

РІЧАРД МЮЛЛЕР

ФІЗИКА ЧАСУ

УСЕ ВІДБУВАЄТЬСЯ ЗАРАЗ

*Переклав з англійської
Артем Замоцний*

«НАШ ФОРМАТ» · Київ · 2019

ЗМІСТ

<i>Вступ</i>	7
Частина перша · Дивовижний час	
1. Заплутана таємниця	15
2. Ейнштейнове повернення в дитинство	24
3. Карколомні стрибки зараз	36
4. Суперечності та парадокси	51
5. Межі швидкості світла та її «фокуси»	61
6. Уявний час	69
7. У нескінченність і ще далі	83
Частина друга · «Зламана стріла»	
8. Стріла спотикання	97
9. Демістифікація ентропії	103
10. Містифікація ентропії	112
11. Пояснення часу	123
12. Наш малоймовірний Всесвіт	128
13. Всесвіт вибухає	138
14. Кінець часу	152
15. Кидаємо ентропію під автобус	162
16. Альтернативні стріли	174

Вступ

Зараз — цей таємничий і ефемерний момент, який щомиті змінює своє значення, — не безпричинно бентежив служителів церкви, філософів і фізиків. Щоб збагнути сенс поняття *зараз*, потрібне розуміння теорії відносності, ентропії, квантової фізики, антиматерії, перенесення в часі, явища квантової заплутаності, Великого вибуху й темної енергії. Тільки *зараз* ми маємо в руках такі знання із фізики, щоб зрозуміти сенс цього *зараз*.

Розмитий сенс *зараз* як явища часто був каменем спотикання в розвитку фізики. Ми розуміємо уповільнення часу, виходячи із швидкості й гравітації, навіть «перевертання» часу в теорії відносності, однак не надто просунулися вперед у тлумаченні найдивовижніших аспектів часу: його плину і сенсу явища *зараз*. Базовий робочий майданчик фізики, відомий як просторово-часова діаграма, ігнорує ці питання, а фізики часом хибно трактують цей брак визначеності як певну перевагу і роблять висновок, що плін часу — це ілюзія. Але насправді все навпаки: допоки сенс *зараз* вислизатиме нам з рук, подальший поступ у розумінні часу — цього ключового аспекту реальності — неможливий.

Моя мета в цій книжці — зібрати до купи базову фізику, поскладати частинки пазлу аж до появи виразного образу поняття *зараз*. Щоб це спрацювало, потрібно буде також знайти й вилучити елементи пазлу, які помилково було вкладено не в ті місця.

Широкий спектр пов'язаної із цим фізики пояснює, чому цей пазл залишається розмитим. Фізика не є простою і лінійною,

й ця книжка вимушено охоплює величезну кількість матеріалу — можливо, завелику для одного видання. Цю історію можна розглядати як таємницю за сімома замками, до якої ми поступово збиратимемо ключі, щоб дістатися до розгадки.

Моя сфера діяльності — це переважно експериментальна фізика, конструювання і застосування нових технічних засобів для вимірювань, які часом допомагають відкривати не відомі раніше фізичні істини. Два з моїх проєктів були безпосередньо пов'язані з поясненням часу як явища: вимірювання мікрохвильового шуму від Великого вибуху і точне встановлення розширення Всесвіту в минулому разом з відкриттям темної енергії, яка прискорює розширення. Визнаю, що я написав ще кілька суто теоретичних праць — утім робив це переважно в тих випадках, коли на експерименти бракувало фінансування або коли наявна теорія видавалася мені вкрай непереконливою. Наскільки мені відомо, на сьогодні це єдина книжка, повністю присвячена часові й написана фізиком, глибоко задіяним в експериментальній роботі; я спробую пролити трохи світла на виклики й розчарування, які несе в собі така праця.

Шлях до розуміння *зараз* складається із п'яти частин.

