

Програмуючи Всесвіт. Космос – квантовий комп'ютер
Сет Ллойд

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. Навіть яблуко, що лежить на вашому столі, містить кілька видів інформації. Проте тільки завдяки відкриттю й розвитку квантових комп'ютерів вдалося зрозуміти, яким чином ця інформація реєструється та обробляється. Усесвіт – це гігантський квантовий комп'ютер, який створює все, що ми бачимо довкола. Складні системи, галактики, планети, життя, мова, людина, суспільство, культура – усе це завдячує існуванню природній здатності матерії та енергії обробляти інформацію. Обчислюючи її, Всесвіт створює нас. Він працює як величезна космічна програма. Залишається тільки дізнатися: хто ж тоді програмує сам Всесвіт?..

Сет Ллойд

Програмуючи Всесвіт. Космос – квантовий комп'ютер

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 неминуха. 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 обожнюють 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»

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 ScientificAmerican. Він мешкає в Кембриджі, штат Массачусетс.

Присвячується Єві

Пролог. Яблуко і Всесвіт

– Спочатку був біт, – так розпочав я.

У каплиці в монастирі XVII століття, який прихистив Інститут дослідження комплексних систем у Санта-Фе, зібралося багато вчених-завсідників: фізиків, біологів, економістів, математиків, – серед них і лауреати Нобелівської премії. Великий старець від астрофізики та квантової гравітації Джон Арчибальд 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 XX 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[1 - 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.)] 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 ехидний 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 станами 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.

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 дотолу. Ми котилися по підлозі, перекидаючи стільці. А яблуко зникло. Перетворилося просто на біти.

Частина 1. Загальна картина

Розділ 1. Вступ

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 початку 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 вмошувалися 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.

Перше, що пригадую, – я бачу вогонь, що здійнявся в сміттевому 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 (MIT). 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.

У 1993 році я відкрив метод конструювання квантового комп'ютера. Квантові комп'ютери – це пристрої, в яких використовується 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 навряд 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 поведуться, 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'ютерові це вдається, нам буде зрозуміло, як це робить фізична система.

Ідею створити такий комп'ютер уперше запропонували ще на початку 80-х Пол Беніюфф, 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.

Є вагомі 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 наочно демонструє цей закон. Часто ми спочатку створюємо машину, а тоді приходиться черга закону. Колесо та дзига існували впродовж тисячоліть до того, як було встановлено закон збереження моменту імпульсу. Кинутий камінь передував законові Галілея про рух; призма і телескоп існували до «Оптики» Ньютона; парова машина передувала регуляторів потужності Джеймса Ватта та другому законові 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.

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 Моом 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 крихітні, 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 згоряння, зубчаті механізми, важелі, трансмісії та шків. 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.

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[2 - 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.)] здійснювали свої тіньові бухгалтерські оборудки 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 десятима рядками здатний виконувати розрахунки в мільярдах.

Потужнішим за здатність абака запросто мати справу з великими числами є його втілення концепції нуля. Схоже, що пристрій передував слову. Слово zero (нуль) – італійське, воно є скороченням від *zefiro*, а те походить від середньовічного латинського *zephirum*, старофранцузького *cifre*, арабського *sifr*, санскритського *shunya* – «пуста». 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 майже буквально закарбувала мову. Вона запустила масштабні зміни в організації суспільства, контракти, рукописи та книжки, подібні до цієї. За роки технології писемності 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.

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 добру, 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: вони 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 рушійною 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 прареволюції 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.

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 роззирнутися 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 поставитиму 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.

– Гаразд. Тоді так. Що таке одиниця інформації?

Тут аудиторія зреагувала одразу:

– Біт!

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 енергія? Що таке гроші? Це важкі питання. Скільки енергії потрібно, щоб...? Скільки грошей треба, щоб...? Ці питання мають точні та доступні відповіді.

– Що таке біт? – спитав я.

Тепер відповіді посипалися швидко та наперебій:

– 0 або 1!

– Орел чи решка!

– Так або ні!

– Правда чи брехня!

– Вибір між двома альтернативами!

