

## УСІ МИ ВИЙШЛИ З... БІТА

Сет Ллойд — професор Массачусетського технологічного інституту, головний винахідник у Дослідницькій лабораторії електроніки та проектувальник першого реального квантового комп'ютера. Про нього як про сенсацію писали великі статті в *New York Times*, *Los Angeles Times*, *Washington Post*, *The Economist* і *Wired*. Його ім'я часто з'являється на сторінках *Nature*, *New Scientist*, *Science* та *Scientific American*.

Чи є щось спільне між Усесвітом і бітом? Усесвіт — це найбільше з усього, що існує в природі, тоді як біт — найменша частинка інформації... і водночас — фундамент Усесвіту. Кожна молекула несе в собі біти інформації. Проте тільки завдяки відкриттю й розвитку квантових комп'ютерів удалося зрозуміти, яким чином ця інформація реєструється та обробляється. Усесвіт — це гігантський квантовий комп'ютер, який створює все, що ми бачимо довкола. Залишається тільки дізнатися: хто ж тоді програмує сам Усесвіт?..

Книжка [Ллойда] робить для квантової інформації те, що Браян Грін зробив для струн, а Стивен Гокінг — для простору-часу... Подаючи важливі питання в доступній формі, праця Ллойда є життєво важливою для аудиторії, яка спеціалізується на науках про Землю та космос.

*Booklist*

Авторитетний і жвавий путівник по цій карколомній плутанині.

*The Guardian*

[www.bookclub.ua](http://www.bookclub.ua)

ISBN 978-617-12-4724-6



9 786171 247246

СЕТ ЛЛОЙД

ПРОГРАМУЮЧИ ВСЕСВІТ

СЕТ ЛЛОЙД



# ПРОГРАМУЮЧИ ВСЕСВІТ

КОСМОС — КВАНТОВИЙ КОМП'ЮТЕР

СЕТ ЛЛОЙД



**SETH LLOYD**

# **PROGRAMMING THE UNIVERSE**

**A QUANTUM COMPUTER SCIENTIST  
TAKES ON THE COSMOS**



**Alfred A. Knopf**

**СЕТ ЛЛОЙД**

**ПРОГРАМУЮЧИ  
ВСЕСВІТ**

**КОСМОС – КВАНТОВИЙ КОМП'ЮТЕР**

УДК 524.8

Л67

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

Перекладено за виданням:

Lloyd S. Programming the Universe.

A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos / Seth Lloyd. —  
New York: Alfred A. Knopf, 2006. — 224 p.

Переклад з англійської *Марини Репан*

Видавництво вдячне за допомогу в підготовці видання  
Дмитру Якубовському, докторанту Інституту теоретичної фізики  
НАН України та постдокторанту Інституту Нільса Бора (Данія)

Дизайнер обкладинки *Костянтин Кізуб*

---

Науково-популярне видання

ЛЛОЙД Сет

**Програмуючи Всесвіт. Космос — квантовий комп'ютер**

Керівник проекту *С. І. Мозгова*

Відповідальний за випуск *А. В. Альошичева*

Редактор *Р. А. Трифонов*

Художній редактор *А. О. Попова*

Технічний редактор *В. Г. Євлахов*

Коректор *Є. О. Демченко*

Підписано до друку 08.02.2019. Формат 60х90/16. Друк офсетний.  
Гарнітура «Newton». Ум. друк. арк. 16. Наклад 3000 пр. Зам. № .

Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля»

Св. № ДК65 від 26.05.2000

61140, Харків-140, просп. Гагаріна, 20а.

E-mail: cop@bookclub.ua

Віддруковано у ПРАТ «Харківська книжкова фабрика “Глобус”»

61052, м. Харків, вул. Різдяна, 11.

Свідоцтво ДК № 3985 від 22.02.2011 р.

www.globus-book.com

---

ISBN 978-617-12-4724-6

ISBN 978-0-307-26471-8 (англ.)

© Seth Lloyd, 2006  
© Hemiо Ltd, видання українською мовою, 2019  
© Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля», переклад і художнє оформлення, 2019

## ВІДГУКИ НА КНИЖКУ «ПРОГРАМУЮЧИ ВСЕСВІТ»

Ллойд вважає, що він знайшов новий спосіб пролити світло на одне з найфундаментальніших питань у науці: чому світ такий складний?.. Його відповідь повертає до концепції, що інформація завжди породжує більше інформації... Можлива за відповідних умов поява ДНК, статевого розмноження та свідомості практично неминуча. Ця концепція до глибини душі заворожує та заспокоює.

*The New York Review of Books*

Сет Ллойд написав авторитетний і часто жвавий путівник по цій карколомній плутанині. Його переказ космологічних історій дає їм нове звучання.

*The Guardian (Лондон)*

Ця книжка заворожує. Основна ідея автора полягає в тому, що інформація є в основі всього. Інтелектуальна подорож світом квантового обчислення робить читання дуже захопливим. Я був не в змозі відкласти книжку.

*Антон Цайлінгер,  
професор фізики Віденського університету*

Сучасний варіант важливого питання «Розум чи матерія?» — це «Інформація чи фізика?». Сет Ллойд захоплено й наполегливо працював над цим питанням. У його баченні, досягнутому після складного дослідження, питання вийшло за власні межі: найглибша реальність — це водночас інформація і фізика.

*Френк Вільчек, професор фізики МТІ,  
нобелівський лауреат*

Для тих читачів, які обожають філософські питання про буття, немає більшої інформації, ніж тут. Сет Ллойд переписав інструкцію до космології, надав глибокі та достовірні дані з царини обчислень, що мають стосунок до проблем складності, життя та Всесвіту. Це абсолютно новий підхід до деяких найглибших наукових таємниць Всесвіту, привабливо розкритий одним із найбільш творчих науковців та провідних мислителів.

*Пол Девіс, Університет Маккворі,  
автор книжки «Як створити машину часу»*

6

Книжка [Ллойда] робить для квантової інформації те, що Браян Грін зробив для струн, а Стівен Гокінг — для простору-часу... Подаючи важливі питання в доступній формі, праця Ллойда життєво важлива для аудиторії, яка спеціалізується на науках про землю та космос.

*Booklist*

Сет Ллойд — професор машинобудування в МТІ, головний дослідник у Дослідницькій лабораторії електроніки та проектувальник першого реального квантового комп'ютера. Про нього як сенсацію писали великі статті в *New York Times*, *Los Angeles Times*, *Washington Post*, *Economist* і *Wired*. Його ім'я часто з'являється на сторінках *Nature*, *New Scientist*, *Science* та *Scientific American*. Він мешкає в Кембриджі, штат Массачусетс.





*Присвячується Єві*

## ЗМІСТ

<i>Пролог. Яблуко і Всесвіт</i> .....	11
<b>ЧАСТИНА 1. ЗАГАЛЬНА КАРТИНА</b> .....	15
<i>Розділ 1. Вступ</i> .....	16
<i>Розділ 2. Обчислення</i> .....	32
<i>Розділ 3. Всесвіт-обчислювач</i> .....	55
<b>ЧАСТИНА 2. ДЕТАЛЬНИЙ РОЗГЛЯД</b> .....	81
<i>Розділ 4. Інформація і фізичні системи</i> .....	82
<i>Розділ 5. Квантова механіка</i> .....	119
<i>Розділ 6. Атоми за роботою</i> .....	149
<i>Розділ 7. Універсальний комп'ютер</i> .....	172
<i>Розділ 8. Спрощена складність</i> .....	202
<i>Особиста примітка: втіха від інформації</i> .....	241
<i>Подяки</i> .....	246
<i>Література для дальшого читання</i> .....	248
<i>Алфавітний покажчик</i> .....	252

## Яблуко і Всесвіт

— Спочатку був біт, — так розпочав я.

11 \_\_\_\_\_

У каплиці в монастирі XVII століття, який прихистив Інститут дослідження комплексних систем у Санта-Фе, зібралось багато вчених-завсідників: фізиків, біологів, економістів, математиків, — серед них і лауреати Нобелівської премії. Великий старець від астрофізики та квантової гравітації Джон Арчібальд Вілер доручив мені надскладне завдання — прочитати лекцію на тему «Все походить від біта». Я прийняв завдання. І коли мене почали долати сумніви, чи варто було, відступати вже виявилось надто пізно. Я тримав яблуко в руці.

— Усе, що існує, походить із інформації, або бітів, — продовжив я, нервово підкидаючи яблуко в повітрі. — Це яблуко є ідеальним прикладом. Яблука вже тривалий час асоціюються з інформацією. Яблуко — плід знань, чий смак приніс у світ смерть та інші негаразди. Воно містить інформацію про добро і зло. Саме за траєкторією падіння яблука Ньютон відстежив закон усесвітнього тяжіння, а викривлена поверхня яблука є образом викривленого просторово-часового континууму Ейнштейна. Ще безпосередніше: у насінні яблука зашифровано генетичний код — структуру майбутніх яблунь. І остання деталь, але не найменша за значенням: яблуко містить вільну енергію — енергію, збагачену калоріями-бітами, потрібними нашому організмові для функціонування.

Я вкусив яблуко.

— Без сумніву, в цьому яблуку міститься багато *видів* інформації. Але *скільки* інформації там?

Я поклав яблуко на стіл та обернувся до приладової панелі, щоб виконати деякі обчислення.

