працював на будівництві електростанції, першої на Падуанській рівнині. Альберт читав Канта, а іноді, як вільний слухач, відвідував лекції в університеті Павії: для задоволення, без реєстрації та необхідності непокоїтися про іспити – от так і формувався майбутній визначний вчений!

Згодом Альберт Ейнштейн вступив до Цюрихського університету і поринув у вивчення фізики. У 1905 році він відправив три статті до найпрестижнішого наукового журналу того часу, «Annalen der Physik». Кожна з них була гідна Нобелівської премії. У першій Ейнштейн доводив, що атоми справді існують. У другій – закладав першооснови квантової механіки. У третій – виклав свою першу теорію відносності (відому в наш час як «спеціальна теорія відносності»), пояснивши, яким чином для різних людей час плине не однаково: двоє близнюків різняться за віком, якщо один з них подорожував на великій швидкості.

Ейнштейн прокинувся знаменитим і одразу ж отримав від різних університетів пропозиції щодо працевлаштування. Але Альберта щось турбувало: попри негайне визнання теорія відносності не відповідала знанням про гравітацію, а саме уявленням про те, яким чином речі падають. Ейнштейн усвідомив це, пишучи статтю, в якій мав узагальнити свою теорію; він зацікавився питанням, як сумістити з новою концепцією відносності закон всесвітнього тяжіння, сформульований батьком фізики, Ісааком Ньютоном. Ейнштейн з головою поринув у проблему, але для її вирішення знадобилося десять років – десятиліття шалених досліджень, спроб, плутанини, помилкових статей, геніальних і хибних ідей.

Нарешті, у листопаді 1915 року, Ейнштейн підготував до друку статтю, що являла собою повне розв'язання задачі: нову теорію гравітації, яку він назвав «загальна теорія

відносності». Як сказав великий російський фізик Лев Ландау, це найпрекрасніша з теорій.

Існують шедеври, які зворушують надзвичайно сильно: «Реквієм» Моцарта, «Одіссея» Гомера, «Король Лір» Шекспіра, Сікстинська капела... Щоб повною мірою оцінити їх, може знадобитися тривале навчання, зате винагородою є відчуття чистої краси – і не тільки це. Нам відкриваються очі, виникає новий погляд на світ. Діамант Ейнштейнового доробку, загальна теорія відносності, – шедевр того самого рівня.

Я пам'ятаю хвилювання, яке відчув, коли почав щось у цьому розуміти. Це було влітку. Я відпочивав на пляжі в Кондофурі в Калабрії, огорнений сонячним сяйвом еллінського Середземномор'я. Це був останній рік навчання в Болонському університеті. Зосереджена на навчанні людина найкраще вчиться під час канікул. Особисто я осягав науку з книжкових сторінок, обгризених мишами, адже вночі використовував книжки для блокування цих бідолашних створінь у їхніх нірках у доволі пошарпаному хіпуватому будиночку на схилі умбрійського пагорба, де я зазвичай ховався від нудьги університетських занять. Щоразу, а бувало це доволі часто, як я піднімав очі від книжки і милувався морськими хвилями в сонячних блискітках, мені здавалося, що я насправді бачу викривлення простору і часу так, як їх уявляв Ейнштейн. Як за помахом чарівної палички: так ніби друг шепоче тобі на вухо якусь надзвичайну, глибоко приховану таємницю, раптово піднімаючи завісу реальності, щоб розкрити простіший, глибинний порядок світобудови. Відтоді як люди виявили, що Земля кругла і крутиться як навіжена дзига, вони зрозуміли, що реальність не така, як її бачать: щоразу ми розкриваємо якийсь новий її аспект, це глибоко емоційне переживання. Так впала ще одна завіса.

Але впродовж людської історії стрибків уперед, які один за одним здійснювались на шляху до розуміння світу, ейнштейнівський не має собі рівних. Чому?

Насамперед, тому що як тільки ви зрозумієте, як працює його теорія, ви побачите, яка вона захопливо проста.

Підсумую.

Ньютон доклав зусиль, щоб пояснити, чому річ падають, а планети обертаються. Він уявив існування сили, що притягує матеріальні тіла одне до одного, і назвав її силою гравітації. Але як ці сили діють між тілами віддаленими, між якими, здавалося б, нічого не відбувається, було невідомо – і великий батько сучасної науки остерігався висувати гіпотези. Ньютон уявляв, що тіла рухаються крізь простір і що простір – це гігантський порожній контейнер, велетенська коробка, що містить у собі Всесвіт, дивовижна структура, крізь яку всі об'єкти рухаються правильно, аж поки сила не змушує їхню траєкторію викривитись. З чого зроблений цей простір, цей контейнер зі світом, який він винайшов, Ньютон не міг пояснити.