Усі ці відповіді були правильні. Слово «біт» означає binarydigit – двійкова цифра. Двійкова – це та, що складається з двох частин; а біт подає одну з цих двох альтернатив. Традиційно ці альтернативи відомі як 0 і 1, але будь-які дві відмінні альтернативи (гаряче/холодне, чорне/біле, всередині/зовні) означають біт.

Біт – найменша одиниця інформації. Підкидання монетки видає один біт: орел або решка. Два біти передають значно більший фрагмент інформації. Підкидання двох монеток видає один із чотирьох (двічі по два) результатів альтернативних рішень: орел-орел, орел-решка, решка-орел, решка-решка. Аналогічно підкидання трьох монеток видає один із восьми (двічі по двічі по два) варіантів.

Як бачите навіть із цих кількох результатів, коли ви продовжуєте підкидати монетки,

кількість загальних альтернатив – загальна можлива кількість результатів рядів підкидань – зростає швидко. Фактично з кожним наступним підкиданням (пам'ятайте: кожне підкидання видає один біт) кількість загальних альтернатив подвоюється. Тож, щоб підрахувати кількість результатів альтернативних рішень у даній ситуації, ви просто підносите два до степеня, що дорівнює кількості бітів. Наприклад, десять бітів дають два в десятому степені, або 1024 альтернативи ($2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2$

$$= 1,024 \times 10$$

).

Інакше кажучи, десять бітів відповідають трьом цифрам на позиціях «одиниці», «десятки» та «сотні», як ми традиційно рахуємо. Визначення кількості інформації – це просто лічба. Лічба бітами простіша, хоча менш відома, ніж лічба цифрами. Лічба цифрами від 0 до 9 проста: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. У цьому місці у вас, щоправда, цифри закінчуються, тож наступне число пишеться як 1, за яким іде 0, тобто 10. Число 10 має 1 у розряді десятків та 0 у розряді одиниць. Наступне число, 11, має 1 у розряді десятків і 1 у розряді одиниць. Ви можете продовжувати рахувати в цьому напрямку до 99. Наступним є число 100, що має 1 у розряді сотень, 0 у розряді десятків та 0 у розряді одиниць. (Тепер зрозуміло, чому так непросто засвоїти цей спосіб лічби вперше, коли вам років п'ять.)

Лічба бітами аналогічна. Починайте лічити: 0 = нуль, 1 = один. Поки що все йшло добре, але тепер у нас закінчилися біти. Наступною комбінацією бітів є 10, що дорівнює двом: тобто 1 у розряді «двійок» та 0 у розряді «одиниць». (Подання «двох» як «10» є особливістю двійкової арифметики, що завдає користувачеві-початківцю найбільше клопоту, як-от: «Існує 10 типів людей: ті, хто знає, що таке двійковий код, і ті, кому це невідомо».) Наступна комбінація – це 11, що дорівнює трьом: 1 у розряді двійок та 1 у розряді одиниць. Тепер у нас закінчилися двобітові числа.

Наступна комбінація – це 100, що дорівнює чотирьом: 1 у розряді четвірок, 0 у розряді двійок та 0 у розряді одиниць. Потім іде 101, що дорівнює п'яти (1 у розряді четвірок плюс 1 у розряді одиниць), 110 = шість, 111 = сім. Вісім представлене чотирма бітами: 1000, де одиниця в розряді вісімок, та 0 у розрядах четвірок, двійок та одиниць. Оскільки в них два біти замість десяти, двійкові числа подовжуються швидше, ніж звичайні.

Як числа, кратні десятьом (десятки, сотні, тисячі, мільйони), важливі у звичайному, десятичному способі лічби, – так числа, кратні двом, важливі для лічби бітами: $1 = \text{один} = 2^0$

, $10 = \text{два} = 2^1$

, $100 = \text{чотири} = 2^2$

, $1000 = \text{вісім} = 2^3$

, $10000 = \text{шістнадцять} = 2^4$

, $100000 = \text{тридцять два} = 2^5$

, $1000000 = \text{шістдесят чотири} = 2^6$

, $10000000 = \text{сто двадцять вісім} = 2^7$

. Ці числа мають бути знайомі кулінарам. Англійська система мір та ваг – це двійкова система: вісім унцій у чашці, шістнадцять – у пінті (американській, бо британська пінта дорівнює двадцятьом унціям, а тройська – дванадцятьом), тридцять дві – у кварти, шістдесят чотири – у половині галона, сто двадцять вісім – у галоні загалом. Двійкове подання числа не складніше, ніж вимірювання у квартах, пінтах та унціях. Сто сорок шість унцій, наприклад, – це один галон плюс одна пінта плюс одна чверть чашки: $128 + 16 + 2 = 146$. Написане двійковим способом 146 – це 10010010: одиниця в розряді «галонів», одиниця в розряді «пінт», одиниця в розряді «чвертей чашок», нулі в інших місцях. Щоб перевести число в двійкову систему, досить просто виміряти його чайними ложечками.