Частину першу («Дивовижний час») я розпочинаю з обговорення деяких аспектів часу, які є загальноприйнятими, проте досі викликають подив; ці аспекти у своїй суті були сформульовані Альбертом Ейнштейном. Час не лише розтягується, викривлюється і перевертається, а ще й цими явищами безпосередньо впливає на наше життя. GPS — система супутників, яка допомагає нам орієнтуватися, — цілком залежить від цих дивних властивостей часу. Саме теорія відносності підвела нас до думки про чотири-вимірний простір-час. Основна ідея першої частини — це те, що ми доволі багато розуміємо про час, що його властивості хоч і зовсім не прості, але добре вивчені. Швидкість плину часу залежить від швидкості й гравітації в цьому місці, але навіть послідовність подій (котра подія настала раніше) не є універсальною. Більше того: теорія відносності Ейнштейна дає нам багато структурних компонентів, потрібних для розуміння суті явища *зараз*.

1 ЗАПЛУТАНА ТАЄМНИЦЯ

УСЛАВЛЕНІ ФІЛОСОФИ ВІДЧАЙДУШНО ШУКАЛИ
ВІДПОВІДІ НА ПИТАННЯ ПРО ЧАС — АЛЕ ФІЗИКА
ПОРОДИЛА НАДІЮ ЙОГО ЗРОЗУМІТИ

Time flies like the wind —
Fruit flies like bananas*.

Дитячий жарт

Про вас відомо дещо, про що мало хто знає — можливо, ніхто крім вас: ви читаете цю книжку саме зараз. Можна висловитися навіть точніше: ви читаете слово *зараз* саме зараз.

Цей факт вам видається очевидним, однак для мене він таким не є. Ви читаете слово *зараз* саме *зараз* — хоча мені про це нічого не відомо, якщо тільки я не стою за вашою спиною й не дивлюся на ваш палець, яким ви водите по рядках.

Зараз — надзвичайно просте, але одночасно дивовижне і таємниче явище. Ми розуміємо його значення, але нам складно пояснити це поняттями, які б самі не потребували пояснення. «*Зараз* — це момент, що відділяє минуле від майбутнього». Добре, але спробуйте дати означення минулого і майбутнього, не використовуючи слова *зараз*. А те, що ви розумієте під минулим і майбутнім, постійно змінюється. Зовсім нещодавно читання цього абзаца було майбутнім. Тепер більшість абзаца лишилася в минулому.

* Жарт побудований на явищі синтаксичної омонімії. Після прочитання рядка «Time flies like the wind» («Час летить, як вітер») у наступному рядку «Fruit flies like bananas» логіка інерції підказує інтерпретацію «Фрукт летить, як банани», хоча логічнішим є тлумачення «Плодові мухи люблять банани». — *Прим. пер.*

Зараз у минулому вже весь той абзац (звісно, якщо ви не пропускаєте). *Зараз* прив'язане до конкретного часу. Але цей час безперервно змінюється. Саме тому ми користуємося годинниками. Вони показують нам число, з яким пов'язане наше *зараз*; ми називаємо це поточним часом. Годинники постійно самі себе актуалізують, зазвичай щосекунди. Плин часу невблаганний. Можна стояти на місці в просторі, але не в часі. Ми рухаємося в часі, але не маємо влади над цим рухом — якщо, певна річ, хтось не ви-найде машину часу.

Значення *зараз* — лише одна з багатьох загадок цього дивного феномену, який ми називаємо часом. Примітно, що ми доволі багато розуміємо щодо часу, зокрема химерні й аж ніяк не інтуїтивні аспекти Ейнштейнаної теорії відносності; але примітно також те, наскільки слабке наше фундаментальне розуміння часу — що таке час і як він пов'язаний з реальністю. У цій книжці йдеться про час — про те, що ми про нього знаємо і чого не знаємо.

Чи *рухається* час? 18 квітня 1906 року о 5 год 12 хв місто Сан-Франциско сколихнув потужний землетрус. Час цієї події не зрушив з місця — можете перевірити у Вікіпедії. Що ж саме *рухається*, що ж *спливає*? Це і є сенс поняття *зараз*. Воно змінюється, розвивається, прогресує в часі.

Чи, може, доречніше буде сказати, що час *спливає* після *зараз*. Увесь цей «рух» доволі складно описати. Якщо ми кажемо, що автомобіль *рухається*, ми фіксуємо його місцезнаходження в якийсь певний момент, а потім фіксуємо в інший момент. Швидкість — це відстань, яку подолав автомобіль, поділена на витрачений час і подана, наприклад, у кілометрах за годину. Спроба в такий само спосіб описати *зараз* неодмінно скінчилася б невдачею. *Зараз* — це просто *зараз*; можете трохи зачекати — утім *зараз* буде так само *зараз*. Чи є тут рух? Так, адже рух часу демонструє той факт, що значення *зараз* змінюється. З якою швидкістю *рухається* час? Зі швидкістю одна секунда за секунду.