— Цікаво відзначити, що кількість бітів у яблуку відома від початку ХХ століття, ще до того, як з'явилося слово «біт». Спочатку комусь може здатися, ніби в яблуку міститься безліч бітів, але це не так. Насправді закони квантової механіки, які керують усіма фізичними системами, роблять скінченною кількість бітів, необхідну для зумовлення мікроскопічного стану яблука та його атомів. Кожному атому, згідно з його розташуванням та швидкістю, відповідають лише декілька бітів; кожному ядерному спіну<sup>1</sup> в атомному ядрі відповідає лиш один-єдиний біт. Унаслідок цього в яблуку міститься лише в кілька разів більше бітів, ніж атомів, — кілька мільйонів мільярдів мільярдів нулів та одиниць.

Я повернувся обличчям до аудиторії. Раптом помічаю — яблука немає. Отакої. Хто б міг його взяти? Я кинув погляд на доброзичливе обличчя Вілера та на безтурботний вираз Мюррея Гелл-Манна, нобелівського лауреата, автора відкриття кварків та володаря одного з найбільш авторитетних поясів чемпіона з фізики у світі.

— Я не можу продовжувати без яблука. Немає його — немає біта, — заявив я і присів.

Це тривало лише мить, доки яблуко не віддав єхидний інженер із *Bell Laboratories*. Я взяв його й тримав на висоті, щоб ускладнити спробу вчинити чергову крадіжку. Та це виявилось помилкою. Деякий час, правда, здавалося, що все добре. Я продовжив:

— Усі біти рівні за кількістю інформації, яку вони можуть передавати. Біт (скорочення від терміна «бінарна одиниця інформації») має два розрізнявальні стани — 0 або 1, «так» або «ні», орел або решка. Будь-яка фізична система з такими стана-

---

<sup>1</sup> Спін — власний момент кількості руху елементарної частинки. Ядерний спін — це векторна сума власних спінів нуклонів і їхніх орбітальних моментів імпульса, зумовлених рухом нуклонів у ядрі. (*Тут і далі прим. ред., якщо не зазначено інше.*)

ми містить чітко один біт. Система з більшою кількістю станів — більше бітів. Система з чотирма станами (наприклад: 00, 01, 10, 11) містить два біти; система з вісьмома станами (наприклад: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111) — три біти і так далі. Як я вже казав, квантова механіка гарантує: будь-яка фізична система зі скінченною енергією, що міститься в скінченному об'ємі простору, має обмежену кількість розрізнявальних станів, і тому їй відповідає обмежена кількість бітів. Інформацію містять усі фізичні системи. За словами Рольфа Ландауера, науковця з корпорації *IBM*, «інформація — фізична».

У цей момент Гелл-Манн перебив мене:

— Невже всі біти справді рівні? От, наприклад, біт, який каже нам про те, чи деякі широко відомі математичні гіпотези істинні. Порівняйте його з бітом у довільному киданні жеребу. Деякі біти важливіші за інші.

— Так, погодився я. Різні біти відіграють різні ролі у Всесвіті. Усі біти передають одну й ту саму кількість інформації, але якість і важливість тієї інформації різняться. Значущість «так» залежить від того, яке питання поставлено. Два біти інформації, що встановлюють природу пари нуклеотидів у ДНК яблука, значно важливіші для поколінь майбутніх яблук, ніж біти інформації, породженої тепловим зміщенням атома карбону в одній із молекул яблука. Лише кілька молекул та їхніх супровідних бітів необхідні для передачі запаху яблука, тоді як мільярди і мільярди бітів потрібні для того, щоб дати яблуку поживну цінність.

— Але, — запитав Гелл-Манн, — чи існує математично точний спосіб кількісного визначення значущості біта?

— У мене немає готової розгорнутої відповіді на це питання, — відповів я, все ще тримаючи яблуко. — Значущість біта інформації залежить від того, яким чином обробляється інформація. Інформацію передають усі фізичні системи, і коли вони еволюціонують у часі, то трансформують і обробляють ту інформацію. Якщо електрон «тут» — це 0, то електрон «там» — 1, і коли

електрон пересувається «звідси» «туди», він перевертає свій біт. Природна динаміка фізичної системи може вважатись обчисленням, у якому біт не лише передає 0 або 1, але й також є інструкцією: 0 може означати «роби це», а 1 — «роби те». Значущість біта залежить не лише від його цінності самої по собі, а й від того, яким чином ота цінність діє на інші біти впродовж тривалого часу в процесі обробки інформації, що утворює динамічну еволюцію Всесвіту.

14

Я продовжував визначати біти яблука та детально роз'яснювати роль, яку ті біти відіграють у процесах, що формують характеристики яблука. Все йшло добре. Я виконував завдання на тему «Все походить від біта» й успішно відповідав на численні питання. Принаймні мені так здавалося.

Коли я закінчив лекцію та зійшов з трибуни, хтось підскочив до мене ззаду. Одна особа в аудиторії серйозно сприйняла мою проблему з викраденням яблука. То був Дойн Фармер, високий чоловік атлетичної статури, один із засновників теорії хаосу. Він схопив мене за руки та змусив випустити яблуко. Щоб вирватися з його лещат, я штовхнув його до стіни. Зображення фракталів та фото індіанців попадали. Та звільнитися не вдалось, бо Фармер штовхнув мене додолу. Ми котилися по підлозі, перекидаючи стільці. А яблуко зникло. Перетворилося просто на біти.

Частина 1

## **ЗАГАЛЬНА КАРТИНА**



## РОЗДІЛ 1

### Вступ

16 Ця книжка — історія Всесвіту і біта. Всесвіт — це найбільше з усього, що існує в природі, а біт є найменшою частинкою інформації. Всесвіт створений з бітів. Кожна молекула, атом та елементарна частинка несуть біти інформації. Кожна взаємодія між цими часточками Всесвіту обробляє ту інформацію, змінюючи біти. Тобто Всесвіт обчислює, і оскільки він регулюється законами квантової механіки, він здійснює обчислення квантово-механічним чином; його біти — це квантові біти. Історія Всесвіту — це, по суті, величезне та безперервне квантове обчислення. А сам Всесвіт — це квантовий комп'ютер.

Тоді постає питання: *що* обчислює Всесвіт? Він обчислює сам себе. Всесвіт обчислює власну поведінку. Щойно Всесвіт виник, він почав обчислювати. Спочатку структури, які він створював, були дуже прості, містили елементарні частинки і встановлювали елементарні закони фізики. З часом, у міру того як Всесвіт обробляв дедалі більше інформації, структури, які він формував, ставали все складнішими: галактики, зорі, планети й так далі. Життя, мова, людина, суспільство, культура — усе це завдячує існуванню природній здатності матерії та енергії обробляти інформацію. Здатність Всесвіту обчислювати проливає світло на одну з найвеличніших таємниць природи: яким чином такі складні системи, як живі істоти, можуть бути результатом фундаментально простих фізичних законів. Ці закони дають нам змогу прогнозувати майбутнє, але тільки в рамках імовірності й тільки у великих масштабах. Квантово-обчислювальна природа Всесвіту свідчить про те, що подробиці майбутнього від по-

чатку непередбачувані. Їх може обчислити комп'ютер розміром із сам Всесвіт. Інакше єдиний спосіб дізнатися про майбутнє — це чекати й спостерігати.

Познайомимось ближче. Перше, що я пам'ятаю, — це життя в курнику. Мій батько навчався в мебляра у Лінкольні, Массачусетс, а курник був позаду флігеля. Батько перетворив приміщення на двокімнатну квартиру; простір, де кури вмощувалися на сідало, став спальним місцем для мого старшого брата і мене (молодший брат мав право на колиску). Уночі мати співала нам, укривала ковдрою і зачиняла дерев'яні двері курника, залишаючи нас кутатись і визирати у вікно на навколишній світ.

17 \_\_\_\_\_

Перше, що пригадую, — я бачу вогонь, що здійнявся в смітєвому кошику з дротами, з великим ромбом. Потім згадується, як я міцно тримався за ногу матері в блакитних джинсах трохи вище від коліна і як батько пускав японського повітряного змія-літака. Після того спогади ринуть один за одним. Сприйняття кожного живого створіння є унікальним, сповненим подробиць, структурованим. Та всі ми мешкаємо в тому самому просторі, і нами керують ті самі фізичні закони. У школі я дізнався, що закони, котрі керують Всесвітом, на диво прості. Мені стало цікаво, як таке може бути, що складність, яку я спостерігав за вікном спальні, є результатом оцих простих фізичних законів? Я вирішив дослідити це і витратив роки на вивчення законів природи.

Гайнц Пейджелс, який трагічно загинув через нещасний випадок під час сходження на гору в Колорадо влітку 1988 року, був блискучим та неординарним мислителем і вірив у подолання загальноприйнятих меж науки. Він надихнув мене на розробку фізично точних методів описування та вимірювання складності. Пізніше під керівництвом Мюррея Гелл-Манна в Каліфорнійському технологічному інституті я дізнався, яким чином закони квантової механіки та фізики елементарних частинок ефективно «програмують» Всесвіт, сіючи зерна складності.