За кілька років до народження Ейнштейна двоє великих британських фізиків, Майкл

Фарадей і Джеймс Максвелл, додали до холодного ньютонівського світу ключовий інгредієнт – електромагнітне поле. Це поле – об'єктивна реальність, що проникає скрізь, переносить радіохвилі, наповнює простір, вібрує і коливається, як поверхня озера, а також транспортує електричну силу. З юності Ейнштейн був просто в захваті від електромагнітного поля, здатного обертати ротори електростанції, збудованої його батьком, і скоро зрозумів, що гравітація, як і електрика, має переноситися за допомогою поля: гравітаційне поле має існувати як аналог електричного поля. Ейнштейн прагнув зрозуміти, як це гравітаційне поле працює і як його описати за допомогою рівнянь.

І саме в цей момент у нього раптово виникла надзвичайна ідея, доторк чистого генія: гравітаційне поле не пронизує простір; гравітаційне поле – це, власне, і є сам простір. Це ідея теорії загальної відносності. Ньютонівський простір, крізь який рухаються предмети, і гравітаційне поле – те саме.

Це був момент осяяння. Відбулося миттєве спрощення уявлення про світобудову: простір більше не є чимось відділеним від матерії, він один із матеріальних компонентів світу, об'єктивна реальність, що хвилеподібно рухається, гнеться, викривлюється, скручується. Ми не вміщені всередину невидимої сталої інфраструктури, ми наче закручені в гнучкій мушлі гігантського равлика. Сонце вигинає простір навколо себе, і Земля не рухається навколо нього не завдяки якійсь таємничій силі, а тому, що вона скочується – через нахил простору, подібно до мармурової кульки, яка котиться ринвою. Жодні таємничі сили не генеруються в центрі ринви, це просто вигнута форма її стінок змушує кульку скочуватись. Планети рухаються навколо сонця, і предмети падають, бо простір викривлюється.

Як можна описати це викривлення простору? Найвідоміший математик XIX століття, Карл Фрідріх Гаусс, названий князем математиків, записав математичні формули, щоб описати двовірні криволінійні поверхні пагорбів. Потім він попросив свого обдарованого студента узагальнити теорію, щоб розмістити простори в трьох і більше вимірах. Студент, а ним виявився Бернгард Ріман, створив таку приголомшливу докторську дисертацію, що вона здавалась абсолютно непридатною: властивості викривленого простору втілюються в окремий математичний об'єкт, який позначається літерою R і який ми знаємо як Ріманову кривизну. Ейнштейн написав рівняння, де R еквівалентне енергії матерії. Таким чином стверджується: викривлення простору є там, де є матерія. Ось так! Рівняння займає лише піврядка. Образ простору, що викривлюється, стає рівнянням.

Але всередині рівняння народжується Всесвіт. Теорія з чарівною щедрістю народжує фантазмагоричну послідовність передбачень, які схожі на безтямну маячню божевільного і які, тим не менш, підтверджуються. Почнімо хоча б з того, як простір вигинається навколо зірки, завдяки цьому не тільки виникають орбіти планет, а й світло перестає рухатись по прямій лінії і відхиляється. Ейнштейн висунув теорію, що Сонце – причина відхилення світла. У 1919 році це відхилення було виміряне, і теорія підтвердилася. Ейнштейн висунув ідею, що поблизу Сонця час біжить швидше, ніж поблизу Землі (тобто сповільнення часу більше там, де гравітація сильніша). Згодом це підтвердилося. Якщо

людина, яка прожила певний час на рівні моря, зустрінеться зі своїм близнюком, який жив високо в горах, то виявить, що двійник дещо старший.

І це тільки початок.

Коли велика зірка спалює все своє пальне (водень), вона згасає. Тиску від жару залишків уже не досить, щоб протистояти власній вазі, і зірка колапсує, вигинаючи простір до такої міри, що утворюється справжня діра. Це і є знамениті чорні діри. Коли я вчився в університеті, їх вважали ледь вартими довіри передбаченнями таємничої теорії. Сьогодні астрономи спостерігають за сотнями чорних дір і детально їх вивчають.

Але і це ще не все. Ейнштейнове рівняння показує, що простір не може бути сталим, він мусить розширюватись. У 1930 році розширення простору справді було виявлено. Те саме рівняння передбачає, що розширення мало початися з вибуху юного, надзвичайно малого й екстремально гарячого всесвіту: з того, що ми тепер знаємо як Великий Вибух.