Існує ще третя інтерпретація: що новий час генерується щомиті, що в цьому новоствореному часі й полягає значення *зараз*. Чи різняться між собою ці погляди на час у філософському або

2 ЕЙНШТЕЙНОВЕ ПОВЕРНЕННЯ В ДИТИНСТВО

Ключові питання щодо часу є одночасно
найпростішими...

Істинно кажу вам: поки ви не змінитесь і не станете мов діти серцем своїм, нізащо не зрозумієте час.

Хай мені пробачить Матвій (18:3)

Наступна цитата взята зовсім не з дитячої книжечки про годинник, як може здатися на перший погляд.

Якщо, наприклад, я скажу: «Потяг прибуває о 7 годині», — маю на увазі приблизно таке: «Перебування малої стрілки мого годинника навпроти цифри 7 і прибуття потяга — одночасні події».

Це, здавалося б, просте твердження з'явилося 30 червня 1905 року у провідному фізичному журналі свого часу *Annalen der Physik*. Статтю, у якій воно містилося, можна вважати найзнаковішою публікацією від 1687 року, коли Ісаак Ньютон дав фізиці поштовх до розвитку своїми «Математичними началами натуральної філософії». Її автор згодом стане іконою геніальності й наукової продуктивності і через дев'яносто п'ять років журнал *Time* (навіть назва нагадує про час!) назве його людиною століття. Мало хто наважувався піддавати це сумніву. Слова про малу стрілку годинника написав Альберт Ейнштейн.

Стаття Ейнштейна називалася «До електродинаміки тіл, що рухаються». Але що спільного мають малі стрілки годинника і при-

буття потягів з електродинамікою, або й узагалі з електрикою і магнетизмом? Виявляється, багато чого. Стаття Ейнштейна насправді була про час і простір: він хотів увести ці поняття до фізики. Більш доречною назвою статті могло би бути щось таке: «Теорія відносності — революційний прорив у розумінні часу і простору». До Ейнштейна час і простір були лише координатами, що використовувалися для формулювання умови задачі та її розв'язання. «Коли прибуває потяг?» Відповіддю на це питання мав би бути момент часу. Але Ейнштейн показав, що все не так просто.



© Lucien Chavan/Wikimedia

2.1. Альберт Ейнштейн у 1904 році, за рік до теорії відносності.

Теорія відносності

Що таке час? Дати йому визначення доволі складно. Ньютон не обтяжував себе такими речами. У своїх монументальних «Началах» він писав: «Я не даю визначення часу, місця і руху як понять усім добре відомих». Добре відомі — може й так, натомість складні в окресленні. Ейнштейн теж не дав визначення часу, але все ж дослідив його надзвичайно проникливо, відкривши цілком несподівані властивості. Свою першу статтю про відносність він продовжує в тому самому аж до сміху елементарному й часом нудно-педантичному стилі.

3 КАРКОЛОМНІ СТРИБКИ ЗАРАЗ

ЗМІНА СИСТЕМ ВІДЛІКУ СПРИЧИНЯЄ ДИСКРЕТНІ
СТРИБКИ ЧАСУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ ПОДІЙ

Навіть тих, хто цілком дає собі раду з уповільненням часу, відкриття Ейнштейна щодо понять *коли* і *зараз* можуть вибити з колії. Термін *квантовий стрибок* початково застосовувався для опису процесів квантової фізики. Але *квантовий* означає «дискретний, раптовий, несподіваний». Згідно з теорією відносності, така раптова зміна має місце у випадку віддаленої події, якщо ви раптово зміните обрану систему відліку. Такий часовий стрибок може бути дуже великим.

Окреслимо певну подію як «Моя новорічна вечірка»; для цієї події ми можемо визначити місце і час. Моя новорічна вечірка відбулася опівночі 31 грудня 2015 року (чи якогось іншого), а місцем був мій дім, розташування якого задане трьома вимірами — довжиною, шириною і висотою.