Сьогодні я професор машинобудування (англійською це буквально звучить «механічної інженерії») в Массачусетському технологічному інституті (МТІ). Або, оскільки в мене немає диплома про освіту у сфері механічної інженерії, мене точніше назвати професором квантово-механічної інженерії. Квантова механіка — це галузь фізики, що торкається матерії та енергії в їхніх найменших масштабах. Квантова механіка для атомів означає те саме, що класична механіка — для двигунів. Простіше кажучи, я — інженер атомів.

18

У 1993 році я відкрив метод конструювання квантового комп'ютера. Квантові комп'ютери — це пристрої, в яких використовуються здатність окремих атомів, фотонів та інших елементарних частинок до обробки інформації. Вони обчислюють так, як не здатні обчислювати класичні комп'ютери, як-от персональні. У процесі дослідження того, яким чином змусити найменші часточки Всесвіту — атоми та молекули — обчислювати, я краще зрозумів природну здатність до обробки інформації Всесвіту як єдиного цілого. Складний світ, що його ми бачимо навколо, — це вияв квантового обчислення Всесвіту, що лежить у його основі.

Цифровий прорив, що бурхливо відбувається сьогодні, є напевно чи останнім у довгій черзі революцій в обробці інформації, що тягнуться назад крізь розвиток мови, еволюцію статі, створення життя аж до початку самого Всесвіту. Кожна революція заклала основу для наступної, і всі революції в обробці інформації від часу Великого вибуху беруть початок у природній здатності Всесвіту обробляти інформацію. Обчислюючи, Всесвіт *обов'язково* породжує складність. Поява життя, статевого розмноження, мозку, людської цивілізації — це не випадковість.

## **Квантовий комп'ютер**

Квантова механіка добре відома своєю химерністю. Хвилі поводяться, мов частинки, а частинки — як хвилі. Речі можуть бути

одночасно в двох місцях. І, мабуть, не дивно, що в мікроскопічних масштабах відбуваються дивні й парадоксальні речі, адже наші інтуїтивні знання розвинулися внаслідок взаємодії з об'єктами, значно більшими за окремі атоми. Квантова механіка спантеличує. Нільс Бор, батько квантової механіки, якось сказав: «Якщо хтось вважає, що він може пізнати квантову механіку без запаморочення голови, то він ще не розібрався в ній як слід».

Квантові комп'ютери використовують «квантову дивність» для виконання завдань, надто складних для традиційних комп'ютерів. І все тому, що квантовий біт, або кубіт, здатний передавати і 0, і 1 *водночас* (класичний біт може передавати лише те або друге), тому квантовий комп'ютер може виконувати водночас мільйони обчислень.

Квантові комп'ютери обробляють інформацію, що зберігається в окремих атомах, електронах та фотонах. Квантовий комп'ютер є втіленням демократії в контексті інформації: кожен атом, електрон та фотон однаково беруть участь у передачі та обробці інформації. І ця фундаментальна інформація не обмежується квантовими комп'ютерами. Усі фізичні системи зводяться до квантово-механічних, і всі вони містять та обробляють інформацію. Світ складається з елементарних частинок — електронів, фотонів, кварків, — і кожна елементарна частинка фізичної системи передає фрагмент інформації: одна частинка — один біт. У ході взаємодії вони трансформують і обробляють цю інформацію, біт за бітом. Кожне зіткнення між елементарними частинками — це проста логічна операція, або «оп».

Щоб зрозуміти будь-яку фізичну систему через її біти, необхідно докладніше розібратися в механізмі, який дозволяє кожній частинці передавати та обробляти інформацію. Коли ми зрозуміємо, яким чином комп'ютерів це вдається, нам буде зрозуміло, як це робить фізична система.

Ідею створити такий комп'ютер уперше запропонували ще на початку 80-х Пол Беніофф, Річард Фейнман, Девід Дойч та інші. Коли про квантові комп'ютери заговорили вперше, уявлення

про них було суто теоретичним: ніхто й гадки не мав, як їх створити. На початку 1990-х я показав, яким чином їх можна створити, використовуючи експериментальне обладнання, що існує сьогодні. Останні десять років я разом із деякими вченими та інженерами зі світовим ім'ям займаюся розробкою, створенням та використанням квантових комп'ютерів.

20 Є вагомими причини для конструювання квантових комп'ютерів. Перша — це наші можливості. У сфері квантових комп'ютерів, що є технологіями для маніпулювання матерією в атомарних масштабах, за останні роки відбулися значні прориви. Тепер ми володіємо достатньо стійкими лазерами, достатньо точними технологіями виробництва та електронікою, досить швидкою для обчислень на атомному рівні.

Друга причина — це наші потреби, якщо ми хочемо продовжувати створювати дедалі швидші та потужніші комп'ютери. За останні півстоліття потужність комп'ютерів збільшувалася вдвічі кожних півтора року. Цей вибух потужності комп'ютера відомий як закон Мура — на честь Гордона Мура, згодом голови компанії *Intel*, який помітив експоненційне зростання в 1960-х роках. Закон Мура — це закон не природи, а людської винахідливості. Кожні вісімнадцять місяців комп'ютери стають дедалі швидшими, бо кожні вісімнадцять місяців інженери додумуються, яким чином удвічі скоротити розмір дротів та логічних схем, з яких вони сконструйовані. Щоразу розмір базових компонентів комп'ютера зменшується вдвічі, оскільки вдвічі більше вміщується на чипі того самого розміру. Комп'ютер, який отримуємо в результаті, вдвічі потужніший за свого попередника півторарічної давнини.

Якщо ви спроектуєте закон Мура на майбутнє, ви виявите, що розмір проводів і логічних схем, з яких сконструйовані комп'ютери, досягне атомарних масштабів десь через сорок років; отже, згідно з законом Мура, ми повинні конструювати комп'ютери квантового масштабу. Квантові комп'ютери становлять найвищий рівень мініатюризації.

Квантові комп'ютери, що їх я та мої колеги вже створили, досягли цієї мети: кожен атом передає біт. Але квантові комп'ютери, які ми можемо створювати сьогодні, малі не тільки за розміром, але й за потужністю. Найбільший комп'ютер загального призначення, доступний на момент написання цієї книжки, має від семи до десяти квантових бітів і може виконувати тисячі квантових логічних операцій за секунду (для порівняння: традиційний настільний персональний комп'ютер може передавати трильйони бітів та виконувати мільярди класичних логічних операцій за секунду). Ми вже вміємо проектувати комп'ютери зі складниками атомарних масштабів; ми просто ще не вміємо створювати *великі* комп'ютери з такими складниками. Оскільки перші квантові комп'ютери розроблено десять років тому, так чи інакше кількість бітів, які вони обробляють, збільшується вдвічі майже кожні два роки. Навіть якщо експоненційний рівень прогресу можна підтримувати, все одно мине сорок років, доки квантові комп'ютери зможуть зрівнятися за кількістю оброблюваних бітів із сьогоднішніми класичними комп'ютерами. Квантові комп'ютери ще далекі від стаціонарних.

Третя причина створювати квантові комп'ютери — це те, що вони дозволяють нам розуміти, яким чином Всесвіт передає та обробляє інформацію. Один із найкращих способів зрозуміти закон природи — це створити та використовувати машину, що начоно демонструє цей закон. Часто ми спочатку створюємо машину, а тоді приходить черга закону. Колесо та дзига існували впродовж тисячоліть до того, як було встановлено закон збереження моменту імпульсу. Кинутий камінь передував законіві Галілея про рух; призма і телескоп існували до «Оптики» Ньютона; парова машина передувала регуляторіві потужності Джеймса Ватта та другому законіві термодинаміки Саді Карно. Коли вже квантову механіку настільки важко досягнути розумом, то чи не варто було б сконструювати машину, що втілює закони квантової механіки? Спостерігаючи, як ця машина діє, людина може отримати практичне розуміння квантової механіки, подібно до

того як дитина, котра грається з дзигною, сприймає принципи моменту імпульсу, втілені іграшкою. Без практичного досвіду спостереження за фактичною поведінкою атомів наше розуміння залишається поверхневим. «Іграшкові» квантові комп'ютери, які ми конструюємо сьогодні, — це машини, що дозволяють нам дізнатися все більше про те, яким чином фізичні системи передають та обробляють інформацію на квантово-механічному рівні.

22

Остання причина створювати квантові комп'ютери полягає в тому, що це цікаво. На наступних сторінках ви зустрінетеся з деякими найпередовішими вченими та інженерами зі світовим ім'ям: Джеффом Кімблом із Каліфорнійського технологічного інституту, творцем однієї з найперших у світі фотонних квантових логічних схем, Дейвом Вайнлендом із Національного інституту стандартів і технологій, який сконструював перший простий квантовий комп'ютер, Гансом Мооєм з Дельфтського технологічного університету, чия група була однією з тих, хто раніше за всіх продемонстрував квантові біти в надпровідникових схемах, Девідом Корі з МТІ, який сконструював найперший молекулярний квантовий комп'ютер, а його квантові аналогові комп'ютери вміють виконувати обчислення, для яких знадобився б класичний комп'ютер, більший за сам Всесвіт. Побачивши, як функціонують квантові комп'ютери, ми зможемо досягнути обчислювальну здатність Всесвіту.

## **Мова природи**

Коли Всесвіт обчислює, він без зусиль розплутує складні структури. Щоб збагнути, яким чином він обчислює, і краще розібратися в цих складних структурах, ми повинні дізнатися, як він передає та обробляє інформацію. Іншими словами, ми повинні вивчити глибинну мову природи.