Лічба двійковим способом настільки ж проста (хоч і не для тих із нас, для кого це новина), як і двійкова арифметика. Уся двійкова таблиця додавання складається з: $0+0 = 0$, $0+1 = 1$, $1+1 = 10$. Двійкове множення навіть простіше: $0 \cdot 0 = 0$, $0 \cdot 1 = 0$, $1 \cdot 1 = 1$. Двійкова система красива.

Двійкова система також застосовується на практиці. Компактність двійкового подання

полегшує конструювання простих електронних схем для двійкових операцій. Ці схеми, своєю чергою, є основою цифрових комп'ютерів. Ми не в змозі визначити інформацію, але можемо використовувати її.

Точність

– А якщо є незліченне число варіантів? – спитав один студент. – Наприклад, існує незліченна кількість реальних чисел між 0 і 1.

– Якщо у вас є незлічена кількість варіантів, то у вас є незліченна кількість інформації, – відповів я.

Візьмімо двійкове число: 1001001 0110110 0100000 1110100
1101000 1100101 0100000 1100010 1100101 1100111 1101001 1101110
1101110 1101001 1101110 1101111, наприклад. За звичайною схемою кодування, відомою як ASCII[3 - American Standard Code for Information Interchange – Американський стандартний код обміну інформацією. (Прим. перекл.)], кожній літері або машинописному символу відповідає семибітове кодове слово.

Це число, інтерпретоване в ASCII, відповідає символам l = 1001001, n = 1101110, (пробіл) = 0100000, t = 1110100, h = 1101000, e = 1100101, (пробіл) = 0100000, b = 1100010, e = 1100101, g = 1100111, i = 1101001, n = 1101110, n = 1101110, i = 1101001, n = 1101110, g = 1100111 – і виходить «In the beginning», тобто початок тексту: «Спочатку було слово...» Додаючи більше бітів, ви можете створити число, що відповідає всьому текстові Євангелія від Йоана. Додаючи ще більше, ви можете створити число всієї Біблії, потім – Корану, відтак – Сутри Лотоса, а далі – всіх книжок Бібліотеки Конгресу і так далі. Безмежна кількість варіантів відповідає безмежній кількості чисел, або бітів, іншими словами, безмежній кількості інформації.

Проте в реальності кількість варіантів у будь-якій скінченній системі є скінченною, тож кількість інформації також скінченна. Зазвичай нам на думку спадають такі величини, як довжина, висота й вага, що безперервно змінюються: оскільки існує безмежна кількість реальних чисел між 0 і 1, вочевидь, існує безмежне число можливих довжин між нулем і одним метром. Причина, чому безперервні величини, такі як довжина металевого стрижня, можуть передавати лише скінченну кількість інформації, полягає в тому, що ці кількості здебільшого визначені та обмежені до скінченного рівня точності. Щоб розгледіти взаємодію між точністю та інформацією, уявіть вимірювання довжини того стрижня за допомогою рейки. Рейка виготовлена з деревини. На ній позначено та пронумеровано сто сантиметрів. Є позначки тисячі міліметрів, по десять на кожний сантиметр, але щоб їх пронумерувати, місця вже не вистачило. Ви можете скористатися рейкою для вимірювання довжини стрижня з точністю до міліметра. Менші за міліметр величини рейка не вимірює добре з тієї простої причини, що її фізичні властивості дають їй обмежену роздільну

здатність. Загальна кількість варіантів – 1000, що відповідає трьом цифрам точності, або приблизно десятьом бітам інформації.