Спершу ніхто цьому не вірив. Але проводили все більше спостережень, факти накопичувалися, аж поки не було доведено існування фонового випромінювання – розсіяних відблисків, що залишилися від тепла, спричиненого початковим розширенням Всесвіту. Пророцтво, що постало з рівняння Ейнштейна, справдилося. І більше того, теорія стверджує, що космос рухається подібно до поверхні моря. Ефект подібних гравітаційних хвиль спостерігається в небі (приклад: подвійні зірки) і, згідно з прогнозами теорії, з приголомшливою точністю: один до ста мільярдів. І так далі.

Коротше кажучи, теорія описує барвистий і захопливий світ, де всесвіти вибухають, простір колапсує, утворюючи бездонні діри, час сповільнюється поблизу планети, безмежний обшир міжзоряного простору пульсує і розгойдується, як поверхня моря. І все це, що поступово з'ясовується з моєї обгризеної мишами книжки, не є оповіддю ідіота у нападі безумства чи галюцинацією, спричиненою гарячим середземноморським сонцем Калабрії та сліпучо осяйним морем. Це реальність. Точніше – натяк, проблеск реальності, трохи менш завуальованої, ніж наше розпливчате і банальне щоденне її бачення. Реальність, що, здавалося б, виготовлена з тієї самої субстанції, з якої зроблені наші мрії, але більш життєздатна, ніж наше захмарене щоденне мріяння.

Усе це результат елементарної інтуїції: простір і гравітаційне поле – те саме. Не можу не навести тут формулу, якщо навіть ви не будете в змозі її розшифрувати. Але, можливо, хтось оцінить її дивовижну простоту.

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$$

Ось вона. Вам, звичайно, доведеться пройти курс навчання і засвоїти Ріманову математику, щоб досягнути техніку читання і використання цього рівняння. Це потребуватиме трохи терпіння і зусиль. Але менше, ніж потрібно, наприклад, щоб поцінувати рідкісної краси струнний квартет пізнього Бетховена. В обох випадках нагородою буде чиста краса – і нові очі, щоб по-новому побачити світ.

2. Квант

Два стовпи, на яких стоїть фізика XX століття, – загальна теорія відносності, про яку йшлося у попередньому уроці, і квантова механіка, з якою матимемо справу тут. Немає теорій, які відрізняються одна від одної більше, ніж ці. Обидві теорії вчать нас, що тонка структура природи – ще менш вловима, ніж може здаватися. Але загальна теорія відносності – це, так би мовити, компактна коштовність, створена силою єдиного розуму, а саме Альбертом Ейнштейном, це просте і послідовне бачення гравітації, простору і часу. Квантова механіка, або квантова теорія, отримала незрівнянні експериментальні результати, і її застосування кардинально змінило наше повсякденне життя (комп'ютер, на якому я набираю текст, – цьому приклад), але навіть через століття після народження вона залишається незрозумілою і таємничою.

Квантова механіка виникла у 1900 році і проголосила століття напружених інтелектуальних зусиль. Німецький фізик Макс Планк обчислив електричне поле, врівноважене в нагрітій ємності. Щоб зробити це, він вдався до трюку: уявив, що енергія поля поширюється в «квантах», що означає «в пакунках» чи «грудочках» енергії. Результат абсолютно відповідав меті обчислення (і тому в цій моделі мусить бути правильним), але суперечив усьому, що було відомо на той час. Вважалося, що енергія – це величина, яка змінюється неперервно, і не було причин розглядати її як таку, що складається з маленьких дискретних порцій. Для самого Планка розбиття енергії на порції було просто дотепним способом обчислень, і він сам цілком не розумів причин результативності цього методу. І саме Ейнштейн п'ять років по тому дійшов висновку, що ці порції енергії реальні.

Ейнштейн показав, що світло складається з частинок. Сьогодні ми називаємо їх фотонами. У вступі до своєї статті він писав: «Мені здається, що дослідження, пов'язані з випромінюванням абсолютно чорного тіла, флуоресценцією, утворенням катодних променів під дією ультрафіолетового світла, та з іншими, спорідненими з цим феноменами, що стосуються емісії або трансформації світла, були б успішнішими, якби дослідник припускав, що світлова енергія переривчасто розподіляється в просторі. Згідно з припущенням, що розглядається, енергія світлового променя, що поширюється від точечного джерела, не розподілена неперервно в просторі, а складається зі скінченної

кількості енергетичних квантів, що локалізовані в певних точках простору і рухаються не подрібнюючись та можуть утворюватися або поглинатися лише цілком окремими одиницями».

Ці прості і ясні рядки є справжнім свідоцтвом про народження квантової теорії. Зверніть увагу на дивовижний початок: «мені здається...», що нагадує «я думаю...», яким Дарвін у своєму записнику починав формулювання великої ідеї еволюції видів, і «сумніви», висловлені Фарадеєм, коли він ознайомлював світ з революційною ідеєю магнітних полів. Геній сумнівається.