Вважайте мене свого роду атомним масажистом. Оскільки я — професор квантово-механічної інженерії в МТІ, моя робота

полягає в масажуванні електронів, фотонів, атомів та молекул до тих особливих станів, в яких вони стають квантовими комп'ютерами та квантовими комунікаційними системами. Атоми крихтіні, проте сильні; витривалі, проте чутливі. До них легко говорити (вдарте по столу — і ви поговорили з мільярдами них), але їх важко слухати (ви не можете розповісти мені, що стіл сказав у відповідь на удар). Їм байдуже до вас, вони не втручаються в чужі справи і роблять те, що завжди робили. Але якщо ви масажуєте їх саме так, як треба, ви можете причарувати їх. Вони обчислюватимуть для вас.

Атоми не єдині у своїй здатності обробляти інформацію. Фотони (частинки світла), фонони (частинки звуку), квантові точки (штучні атоми), надпровідникові схеми — усі ці мікроскопічні системи здатні передавати інформацію. І якщо ви говорите їхньою мовою та люб'язно просите їх, вони оброблятимуть інформацію для вас. Якою ж мовою говорять такі системи? Як і всі фізичні системи, вони реагують на енергію, силу та кількість руху, світло і звук, електрику й гравітацію. *Фізичні системи говорять мовою, граматику якої складається з законів фізики.* За останні десять років ми досить добре вивчили цю мову, щоб говорити з атомами, щоб переконати їх виконувати обчислення і звітувати про результати.

Наскільки ж складно «розмовляти атомною мовою»? Щоб навчитися говорити вільно, потрібне ціле життя. Я сам погано розмовляю атомною мовою порівняно з іншими науковцями та квантово-механічними інженерами, з якими ви познайомитеся в цій книжці. Проте навчитися достатньо для того, щоб підтримувати просту розмову, нескладно.

Як і всі мови, атомну легше вивчити, коли ви молодші. Разом із Полом Пенфілдом я викладаю для першокурсників МТІ курс інформатики та ентропії. Метою курсу, як і цієї книжки, є розкриття фундаментальної ролі, яку інформація відіграє у Всесвіті. П'ятдесят років тому першокурсники МТІ отримували повний обсяг знань про двигуни внутрішнього згорання,



зубчаті механізми, важелі, трансмісії та шківів. Двадцять п'ять років тому вони отримували повний обсяг знань про вакуумні трубки, транзистори, аматорський радіозв'язок. Тепер вони отримують по зав'язку забитий обсяг знань про комп'ютери, дисководи, оптоволокна, смуги частот і коди стиснення музики та зображення. Їхні попередники жили у світах, де панували механічні та електричні технології; сьогоднішні першокурсники походять зі світу, в якому панує інформація. Їхні попередники вже багато знали про силу та енергію, напругу та заряд; сьогоднішні першокурсники знають багато про біти і байти. Мої першокурсники вже стільки знають про інформаційні технології, що їх можна навчати предметів, які до того можна було викладати студентам-випускникам, — як-от та ж квантова механіка. (Мої старші колеги з факультету машинобудування скаржаться, що нові першокурсники ніколи не користувалися викруткою. Це неправда. Щонайменше половина з них користувалися викруткою, щоб інсталювати більше пам'яті у свої комп'ютери.)

У межах дослідницького проекту, підтриманого Національним науковим фондом, я організував заняття, щоб навчити першо- та другокласників того, яким чином інформація обробляється в мікроскопічному масштабі. Шести- й семирічні діти сьогодні також озброєні ляхно глибокими всебічними знаннями про комп'ютери. У них також немає проблем з отриманням знань про біти і байти. Тоді я попросив зіграти в гру, в якій кожен учень представлятиме атом у квантовому комп'ютері, і вони це зробили з великою готовністю й точністю.

Проте ті з нас, хто доріс до сучасної революції в обробці інформації, цінують розмаїття та значущість інформації не менше, ніж молодше покоління. Не має значення, старий ви чи молодий — коли ви закінчите читати цю книжку, ви знатимете, як попросити атоми виконати прості обчислення, застосовуючи машини, що існують у всьому світі, і граматику мови природи.

## Революції в обробці інформації

В історичній ретроспективі глибинна здатність Всесвіту обробляти інформацію переросла в ряд революцій в обробці інформації. Зараз ми перебуваємо в центрі такої революції, що її рухає швидкий темп розвитку електронно-обчислювальних технологій, утілений законом Мура. Квантові комп'ютери становлять передовий загін цієї революції. Та хоч яка захоплива і бурхлива наша революція в обробці інформації, вона не є ані першою, ані найвидатнішою.

25

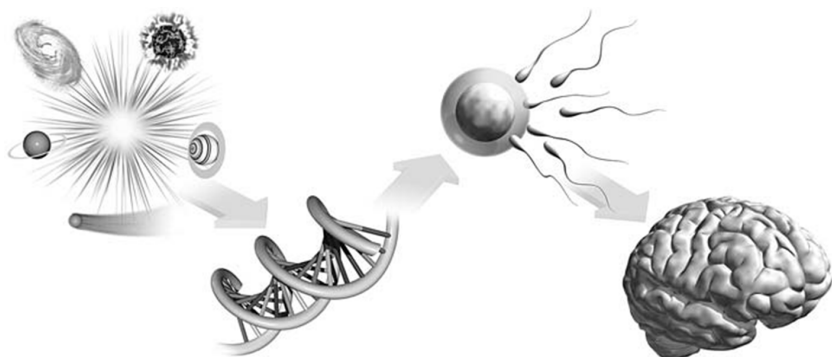
Видатною революцією було винайдення нуля. Число нуль винайшли давні вавилоняни й передали світу через арабів. Завдяки використанню нуля для подання чисел, кратних десяти (10, 100, 1000 і т. д.), наша арабська цифрова система відрізняється від подібної системи римлян, які використовували відмінні символи для чисел, кратних 10 ( $X = 10$ ;  $C = 100$ ;  $M = 1000$ ). Хоча це здається незначною зміною подачі в числовій формі, винайдення арабських цифр мало істотний вплив на математичну обробку інформації. (І не найменше значення мало збільшення простоти й прозорості комерційних операцій. Якби працівники в *Enron*<sup>1</sup> здійснювали свої тіньові бухгалтерські обробки в римських цифрах, їм би це зійшло з рук!) Походження арабської цифрової системи пов'язане з супровідною технологією — абаком, або рахівницею, — простою, зрозумілою та потужною лічильною машиною, що складається з кількох рядів кісточок, нанизаних на дротинки. Перший ряд відповідає одиницям, другий — десяткам, третій — сотням і так далі. Абак із лише десятьма рядками здатний виконувати розрахунки в мільярдах.

Потужнішим за здатність абака запросто мати справу з великими числами є його втілення концепції нуля. Схоже, що пристрій

---

<sup>1</sup> *Enron* — американська енергетична корпорація, яка збанкрутувала у 2001 р. Було розкрито, що її фінансову звітність сфальсифікували. Скандал навколо *Enron* став одним із символів корпоративної злочинності та фінансових махінацій транснаціональних компаній. (Прим. перекл.)

**Рис. 1а. Швидкий розвиток бітів**

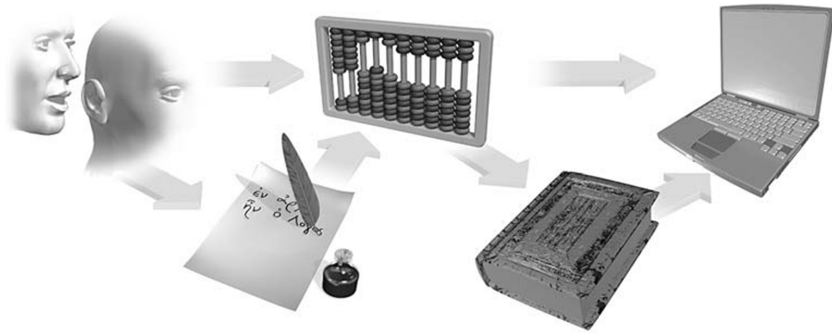


*Історію Всесвіту можна розглядати як послідовність революцій в обробці інформації, кожна з яких ґрунтується на технологіях, що виникли в результаті попередніх революцій*

передував слову. Слово *zero* (нуль) — італійське, воно є скороченням від *zefiro*, а те походить від середньовічного латинського *zephirum*, старофранцузького *cifre*, арабського *sifr*, санскритського *shunya* — «пустака». В арабській числовій системі нуль відіграє роль поважної особи, яка дає життя найбільшим числам (10, 100, 1000, ...), щоб їх було легко подавати. Порожнеча — це потужний пристрій. Незважаючи на цю силу (або, можливо, саме через неї), нуль є числом, що викликає підозру. Він якийсь протиприродний. Дійсно, він не є одним із природних чисел (1, 2, 3, ...). Нуль в абстрактному значенні є надскладною концепцією, але абак показує його як річ просту й конкретну — коли кісточки відкинуто.

Абак демонструє, що революцію в обробці інформації не можна відокремити від глибинного механізму або технології того, як інформація подається та обробляється. Технологія обробки інформації (наприклад, абак) зазвичай невід’ємна від революційної ідеї (наприклад, нуля).