Найвідоміший металевий стрижень – це той зроблений зі сплаву платини та іридію, що міститься в Міжнародному комітеті мір та ваг у Парижі, і саме він приблизно на століття визначив довжину метра (доти метр було визначено як одну десятимільйонну відстані від Північного полюса до екватора, виміряної вздовж Паризького меридіана). Якщо наша рейка виміряє цей стрижень, то вона визначить, що його довжина один метр плюс-мінус півміліметра.

Існує ще один вимірювальний пристрій, точніший за рейку, завдяки якому стануть доступними більше бітів інформації. Погляньте на стрижень під оптичним мікроскопом. Тепер можна вийти на порядок довжини хвилі видимої частини спектра світла – трохи менше за мікрон, що є мільйонною часткою метра. Мікроскоп можна використати для вимірювання довжини стрижня з точністю до мікрона. Він вимірює стрижень до шести цифр точності, що відповідає двадцятьом бітам інформації. Аналогічний ступінь точності може дати інтерферометр – пристрій, що вимірює довжину довжинами хвиль світла. Інтерферометр, який використовує світлову хвилю довжиною в один мікрон, виміряє стрижень як один мільйон довжин хвиль.

Більш екстремальні засоби забезпечують навіть більший ступінь точності. Теоретично людина може взяти пристрій під назвою атомно-силовий мікроскоп, який показує окремі атоми на поверхні, вести його вздовж стрижня й вимірювати стрижень кількістю атомів у довжині. Відстань між атомами має порядок десятимільярдної частки метра (10

м), вона відома як ангстрем. Тепер у нас є десять цифр точності, або приблизно тридцять три біти інформації про довжину стрижня.

Вимірюючи такий макроскопічний об'єкт, як стрижень, складно досягти більшої точності. У певних випадках можливо виміряти відстань значно точніше, як, наприклад, в експериментах фізика Нормана Ремзі з вимірювання мікроскопічних розрядів розміром мільярдна частка мільярдної частки мільярдної частки метра в межах нейтрона. Загальна кількість значень, яку можна виміряти за допомогою пристрою, задана діапазоном величин (наприклад, метр), поділеним на одиницю найвищої точності, на яку здатний пристрій (наприклад, міліметр). Діапазон, розділений на точність, демонструє, скільки відмінних величин значень можна зареєструвати. Кількість доступної інформації задана кількістю бітів, що необхідні для підрахунку наявних величин. Пристрій, який бере тридцять три біти інформації (десять цифр) про якусь величину, і справді працює чудово.

Щоб отримати тридцять три біти інформації про довжину нашого стрижня, нам доведеться підрахувати цю довжину в атомах, тобто зазвичай необхідні героїчні зусилля, щоб вивчати кількадесят бітів про неперервну величину, як-от довжина стрижня. І навпаки,

якщо ми використовуємо багато окремих чисел для передавання інформації, ми можемо швидко накопичити багато бітів. У квантовому комп'ютері кожен атом передає біт; щоб отримати тридцять три біти, потрібні тридцять три атоми. Наш стрижень містить приблизно мільярд мільярдів мільярдів атомів. Якщо кожен атом передає біт, то атоми в стрижні можуть передавати мільярд мільярдів мільярдів бітів – значно більше, ніж довжина стрижня передає сама по собі. У принципі, найкращий спосіб отримати інформацію – не підвищувати точність вимірювань на безперервній величині, а додавати все більшу кількість величин, кожна з яких містить лише кілька бітів. Це скупчення бітів (цифрова репрезентація) є ефективним, бо описане число загальних альтернатив зростає значно швидше, ніж кількість бітів.

Згадаймо короля в казці, що здуру погодився винагородити героя зернами пшениці: одну зернину поклали на перший квадрат шахівниці, дві зернини – на другий, чотири – на третій і так далі до двох у шістдесят четвертому степені (2

) зернят для останнього квадрата. Наслідок: загальна кількість зернин – 10 мільярдів мільярдів. Якби кожна мала діаметр лише в міліметр, вони б заповнили майже сорок кубічних кілометрів. Як видно з прикладу, лише кілька бітів необхідні для конкретизації одного з дуже великої кількості варіантів. Щоб дати кожній зернині на шахівниці унікальний штрих-код, наприклад, потрібно лише шістдесят п'ять бітів, або шістдесят п'ять часточок інформації. Маючи лише 300 бітів, ви можете надати унікальний штрих-код кожній із 10

елементарних частинок у Всесвіті. Астрономічно гігантське число можливих генетичних кодів є джерелом неймовірного розмаїття живих істот, але інформація, що продукує ці коди, може міститись у крихітній хромосомі.