Час події — це її *коли*. Якщо дві події мають те саме *коли*, їх називають одночасними. Ваша новорічна вечірка і така сама вечірка вашого друга були одночасними. (Пригадайте цитату з Ейнштейна на початку попереднього розділу про стрілку годинника і прибуття потяга). Усе просто. Але якщо дві події є одночасними в одній системі відліку (скажімо, мого будинку), чи обов'язково вони будуть одночасними в іншій системі, наприклад, літака, що летить у повітрі? Очевидна відповідь — так. Правильна відповідь — ні.

Якщо, звісно, ви не вивчали праці Ейнштейна, чи припускали коли-небудь, що відповідь на це запитання може бути заперечною? Геній ученого полягав у тому, що він міг ставити подібні за-

питання. І справді — не відмовившись від концепції абсолютної одночасності, він нізачо не впорався б із відносністю.

У своїй теорії Ейнштейн продемонстрував: якщо дві події відбуваються в різних місцях, то дві одночасні події (скажімо, обидві відбуваються просто *зараз*) не будуть одночасними в іншій системі відліку. Одна подія відбудеться раніше, ніж інша. Яка з них буде першою? Залежить від системи відліку. Послідовність може бути різна. Саме це я маю на увазі під висловом, що час може «перевертатися».

Припустімо, ви летите до якоїсь далекої зірки. Що відбувається на Землі? Це запитання непрямо передбачає вживання слова *зараз*: що відбувається на Землі *зараз*?

Але щойно ви прибудете до своєї зірки й зупинитеся, змініте свою супутню систему відліку з рухомої на нерухому систему відліку зірки, значення універсального *зараз* зміниться — адже ваша супутня система відліку після зупинки співвідноситься з іншою системою. Коли ваша супутня система відліку перестрибує до іншої системи, те саме робить час віддаленої події. Формула стрибків у часі виглядає доволі просто: $\gamma Dv/c^2$, де γ — гамма-фактор, D — відстань до події, v — зміна швидкості, а c — швидкість світла. Ця формула виведена в Додатку 1.

Наведемо приклад. Нехай ваша новорічна вечірка відбувається у вас удома, а моя — на Місяці. Ці події одночасні в супутній системі відліку будинку. Погляньмо на ці події із супутньої системи відліку мого лабораторного піона. Відстань D/c дорівнює 1,3 світлової секунди, швидкість піона v/c близька до 1, а гамма-фактор — число 637, яке ми обчислили раніше. Отже, часовий стрибок — це просто добуток 1,3 на 637, що дорівнює 828 секунд. Цілих 14 хвилин між «одночасними» новорічними вечірками! Яка із цих подій настане раніше, залежить від того, куди рухатиметься піон: у бік Місяця чи від нього.

Цей приклад здається вам заплутанішим, ніж «довше життя»? Більшість людей вважає, що так, але це реальність. Хоча не так просто прийняти це як даність, стрибки в часі лежать в основі найзаплутаніших парадоксів відносності, які ми обговоримо

4 СУПЕРЕЧНОСТІ ТА ПАРАДОКСИ

ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ ВИГЛЯДАЄ ЛОГІЧНО
НЕПОСЛІДОВНОЮ — АЖ ПОКИ НЕ ПОДИВИШСЯ
ГЛИБОКО В КОРИНЬ...

Будь-яка істина проходить три стадії. Спочатку її
вистіюють. Потім її зяято заперечують. І щойно після
цього її приймають як очевидну.

Вислів приписують Артуру Шопенгауеру

Парадокс, парадокс,
Феноменальний парадокс.

Комічна опера «Пензанські пірати»

Відкриття Ейнштейном уповільнення часу для тіл, що рухаються, вражало. Відкриття того факту, що черговість подій може бути відносною, породжувало занепокоєння. Подальші висновки щодо енергії, як на ті часи, взагалі видавалися неймовірними. Ейнштейнові дослідження часу показали, що ця тема сповнена несподіванок і що результати досліджень мають вплив не лише на наше розуміння Всесвіту, а й на наше щоденне життя.