Повертаючись на тисячі років назад, ми виявляємо навіть іще геніальніший прорив — писемність. Первісна технологія складалася з видряпування знаків на глині або камені. Писемність

**Рис. 16. Швидкий розвиток бітів**

майже буквально закарбувала мову. Вона запустила масштабні зміни в організації суспільства, контракти, рукописи та книжки, подібні до цієї. За роки технології писемність зазнала вдосконалень — від каменю до паперу та електронів. Кожен вияв писемності — від заповіту до віршів і неонових зображень — має власну варіацію технології для подання слів.

Розвиток самої людської мови 100 000 років тому, а то й більше, був (щоб нахвалити нас самих як вид) першокласною революцією в обробці інформації. Палеонтологічний літопис показує, що розвиток мови супроводжувався відносно швидкою еволюцією частин мозку, пристосованих до обробки мови, і тривав завдяки їй. Ми можемо вважати нову нейронну мережу разом із супровідним розвитком голосових зв'язок природною «технологією», механізмом, що породжує мову. Ця додаткова нервова технологія, судячи з усього, і дала паростки дивовижної всесвітності людського мовлення — здатності передати однією мовою більш чи менш повноцінно те, що сказано іншою. Як мінімум, мова дозволила появу суто людських форм соціальної організації, що зробило наш вид доволі успішним на сьогодні.

Чим далі ми повертаємося в часі, тим більше важливих революцій в обробці інформації відкриваємо. Розвиток мозку та центральної нервової системи був тріумфом технології, розвиненої

природою, яка добре підходила для трансформації інформації з зовнішнього світу та для спілкування між частинами організму. Розвиток багатоклітинних організмів передусім відбувався внаслідок численних проривів у внутрішньо- та міжклітинній комунікації. Кожна успішна мутація, кожен приклад видоутворення — це прогрес в обробці інформації. Але заради ще успішнішої революції, яка перевершує будь-які пізніші, ми повертаємо годинник назад на мільярд років, до винайдення природою статевого розмноження.

28

Перша сексуальна революція була грандіозним успіхом, який походить із того, що здавалося спершу поганою ідеєю. Чому поганою? Через ризик втрати цінної інформації. Успішно розвинена бактерія, яка розмножується *нестатевим шляхом*, передає свою точну генетичну характеристику (за умови відсутності випадкової мутації) нащадкам. А якщо організм розмножується *статевим шляхом*, його гени змішуються з генами партнера, щоб утворити гени нащадків у процесі, який називається рекомбінацією. Через те що кожна половина генів цього нащадка походить від різних батьків, і через процес змішання, незалежно від того, наскільки успішно розвинулись унікальні комбінації генів кожного з батьків, геном нащадка не буде таким самим, як геном батьків. Статеве розмноження ніколи не передає повністю виграшну комбінацію в незмінному стані. Не шукай добра від сексу.

То чому ж статеве розмноження — це добре? З точки зору природного добору, воно забезпечує більшу генетичну мінливість і водночас правильно відтворює індивідуальні гени. Уявімо, що світ стає все гарячішим. Бактерія, яка доти успішно розвивалася нестатевим шляхом, раптово опинилась у ворожому оточенні. Її майже ідеально схожий на неї нащадок, що дотепер був здатний прекрасно адаптуватися, нині адаптується погано.

Без статевого розмноження єдиним способом адаптації для бактерій є мутація, спричинена репродуктивною помилкою або шкідливим впливом довкілля. Більшість мутацій шкідливі: во-

ни призводять до виникнення бактерій, які розвиваються менш успішно, хоч інколи, за щасливих обставин, мутація сприяє виникненню більш теплотривкої бактерії. Нестатева адаптація несе в собі проблему через те, що ультиматум від світу «Змінюйся або помри» спрямований прямо протилежно одному з першорядних приписів життя «Підтримуй цілісність геному». В інженерії буває ситуація, коли дві функції системи пов'язані таким чином, що неможливо відрегулювати одну без негативної дії на другу. У статевому розмноженні, навпаки, внутрішнє перемішування, або рекомбінація, дає безмежні можливості для змін, однак підтримує генетичну цілісність.

Розгляньмо містечко з 1000 мешканців. Полічимо можливі комбінації парування (судячи з телепередач, їх небагато), а потім кількість можливих способів, якими гени змішуються та рекомбінуються в дітях. У результаті місто стає генетичною руйнівною силою, здатною породжувати стільки розмаїття, скільки його породжують мільярди бактерій. Це розмаїття — те, що треба: якщо епідемія уразить місто, найімовірніше, будуть ті, хто виживе й потім передасть свої стійкі гени нащадкам. До того ж здатність до розмаїття завдяки статевому розмноженню не шкодить геномові. Відокремлюючи функцію адаптації від функції підтримування цілісності індивідуальних генів, секс забезпечує значно більше розмаїття, але зберігає гени в цілісному стані. Тож секс — це не просто розвага, а ще й корисна інженерна практика.

Просуваючись іще далі назад у часі, ми приходимо до пререволюції в обробці інформації — самого життя. У точці, що приблизно відповідає третині часу, який ми відлічуємо до виникнення Всесвіту, життя зародилося на Землі (коли воно зародилося — і чи зародилося — ще десь, невідомо). Організми мають гени — послідовності атомів у молекулах, таких як ДНК, у якій закодована інформація. Кількість інформації в гені можна виміряти: людський геном володіє 6 мільярдами бітів інформації. Організми передають у спадок генетичну інформацію

своєму потомству, іноді — у вигляді мутацій. Організми, що здатні передавати в спадок генетичну інформацію, за визначенням є успішно розвиненими; ті ж, кому це не вдається, вимирають. Генетична інформація, що передає репродуктивну перевагу своєму господареві, має тенденцію зберігатися впродовж поколінь, а організми, які несуть її, народжуються, розмножуються та помирають.

30

Оскільки генетична інформація передається в спадок, то це відбувається шляхом природного добору. Гени та механізми їх копіювання й розмноження є ключовою технологією обробки інформації життя. Тож не дивно, що загальна кількість генетичної інформації, яку обробляють живі організми, перевершує кількість інформації, яку обробляють комп'ютери, створені людиною; і так буде ще доволі довгий час.

Без сумніву, життя — це грандіозна річ. Яка революція може перевершити походження життя в потужності та красі? Але насправді ще раніше була революція в обробці інформації, наслідки якої охопили все. Споконвічним процесором — обробником інформації — є сам Всесвіт. Кожен атом, кожна елементарна частинка передає інформацію. Кожне зіткнення між атомами, кожна динамічна зміна у Всесвіті, хоч яка мала, обробляє ту інформацію систематично.

Ця здатність Всесвіту до обчислення лежить в основі всіх подальших революцій в обробці інформації. Коли фізична система має здатність обробляти інформацію на рудиментарному рівні, виконуючи прості операції по кілька бітів за один раз, довільним чином ускладнені форми обробки інформації можуть бути побудовані на цих базових операціях. Закони фізики забезпечують просту обробку інформації на квантово-механічному рівні: одна частинка, один біт; одне зіткнення, один «оп». Складні форми обробки інформації, які ми бачимо навколо себе: життя, розмноження, мова, суспільство, відеоігри — усі походять від простих операцій, що регулюються законами фізики та виконуються на кількох квантових бітах за

раз. Кожна революція в обробці інформації пов'язана з технологією: комп'ютер, книжка, мозок, ДНК. Ці технології забезпечують реєстрацію та обробку інформації відповідно до набору правил. А яка технологія пов'язана, скажімо, з обробкою інформації про Великий вибух? Яка машина обробляє інформацію у Всесвіті-обчислювачі? Щоб побачити цю всесвітню технологію обробки інформації в дії, людині необхідно лише розкрити очі й розирнутися довкола. Машина, яка виконує «всесвітнє» обчислення, — це і є Всесвіт.



## РОЗДІЛ 2

# Обчислення

## Інформація

Я почав першу зустріч мого випускного курсу МТІ з інформації так, як зазвичай починаю всі свої курси лекцій:

— По-перше, — сказав я, звертаючись до двадцятьох студентів, — ви ставите питання, я пробую на них відповісти. По-друге: якщо ви не ставите питань, то їх ставитиму вам я. По-третє: якщо ви не відповісте на мої питання, я вам розповім те, що ви, на мою думку, маєте знати. Є питання?

Я чекав. Відповіді не було.

Щось не так. Зазвичай студенти МТІ дуже радіють можливості спробувати спантеличити професора, особливо якщо альтернативою є спроба професора спантеличити їх.

Я перейшов до пункту другого:

— Немає питань? Тоді ось вам одне. Що таке інформація?

А у відповідь — тиша. То вже було навіть гірше. Ці студенти з першого курсу по зав'язку набивали себе інформацією. Якщо вони не вивергнуть із себе якусь її частку, я муситиму вдатися до пункту третього.

— Гарзд. Тоді так. Що таке *одиниця* інформації?

Тут аудиторія зреагувала одразу:

— Біг!