Робота Ейнштейна від початку сприймалася колегами як абсурд. Згодом ця сама робота буде нагороджена Нобелівською премією. Якщо Планк є батьком квантової теорії, то Ейнштейн – той, хто її виплекав.

Але, як усі нащадки, теорія з часом пішла своєю дорогою, незнаною самим Ейнштейном. У 1920-1930-х роках її почав розвивати данець Нільс Бор. Саме він зрозумів, що енергія електронів в атомах може набувати лише певних значень, подібно до енергії світла, і ключовим є те, що електрони можуть тільки перестрибувати з однієї атомної орбіти на іншу з певними енергіями, під час стрибка випромінюючи або поглинаючи фотон. Це і є знамениті «квантові стрибки».

Саме в Копенгагенському інституті найбільш блискучі молоді вчені століття зібрались для спільних досліджень, намагаючись навести лад у незбагнених аспектах поведінки атома та збудувати на цій основі послідовну теорію. У 1925 році нарешті з'явилося рівняння нової теорії, яке замінило загальну механіку Ньютона. Важко уявити значніше досягнення. Один доторк – і все набуває сенсу, стає можливим обчислити що завгодно.

Наведемо один приклад. Чи ви пам'ятаєте періодичну таблицю елементів Менделєєва, який записав усі можливі елементи, з яких складається Всесвіт, від водню до урану? Ця таблиця висить на стіні майже в кожному класі. Чому ж у ній записані саме ці елементи та чому вона має саме таку структуру, з саме такими періодами і з елементами, що мають саме такі специфічні властивості? Тому що кожен елемент відповідає одному рішенням основного рівняння квантової механіки. Ціла наука – хімія – ґрунтується на одному рівнянні.

Першим написав рівняння нової теорії, базуючи їх на шалених запаморочливих ідеях, геніальний молодий німець, Вернер Гейзенберг. Він уявляв, що електрони не завжди існують. Вони є лише тоді, коли хтось або щось спостерігає за ними, чи, краще сказати, – коли електрони взаємодіють із чимось іншим. Вони матеріалізуються в конкретному місці з обчислюваною ймовірністю, коли зіштовхуються з чимось іншим. Квантові стрибки з однієї орбіти до іншої – це єдиний засіб, який вони мають, щоб бути реальними: електрон, таким чином, – це набір стрибків від однієї взаємодії до іншої. Коли ніщо його не турбує, він не має точного місця. Він взагалі не перебуває на жодному місці. Це так, якби Бог створював

світ не за допомогою ліній, що їх непросто стерти, а наніс його пунктиром у вигляді нечіткої схеми.

У квантовій механіці об'єкт не має визначеного розташування, допоки не зіштовхнеться з чимось іншим. Щоб описати такі об'єкти між взаємодіями, ми використовуємо абстрактні математичні формули, що мають сенс не в реальному просторі, а лише в абстрактному математичному світі. Але гірше попереду: ці стрибкоподібні взаємодії, що переміщують об'єкт з одного місця в інше, трапляються не якимось передбачуваним чином, а є переважно випадковими. Неможливо передбачити, де електрон знову з'явиться, можна тільки вирахувати ймовірність, що він вигулькне тут чи там. Питання ймовірності постає в самому серці фізики, де, здавалося б, усе підкорюється чітким, непохитним та незмінним універсальним законам.

Чи не здається це абсурдом? Це здалось абсурдним Ейнштейну... З одного боку, він висуває Гейзенберга на Нобелівську премію, визнаючи, що він зрозумів про світ щось фундаментальне, з іншого – ніколи не упускає шансу побурчати, що все це не має особливого сенсу. Молоді леви з Копенгагенської групи були в сум'ятті: як можливо, щоб Ейнштейн думав так? Їхній духовний батько, який мав мужність думати про, здавалося б, неосяжне для людського розуму, відступає і боїться стрибка в невідомість, до якого сам спонукав. Той самий Ейнштейн, котрий показав, що час не є універсальним, а простір є викривленим, тепер стверджує, що світ не може бути аж таким дивовижним.

Бор терпляче розтлумачує Ейнштейну нові ідеї. Ейнштейн завзято заперечує. Він проводить ментальні експерименти, щоб продемонструвати суперечливість нових ідей: «Уявіть коробку, наповнену світлом; і от ми даємо одному фотону можливість втекти звідти на певний час...» – так починається його знаменитий уявний експеримент з «коробкою світла».

Кінець ознайомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию (<https://www.litres.ru/karlo-rovell/s-m-osnovnih-urok-v-z-f-ziki/?lfrom=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.