Навіть якщо ви вважаєте, що приймаєте погляди Ейнштейна, вас, однак, далі дивуватимуть певні речі, які з них випливають. Сформульовані у певний спосіб, ці висновки видаються суперечливими й можуть завдавати клопоту студентам (чи навіть деяким викладачам). Два найвідоміші й найзаплутаніші з них називають *парадоксом близнят* і *парадоксом комори й жердини*. Я додам ще третій — *парадокс тахіонного вбивства*.

Теорія відносності є повністю самодостатньою, проте інколи — особливо новачкам — вона такою не здається. Нібито присутні в ній суперечності й парадокси впливають просто зі звичайних помилок — наприклад, як у доведенні, що $1 = 2^*$. Вам може здаватися, що цими парадоксами переймаються тільки початківці, але навіть професіонали можуть мати певні упередження, про які вони й не здогадуються. У результаті багато викладачів стикаються із труднощами, намагаючись пояснити ці парадокси своїм студентам.

Почну з найпростішого парадокса.

Парадокс комори й жердини

Фермер має комору завдовжки 6 метрів. Він також має 12-метрову жердину, яку хотів би зберігати в коморі (мал. 4.1, угорі). Фермер вивчав теорію відносності, тому має намір скористатися зі скорочення довжини й умістити жердину в коморі. Він біжить із жердиною достатньо швидко, щоб її довжина скоротилася до 6 метрів, тобто гамма-фактор дорівнює 2 (мал. 4.1, посередині), і збирається зачинити за собою двері комори, щойно жердина опиниться всередині. Ніби все сходиться.

Але щойно фермер починає бігти із жердиною, він розуміє, що в його новій супутній системі відліку (яка рухається) стає меншою не жердина, а саме комора. Гамма-фактор $\gamma = 2$, тобто комора тепер має довжину тільки 3 метри. Система відліку фермера, що рухається, є також супутньою системою жердини, тобто дов-

* Ось доведення, що всі числа є рівними. Нехай $A = 13$ і $B = 13$; C і D можуть бути довільними числами. Тоді $A = B$. Помножимо обидві частини рівняння на $(C - D)$ й отримаємо $A(C - D) = B(C - D)$. Розпишемо: $AC - AD = BC - BD$. Перегрупуємо: $AC - BC = AD - BD$. Винесемо множники за дужки: $C(A - B) = D(A - B)$. Скоротимо $(A - B)$ й отримаємо $C = D$. Якщо C і D є довільними числами — отже, я довів, що всі числа рівні. Помилкою тут було ділення на $(A - B)$. Цього не можна робити, тому що $A - B = 0$. Простіша версія доведення (де хибність логіки очевидніша): $C \cdot 0 = D \cdot 0$. Достатньо скоротити нулі.

5 МЕЖІ ШВИДКОСТІ СВІТЛА ТА ЇЇ «ФОКУСИ»

ВІДСТАНЬ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ СПРАВДІ МОЖЕ
ЗМІНЮВАТИСЯ ШВИДШЕ ВІД ШВИДКОСТІ СВІТЛА

Цей корабель пройшов Дугу Кесселя за менш ніж
дванадцять парсеків!

Ган Соло, фільм «Зоряні війни»

Хоч жодне звичайне фізичне тіло (яке можна привести у стан спокою) і не може рухатися зі швидкістю, більшою за світлову, відстань між вами й таким об'єктом можна змінити в будь-якому темпі, навіть значно вищому за швидкість світла — без суперечності з теорією відносності. Ви побачите всю важливість парадоксальної різниці між *швидкістю* і *темпом зміни відстані*, коли я розповім про розширення Всесвіту і його зв'язок із плином часу. Почну із тісного зв'язку між прискоренням і гравітацією.

Ейнштейнів принцип еквівалентності

Глядачів часом дратують науково-фантастичні фільми, в яких астронавти ходять своїми кораблями, ніби там є гравітація. У деяких фільмах (наприклад, «2001: Космічна Одиссея» або «Інтерстеллар») показують обертові секції корабля, що симулюють гравітацію. (До речі, обидва ці фільми правильно показують швидкість обертання, необхідну для симулювання гравітації, що близька до земної). Але на кораблі «Ентерпрайз» у серіалі «Зоряний шлях» гравітація присутня і без обертових секцій. Когось це дратує, але не мене. Капітан Кірк, як виглядає, може видобути

достатньо енергії зі свого пального (антиматерії) й напевно без проблем здатний підтримувати прискорення корабля $1g$ — тобто таке саме, як прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Так можна створити штучну гравітацію, яка дорівнює земній. Прискорення може бути надане вздовж лінії руху корабля чи перпендикулярно їй, залежно від того, на якій поверхні астронавти хочуть стояти і з якого ілюмінатора дивитися.