Про що ж свідчить відповідь моїх студентів або її відсутність? Про те, що визначити кількість інформації значно простіше, ніж сказати, що таке інформація. І взагалі часто простіше відповісти на питання «Скільки?», ніж на «Що таке...?». Що таке енер-

## ЛІТЕРАТУРА ДЛЯ ДАЛЬШОГО ЧИТАННЯ

248

Міркування про Всесвіт як комп'ютер доволі поширені. На доповнення до «Останнього запитання» Айзека Азімова (1956) дивіться, наприклад: Н. R. Pagels, *The Cosmic Code* (Simon & Schuster, 1982), J. D. Barrow, *Theories of Everything* (Clarendon Press, 1991), F. J. Tipler, *The Physics of Immortality* (Doubleday, 1994).

Гіпотезу про те, що Всесвіт може бути класичним цифровим комп'ютером, висунули в 1960-х роках Конрад Цузе та Ед Фредкін. Книжка Цузе: К. Zuse, *Rechnender Raum (Schriften zur Datenverarbeitung, Band 1, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969)* в англійському перекладі: К. Zuse *Calculating Space* (MIT Technical Translation AZT-70-164-GEMIT, MIT [Proj. MAC], Cambridge, Mass. 02139, February 1970, <http://www.idsia.ch/~juergen/zuse.html>). Працю Фредкіна можна знайти на <http://www.digitalphilosophy.org/>. Особливий тип комп'ютера, який вони запропонували, мав назву клітинний автомат. Клітинний автомат складається з правильно розташованих клітин, кожна з яких містить один або більше бітів. Кожна клітина відновлюється кожен проміжок часу як функція власного стану і стану сусідніх клітин. Концепція Всесвіту як клітинного автомата зовсім нещодавно була популяризована Стівеном Вольфрамом: S. Wolfram, *A New Kind of Science* (Wolfram Media, 2002).

Щоб побачити математику, яка стоїть за мавпами, що друкують на комп'ютерах, див.: R. J. Solomonoff, "A Formal Theory of Inductive Inference," *Information and Control* 7 (1964) 1–22; G. J. Chaitin, *Algorithmic Information Theory* (Cambridge University Press, 1987); А. Н. Колмогоров, *Три подхода к определению понятия «количество информации»*, Проблемы передачи информа-

ции, 1:1 (1965), 3–11. Подальше обговорення поняття алгоритмічної теорії інформації та її зв'язку з породженням складності можна знайти у творах Юргена Шмідгубера (Juergen Schmidhuber): <http://www.idsia.ch/~juergen>. Див. також Max Tegmark, “Is ‘The Theory of Everything’ Merely the Ultimate Ensemble Theory?” *Annals of Physics* 270 (1998) 1–51 (arXiv/gr-qc/9704009). Про зв'язок між теорією алгоритмічної інформації і другим законом термодинаміки див., наприклад, статтю В. Зурека: W. H. Zurek, *Nature* 341 (1989), 119–24.

Гіпотеза про те, що проблема невирішуваності та проблема зупинення пов'язані з проблемою свободи волі, була запропонована Тьюрінгом у його статті “Computing Machinery and Intelligence,” *Mind* (1950), 433–60. Див. також: К. Р. Поппер, “Indeterminism in Quantum Physics and Classical Physics,” *British Journal for Philosophy of Science*, 1951, 179–88. Класичною роботою з цієї теми є стаття J. R. Lucas, “Minds, Machines, and Gödel,” *Philosophy* 36 (1961). Ще новіше дослідження свободи волі: Daniel C. Dennett *Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting* (MIT Press, 1984). Висновки щодо обчислювальності Всесвіту та нашої здатності передбачати його поведінку можна знайти в статті: D. R. Wolpert, “Computational Capabilities of Physical Systems,” *Physical Review E* 65, 016128 (2001) (arXiv/physics/0005058, physics/0005059).

Висновки щодо другого закону термодинаміки та природи асиметрії часу можна знайти у роботі: P. C. W. Davies, *The Physics of Time Asymmetry* (University of California Press, 1989). *Physical Origins of Time Asymmetry*), ed. by J.J. Halliwell, J. Pérez Mercader and W. H. Zurek (Cambridge University Press, 1996) — це збірка наукових статей із цієї царини. Багато оригінальних статей про демона Максвелла можна знайти у збірнику: *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*, Harvey S. Leff, Andrew F. Rex (eds), Institute of Physics, 2003.

Багато класичних праць про квантову механіку зібрано й відкоментовано у книжці: *Quantum Theory and Measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek, Princeton University Press, 1983). Підручником із квантової механіки з наголосом на фундаментальних проблемах є А. Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods* (Springer, 1995). Застосування декогерентних історій до квантової механіки описано Робертом Гріффітсом у його книжці: Robert Griffiths *Consistent Quantum Theory* (Cambridge, 2003). Те, як декогерентність і хаос об'єднуються, щоб утворити інформацію, описано в: F. M. Cucchiatti, D. A. R. Dalvit, J. P. Paz, W. H. Zurek, *Physical Review Letters* 91, 210403 (2003).

Вступ до квантової механіки та квантового обчислення можна знайти у: G. Johnson, *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer* (Knopf, 2003). Стандартний підручник із квантових комп'ютерів — це: M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000).

Деякі з моїх робіт про фізичні обмеження обчислень та обчислювальної здатності комп'ютера: “Universe as Quantum Computer,” *Complexity* 3(1), (1997), 32–35 (arXiv/quant-ph/9912088); “Ultimate Physical Limits to Computation,” *Nature* 406 (2000), 1047–54, (arXiv/quantph/9908043); “Computational Capacity of the Universe,” *Physical Review Letters* 88, (2002) (arXiv/quant-ph/0110141). Популярно про квантову гравітацію: L. Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity* (Perseus Books, 2002). Технічна версія моєї теорії квантової гравітації, що ґрунтується на квантовому обчисленні: “The Computational Universe: Quantum Gravity from Quantum Computation,” arXiv/quant-ph/0501135.

Про наукові студії складності можна прочитати тут: Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and Complex* (Freeman, 1995); John H. Holland, *Emergence: From Chaos*

*to Order* (Perseus, 1999); Stuart Kauffman, *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity* (Oxford, 1996). Складність та визначення логічної глибини аналізує Чарльз Беннетт: Charles Bennett, “Dissipation, Information, Computational Complexity, and the Definition of Organization,” *Emerging Syntheses in Science*, ed. D. Pines (Addison Wesley, 1987), а також про це йдеться у: “Logical Depth and Physical Complexity”, *The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey*, ed. R. Herken (Oxford, 1988), pp. 227–57. Додаткове визначення термодинамічної глибини можна знайти у S. Lloyd and H. Pagels, “Complexity as Thermodynamic Depth,” *Annals of Physics* 188 (1988), 186–213.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

52

- абак 25, 26, 43–45  
«абсолютний ноутбук» 181, 182, 184  
Аверроес (Ібн-Рушд) 53, 54  
автокаталітична серія реакцій 232  
Адамс, Дуглас 75  
Азімов, Айзек 75, 178, 179, 187, 248  
Аліса (персонаж Льюїса Керролла) 41  
«амбіційна» система 225  
ангстрем 38  
Аристотель 53  
арифмометр 44  
атом 12, 16, 18, 19, 23, 55, 56, 65, 76, 87, 93, 94,  
101–103, 116–117, 149–158  
а. як біт 21, 39, 153, 203  
основний стан а. 150, 153, 154  
спектр а. 152, 153  
збуджений стан а. 152, 153  
атомістична теорія (гіпотеза) 76, 87, 88  
багатозначність у мові 42  
багатоісторична інтерпретація квантової фізи-  
ки 147, 148  
багатоклітинні організми 28  
багатосвітлова інтерпретація квантової механі-  
ки 120, 147, 148, 233, 244  
бакібол 126  
Бальб Стоїк (персонаж Цицерона) 75, 76, 78  
Бам, Арчі 176  
Бebbідж, Чарльз 43, 45, 46, 178  
Беніюфф, Пол 19  
Беннетт, Чарльз 79, 113, 180, 210, 217, 218, 225,  
241, 251  
Бернський університет 174  
біт  
важливість (значущість) б. 13, 14, 222  
квантовий б. (кубіт) 16, 19, 30, 31, 72, 128–142,  
158, 226  
ланцюжок бітів 207, 209, 210, 215, 217–219  
лічба бітами: див. двійкова система лічби  
перевертання б. 14, 94, 95, 99, 100, 113, 180,  
183, 203, 231  
перевертання квантових б. 132–134, 155  
розрізновальні стани б. 12, 13  
скорельовані б. 100, 102, 115, 135  
Больцман, Людвіг 74, 77, 78, 82, 84, 85, 87, 92,  
93, 101–103, 105, 108, 111, 136, 137, 203, 205,  
206, 234  
Бор, Нільс 19, 121, 136, 137, 145, 152  
Борель, Еміль 74, 75, 105  
Борхес, Хорхе Луїс 119–121, 148, 205, 206, 233  
Бостонський університет 116, 181, 183  
Брокман, Джон 245  
броунівський рух 88  
Буль, Джордж 48  
«Вавилонська бібліотека» (оповідання Хорхе  
Луїса Борхеса) 205, 206  
вавилоняни давні 45  
Вайнленд, Дейв 22, 168  
Валь, Каспар ван дер 171  
варіація (у відтворенні) 229  
Ватт, Джеймс 21, 89  
Велике стиснення 62, 223  
Великий вибух 55, 56, 62, 64, 78, 79, 188, 201,  
202  
В. в. як Інформаційний вибух 63, 64  
взаємна однозначність законів фізики 96  
взаємно однозначні перетворення 133  
взаємомодельованість 69  
вимірювання квантове 142–147  
випадковість 68, 149, 150, 204, 206, 240  
випромінювання  
абсолютно чорного тіла 122  
реліктове (фонове) 201  
відносності загальної теорія 194–201  
Візнер, Стівен 174  
Вілберфорс, єпископ 75  
Вілер, Джон Арчибалд 11, 120, 200  
Вінер, Норберт 87  
Вітгенштайн, Людвіг 41, 42  
вічний двигун 97  
Вольфрам, Стівен 70, 180, 248  
Вонг, Франко 169  
Гакслі, Томас 75  
галактика 66, 67, 78, 80, 212, 228  
галоїд срібла 58, 59  
Гартл, Джеймс 145, 147  
Гейвел, Тім 168  
Гейзенберг, Вернер 131  
генетичний код 11, 40  
гіпотеза Геї 240  
гіпотеза Черча—Тьюрінга 69, 234  
глибина логічна і термодинамічна 218–220,  
224, 228, 251  
глюкоза 60  
«Гностичні Євангелія» (книжка Елейн Пей-  
джелс) 214  
Гоббс, Томас 193, 194  
Гокінг, Стівен 144  
Горган, Джон 216  
горизонт 188, 224, 235  
розширення г. 77, 189, 192

- гра мовна 41  
 гравітація 56, 57, 67, 68, 227  
     квантова г. 176, 194–196, 200–202, 227, 250  
 Гуд, Крістіна 167  
 Галілей, Галілео 21, 89  
 Гедель, Курт 51, 52  
 Гелл-Манн, Мюррей 12, 13, 17, 145, 147, 216, 221, 241–243  
 Гершенфельд, Ніл 168  
 Гіббз, Джозая Віллард 74, 82, 84, 85, 87, 92, 93  
 Глешоу, Шелдон 83  
 Гріффітс, Роберт 145  
 Гровер, Лов 165  
 Дайсон, Фрімен 236  
 «Дао Де Цзин» 176, 177  
 Дарвін, Чарльз 75  
 двійкова система лічби 34–36  
 декогерентність 126–128, 134–138, 146, 147, 162, 213, 226, 227, 250  
 Дельфський технологічний університет 22, 170  
 Демокрит 76  
 демон Лапласа 117, 118, 177, 240  
 демон Лошмідта 102, 157  
 демон Максвелла 90–92, 99, 112–116, 241, 249  
 Джинс, Джеймс 75  
 «дивність» квантова 19  
 дія фізичної системи 220  
 ДНК 13, 29, 31, 43, 61, 68, 79, 212, 239  
 добір природний 240  
 довжина хвилі видимої частини спектра світла 38  
 Дойч, Девід 19, 147, 148, 158, 159, 233  
 Донн, Джон 239  
 «Дослідження законів думки» (праця Джорджа Буля) 48  
 Дослідний центр з фізики (Аспен) 243  
 думка 240  
 Еверетт, Г'ю 120  
 Еддінгтон, Артур 75  
 Ейнштейн, Альберт 11, 88, 121, 139, 140, 149, 184, 194–200  
 експеримент із двома щілинами 123–126, 134, 142, 146, 147, 159, 161  
 електровакуумна трубка 46, 47  
 електроенергія 57  
 електрон 13, 14, 19, 49, 55, 57, 65, 124–126, 150–152  
     перебування е. у двох місцях водночас 85, 125, 126, 171, 180  
 елементи логічні 48–50, 199  
 енергія 56–58, 82, 96, 97, 181, 183, 184, 187  
     вільна 11, 60–64, 67, 189, 230, 235  
     густина е. 226, 227, 235  
 е. як базова величина Всесвіту 193  
 інформація і е. 60–62  
 кінетична 89  
 механічна 57, 83, 88, 89, 97  
 розсіяння е. 236, 237  
 темна 188  
 тепла 88, 89, 96, 97  
 ензими 60  
 ентропія 57–60, 63–65, 74, 82–84, 89, 90–93, 98–116, 219, 235  
     біти і е. 100  
     інформація і е. 58–60, 74, 82–84, 90–93, 114  
     теплота і е. 58, 89  
     термодинамічна е. 93  
 Еренфест, Пауль і Татьяна 92  
 «жахлива далекодія» 139–142  
 життя 29, 30, 56, 80, 202, 223  
     виникнення ж. 29, 228, 230–232  
 закон Мура 20, 25, 47, 185, 186, 189  
 закон усесвітнього тяжіння 11  
 закони термодинаміки  
     перший 56, 57, 61, 82, 88, 89, 122  
     другий 57, 58, 61, 65, 82–84, 90–92, 94, 97, 98, 101, 108, 111, 115, 122, 241, 249  
 Залка, Крістоф 174  
 заперечення контрольоване 99, 100, 108, 110, 113, 115, 133, 137, 226  
     квантове з. к. 133–138  
 заплутаність 138–143, 180  
 згушення матерії 65, 68, 227, 228  
 значення інформації 40–43  
 зоря 67  
 зупинення проблема 51–53, 117, 249  
 Зурек, Войцех 244, 249  
 Ібн-Рушд: див. Аверроес  
 Іннсбрукський університет 168  
 Інститут дослідження комплексних систем (Санта-Фе) 11, 216, 242  
 Інститут Лауе—Ланжевена (Гренобль) 85  
 Інститут перспективних досліджень 236  
 інтернет квантовий 170  
 інтерференційний візерунок 123–128  
 інтерференція 123–128, 159–161  
 інтерферометр 38  
 інфляція космологічна 63, 229  
 інформація  
     алгоритмічна 206–210, 215–217  
     взаємна 100  
     визначення 32  
     енергія та і. 60–62  
     зусилля та і. 217, 218  
 і. як фізична величина 82  
     стирання і. 95, 96  
     утворення і. з нічого 138, 139  
 ймовірність алгоритмічна 210–213  
 іон 168  
 Каліфорнійський технологічний інститут 17, 22, 166, 235, 242  
 калорія 11, 60, 61, 227  
 калькулятор 46

## Алфавітний покажчик

254

- Карнегі—Меллона університет 116  
Карно, Саді 21  
каталізатор 231, 232  
квazar 77  
квант 121, 153, 175  
кварк 12, 19, 55, 57, 85, 234  
«квінтесенція» 188  
Кембриджський університет 119  
Керролл, Льюїс 41  
Кімбл, Джефф 22, 166—169  
«Кінець науки» (книжка Джона Горгана) 216  
Кірхнер, Леон 83  
кіт Шредінгера 144—147  
Клаузіус, Рудольф 84  
клітинний автомат 70, 180, 248  
коваріантність квантового обчислення 197, 199  
Ковен, Джордж 216  
когерентність квантова 171  
Косн, І. Бернард 83  
колапс хвильової функції 145, 162  
Колмогоров, Андрій 207, 248  
комп'ютер 43—47  
    аналоговий 43, 47, 175  
    електронний 46, 47, 50  
квантовий 16, 18—22, 47, 72—74, 174—177, 190,  
    203, 225, 250  
класичний 47  
Космологічний 187, 189, 190, 203  
персональний 49  
універсальний 68—74, 225  
цифровий 36, 43, 47, 48, 50, 70—72, 175, 248  
комп'ютерон квантовий 199  
конденсатор 49, 50, 95  
концентрація хімічної речовини 231, 232  
копенгагенська інтерпретація квантової меха-  
    ніки 120, 136, 137  
Корі, Девід 22, 168, 174, 175  
корпускулярно-хвильовий дуалізм 121—123,  
    151  
космічний розум 240  
криптографічний захист із відкритим ключем  
    163  
кубіт: див. біт квантовий  
лазер 20, 84, 150, 154, 168  
Ландауер, Рольф 13, 95, 179, 180, 241  
Лао-Цзи 176  
Лаплас, П'єр-Симон де 117, 118, 178  
«Левіафан» (трактат Томаса Гоббса) 193  
Левігін, Лев 181  
лезо Оккама 210  
Лейбніц, Готфрід Вільгельм 87  
Лефф, Гарві 114  
лінійка логарифмічна 43, 45  
Лошмідт, Йозеф 102, 103, 108—110, 137  
людина 238, 239  
Люкен, Джеймс 171  
Мабучі, Хідео 167  
маври-друкарки 74—80, 203—206  
    комп'ютер і м.-д. 79, 204—206, 210—212  
Максвелл, Джеймс Клерк 74, 82, 84, 85, 87, 90,  
    93, 104, 112, 122  
«Максимальні фізичні обмеження обчислень»  
    (праця Сета Ллойда) 181  
Марголус, Норман 180, 181  
«Марк 1» 43  
Массачусетський технологічний інститут  
    (МТІ) 18, 22—24, 32, 70, 168, 169, 171, 174,  
    180, 221  
Мелоуні, Рассел 75  
метелика ефект 66—68, 107, 117  
метр, еталони 37, 38  
механіка  
квантова 18, 19, 66, 67, 71, 84, 84, 120, 121,  
    149—151, 194, 250  
статистична 84  
механістична парадигма Всесвіту 193  
мікроскоп  
    атомно-силовий 38  
оптичний 38  
міркування логічне 53, 54  
мова  
    атомна «м.» 23, 149—157  
    комп'ютерна 42  
    «м.» нейтронів 86  
природна людська 27, 41, 42, 238, 239  
французька м. як м. науки 86  
моделювання квантове 172—175  
мозок людини 27, 42, 43, 239  
молекула 16, 18, 88  
Монро, Кріс 168  
Моой, Ганс 22, 170, 171  
Мультивсесвіт 225, 233, 234  
Мур, Гордон 20  
мутация 28—30, 79, 80  
надпровідник 170  
надскупчення галактик 66  
надструм 170  
Найквіст, Гаррі 87  
Накамура, Ясунобо 171  
напівпровідник 46  
Національний інститут стандартів і технологій  
    22, 168  
невирішуваності проблема 249  
невідомість 97—103, 107, 108  
негентропія 219  
недоведені формулювання 51  
Нейман, Джон фон 87  
нейтрино 55  
нейтрон 38, 65, 85, 86  
необчислюваність 51—54  
Непер, Джон 45  
нуль 25, 26, 44, 62  
Ньютон, Ісаак 11, 21, 87, 89, 122  
об'єднана теорія гравітації та елементарних