Щодо прискорення $1g$ є одна цікава деталь: якщо прискорюватися так протягом року, то (коли вірити класичній фізиці) в кінці року ви перевищите швидкість світла. Тобто із прискоренням $1g$ можна непогано розігнатися. Це надає сенсу багатьом науково-фантастичним подорожам.

Насправді рік із прискоренням $1g$ не розжене вас до швидкості світла, тому що спрацює ефект відносності. Беремо за основу постійне прискорення $1g$ у системі відліку Землі. Щоб створити близьку до земної гравітацію, потрібне прискорення $1g$ у системі відліку, що відповідає супутній системі космічного корабля. Якщо застосувати формули теорії відносності, то для прискорення a в системі корабля прискорення відносно Землі має бути a , поділене на куб гамма-фактора, тобто a/γ^3 .

Ця формула достатньо проста, щоб без складних обчислень вирахувати умови космічної подорожі в електронній таблиці. Можна створити стовпчики для часу, положення і власного прискорення $1g$ ($a = 9,8$ [м/с] = $35,3$ [км/год] щосекунди); стовпчики для гамма-фактора, власного часу (часовий інтервал, поділений на гамма-фактор), прискорення в системі відліку Землі (a , поділене на куб гамма-фактора) тощо. Поділіть час на короткі інтервали і додайте невелику кількість власного часу, щоб отримати загальну суму власного часу. Отримані результати будуть доволі цікавими. За рік часу (в супутній системі корабля) в разі прискорення $1g$ корабель досягне $0,76$ швидкості світла, за два роки — $0,97$, а за три роки — $0,995$. Звісно, швидкості світла ви ніколи не досягнете.

Припустімо, капітан Кірк летить на Сіріус. Він не має жодного надсвітлового двигуна, а лише підтримує комфортне прискорен-

ня 1g у своїй супутній системі відліку. На таку подорож буде потрібно 8,6 року, хоча капітан постаріє лише на 2,9 року. (Ці й наступні дані я вирахував за допомогою електронної таблиці). Коли він долетить, у його супутній системі Сіріус буде наближатися зі швидкістю 99,5 % світлової. Земля буде за його спиною, але через стискання простору перебуватиме на відстані лише 0,9 світлового року (замість 8,6). Це відповідає часу, який минув за відчуттями капітана (2,9 року). Щоб зупинитися на Сіріусі, йому б довелося першу половину шляху прискорюватися на 1g, а другу половину гальмувати на 1g.

Для Кірка минуло 2,9 року, а відстань до Сіріуса змінилася на 7,7 світлового року. Зміна відстані — $7,7/2,9 = 2,6$ світлового року на рік, або в 2,6 раза більше швидкості світла. Це те, що я називаю *фокусом швидкості світла*. Відстані, виміряні в системах відліку, що прискорюються, можуть змінюватися в довільному темпі. Достатньо прискорити власну супутню систему відліку, і відстань до віддаленого об'єкта раптом стане меншою — помноженою на гамма-фактор.

Як досягнути швидкості світла

Чи можна досягнути швидкості світла? Що відбулося б із часом, якби була така можливість? Швидкість відносно світла v/c тоді дорівнювала б 1. Гамма-фактор, який визначає уповільнення часу й скорочення довжини, став би нескінченно великим; це все підказує нам, що в разі досягнення швидкості світла наш час мав би зупинитися, а наш розмір (у системі відліку Землі) зменшився б до нуля. Більше того: оскільки гамма-фактор став би нескінченно великим, то наша енергія γmc^2 так само стала б нескінченною. Отже, швидкості світла можна досягнути, якщо прикласти до себе нескінченну енергію і нескінченно прискорюватися. Нескінченність означає значно більше, ніж уся енергія Всесвіту, — отже, це не дуже реально.

Тепер погляньмо на деякі справді високі прискорення, яких вдавалося дійсно досягнути. BELLA — це електронний при-