- частинок 195  
 однорідність Всесвіту 66  
 Ое, Кендзабуро 245  
 Оккам, Вільям 210  
 Олдз, Шарон і Девід 245  
 Омніс, Роланд 145  
 операція логічна («оп») 19, 30, 42, 47, 48, 64, 72, 220  
 Орlando, Террі 171  
 «Особистий досвід» (роман Кендзабуро Ое) 245  
 «Останнє запитання» (оповідання Айзека Азімова) 178, 179, 187, 248  
 охолодження Всесвіту 64  
 парадокс ЕПР 140  
 паралелізм квантовий 159, 160, 165, 168, 213, 225, 233, 234  
 паровий двигун 84  
 Пейджелс, Гайнц 17, 213, 214, 218, 219, 241–245, 248  
 Пейджелс, Елейн 214, 245  
 Пенфілд, Пол 23  
 переходи Джозефсона 170  
 писемність 26, 27  
 піксель 58, 59  
 Піфагор 122  
 Планк, Макс 92, 93, 122, 190  
 поведінка цільова 223, 229  
 Подольський, Борис 140  
 поля квантові 57, 63  
 потужність обчислювальна 71  
 «Походження видів» (праця Чарльза Дарвіна) 75  
 поширення невідомості 97–103, 107, 108  
 прецесія 110, 111, 132, 133  
 принцип Ландауера 94–97, 113  
 принцип невизначеності Гейзенберга 131, 132, 167  
 припущення про молекулярний хаос 102, 103  
 програма комп'ютерна 47, 48, 79, 204, 210, 211  
 перекладність п. к. 208, 209  
 проектування аксіоматичне 222  
 «Про зменшення ентропії розумними істотами» (праця Джеймса Клерка Максвелла) 90  
 «Про природу богів» (твір Цицерона) 75, 76  
 просторово-часовий континуум 11  
 простору-часу квантова схема 195  
 простота Всесвіту 224  
 протон 65, 85  
 Птолемей 45  
 раціональність та ірраціональність 53  
 реакція хімічна 79, 231, 232  
 революції в обробці інформації 18, 25–31, 223, 224, 228  
 реєстр квантовий 72  
 резонатор оптичний 166, 167, 169  
 рекомбінація генів 28, 29, 80  
 Рекс, Ендрю 114  
 реле електромеханічне 46  
 Ремзі, Норман 38, 85–87  
 рівновага теплова 235  
 «різницева машина» 45  
 робота 57, 58, 61, 84, 97  
 Розен, Натан 140  
 розкладення на множники: див. факторизація  
 роздільна здатність  
 вимірювального приладу 37  
 фотопристрою 59  
 розширення Всесвіту 57, 63, 189, 223, 234–236  
 «Сад із розгалуженими стежками» (оповідання Хорхе Луїса Борхеса) 119, 120  
 Саламінська лічильна табличка 45  
 свобода волі 52, 53, 249  
 сильна взаємодія 150  
 символ 43  
 система  
 квантова 173  
 технічна 221  
 фізична 43, 219, 220, 222  
 хаотична 107  
 хімічна 230  
 Сірак, Ігнасіо 168, 169  
 складність 17, 18, 74, 78, 194, 202–204, 213–230, 242, 250, 251  
 алгоритмічна 206–209, 215  
 вимірювання с. 215–220  
 ефективна 220–224, 228, 229, 241  
 обчислювальна 215, 217, 218, 220  
 скупчення галактик 66, 67, 228  
 слово 43  
 Смолін, Лі 194, 200  
 снукер 103–109  
 ентропія і с. 105–108  
 Соломонофф, Рей 207, 210, 217, 248  
 Сонячна система 56, 62  
 спіні ядерний 12, 110–112, 128–133, 168, 169, 173, 203  
 напрямок с. я. 110  
 спінового відлуння ефект 110–112, 128, 145  
 стала Больцмана 92  
 стала Планка 92, 122, 123, 183, 220  
 Стандартна модель фізики елементарних частинок 79, 177, 200–202, 234  
 статеве розмноження 28, 29, 228, 229  
 Стоунгендж 44  
 «Структура реальності» (книжка Девіда Дойча) 233  
 суперпозиція 129, 133, 142, 143, 154–156, 158, 171, 226  
 Всесвіт і с. 212, 225, 233  
 суспільство 238  
 Сух, Нам 222  
 схема  
 інтегральна 46, 47, 185

## Алфавітний покажчик

256

- логічна 47–51, 198  
надпровідникова 23, 46  
телескоп 62, 77  
Тель-Авівський університет 174  
теорема Марголуса—Левітіна 181, 183, 184, 189, 192  
«Теорія Всього» 200  
теорія струн 214  
теплота 57, 61, 64, 83, 84, 88  
термодинаміка 84  
Тінкем, Майкл 84, 87  
Томпсон, Бенджамін 88  
Тоффолі, Томмазо 116, 180, 181  
точка квантова 23  
транзистор 46, 47, 50, 84  
  n-типу і р-типу 50  
«Три дороги до квантової гравітації» (книжка Лі Смоліна) 194  
«Тридцять одна міра складності» (доповідь Сета Ллойда) 216  
Турчетт, Квентін 167  
Тьюрінг, Алан 52, 69, 70, 178, 249  
універсальність обчислювальна 116, 230  
Університет Рокфеллера 213, 241  
факторизація 162–165, 169, 174  
Фамі, Амір 168  
Фармер, Дойн 14  
Фейнман, Річард 19, 72, 173, 174  
«Філософські дослідження» (праця Людвіга Вітгенштайна) 41  
Фітцджеральд, Роберт 83  
флуктуації  
  квантові 67, 68, 78, 80, 200, 212, 220, 226, 230  
  статистичні 204, 206  
  термальні 212  
  хімічні 212  
флуоресценція 154, 157  
фонон 23, 121  
фотографія 58–60  
фотодетектор 121  
фотолітографія 47  
фотон 18, 19, 23, 57, 78, 121, 122, 152, 166, 167, 203  
  випромінювання і поглинання ф. атомами 152–157  
фотосинтез 67  
фрактал 79  
Фраучі, Стівен 235  
Фредкін, Едвард 70, 116, 180, 248  
фторид кальцію 174  
Хайтін, Грегорі 79, 207, 210, 215, 241, 248  
хаос 68, 107, 250  
хаотичний процес 74–80  
хаотичність алгоритмічна 215  
хвиля 121, 159  
  звукова 159  
  частинка і х. 121–128  
хромосома 40  
Цайлінгер, Антон 126  
центральна нервова система 27  
Цзяошень, Цай 171  
цифри 25, 43  
арабські 25, 44, 45  
римські 25  
Цицерон 75, 76, 78  
Цоллер, Петер 168, 169  
Цузе, Конрад 46, 70, 180, 248  
цукор 60, 61  
час Планка 224  
часопростір 196–199  
  викривлення ч. 199, 227  
Черч, Алонсо 69, 70  
число  $\pi$  79, 207, 208, 210, 211, 217, 218  
чорні діри 196, 214  
«Чорні діри, демони і втрата когерентності» (праця Сета Ллойда) 103, 241  
Чуанг, Айзек 168  
Шапіро, Джеффри 169  
Шахріяр, Селім 169  
швидкість світла 62  
Шеннон, Клод 87  
Шмідтгубер, Юрген 249  
Шор, Пітер 164, 169, 174  
Шредінгер, Ервін 144  
Штерна—Герлаха апарат 129, 134  
штрих-код 39  
яблуко 11–14, 60, 61, 77  
ядерно-магнітний резонанс (ЯМР) 168, 175  
ядро атома 65  
Ямамото, Суйосі 171  
ASCII (Американський стандартний код обміну інформацією) 36, 40  
AT&T Laboratories 164  
Bell Laboratories 165  
calculus (камінець, лат.) 44  
Enron, корпорація 25  
H-теорема 101–103, 136  
IBM, компанія 13, 79, 113, 179, 180, 210, 241  
Intel 20, 44, 185  
«KISS», інженерний принцип 221, 222  
New Yorker, журнал 75  
Nippon Electronic Corporation (NEC) 171  
perpetuum mobile: див. вічний двигун  
Physical Review, журнал 114  
Quoogole 170  
Science, журнал 157  
Scientific American, журнал 113