Значення

– Але невже інформація не повинна щось означати? – стурбовано спитав один студент.

– Справді, коли ми думаємо про інформацію, то зазвичай асоціюємо її зі значенням, змістом, – відповів я. – Але значення «значення» не є зрозумілим.

Упродовж тисяч років філософи з різним успіхом намагалися встановити, що ж означає «значення». Причина того, чому так складно дати дефініцію, полягає в тому, що значення частки інформації великою мірою залежить від того, як інформація інтерпретується. Якщо ви не знаєте, як повідомлення має бути інтерпретоване, тоді ви не знаєте його значення. Наприклад, я вам кажу: «Так», – але ви не ставили питання. Тоді ви не знаєте, що я маю на увазі. Якщо ви спитаєте: «Можна мені ще один шматочок торта?», і я скажу: «Так», – тоді ви знаєте, що я маю на увазі. Якщо ви спитаєте: «Скільки буде два плюс два?»,

і я скажу: «Так», – тоді ви не знатимете, що я маю на увазі (хоча можете почати підозрювати, що в мене лише одна відповідь на будь-яке питання). Якщо ви спитаєте: «Скільки буде два плюс два?», і я скажу: «Чотири», – тоді ви знаєте, що я маю на увазі. Значення трохи подібне до порнографії: ви його знаєте, якщо побачите.

Розгляньмо комбінацію бітів, подану раніше: 1001001 1101110
0100000 1110100 1101000 1100101 0100000 1100010 1100101 1100111
1101001 1101110 1101110 1101001 1101110 1100111. Розтлумачена як повідомлення, зашифроване в ASCII, ця комбінація означає «спочатку». Але якщо взяти його окремо, без уточнення того, яким чином його тлумачити, це означає не що інше, як саме себе. Значення визначається лише відносно схеми інтерпретації, подібно до того, як розкривається в розмові між Алісою і Хитун-Бовтуном:

– Я не знаю, що ти маєш на увазі під словом «слава», – мовила Аліса.

Хитун-Бовтун презирливо посміхнувся.

– Звісно, що не знаєш, – доки я тобі не скажу. Я мав на увазі «детальний аргумент, що збиває з пантелику!»

– Але «слава» не означає «детальний аргумент, що збиває з пантелику», – заперечила Аліса.

– Коли я вживаю слово, – відрізав Хитун-Бовтун доволі зневажливим тоном, – це означає лише те, що значення обираю я, – і ніяк не інакше.

– Питання в тому, – зазначила Аліса, – чи ти можеш зробити так, щоб слова мали стільки різних значень.

– Питання в тому, – заперечив Хитун-Бовтун, – хто над ким головний, – тільки і всього.

Льюїс Керролл, автор творів про пригоди Аліси, в реальності мав ім'я Чарльз Доджсон і був філософом-номіналістом. Доджсону був вельми до вподоби принцип, що слова мають те значення, яке він для них обирає.

Традиційним способом вираження залежності значення від тлумачення є використання принципу мовної гри Людвіга Вітгенштайна. Це гра, у якій словам надано значення з погляду дій, до яких вони спонукають гравців. «Філософські дослідження» Людвіга Вітгенштайна, наприклад, починаються з простої мовної гри. Будівельниця може попросити свого помічника принести їй блок, колону, панель або балку. Якщо вона каже «блок», її помічник подасть їй блок. Якщо вона скаже «панель», помічник принесе панель. У найпростішій із мовних ігор ми припускаємо, що помічник знає, що будівельниця має на увазі, і коли вона каже «блок», має на увазі «принеси мені блок».

Але мовні ігри ускладнюються, і значення стає дедалі складнішим – у цьому динаміка гри. Частково проблема в тому, що природна людська мова часто багатозначна: вислів може мати багато значень. А частково – в тому, що ми не повністю розуміємо, яким чином мозок реагує на мову, тож навіть якщо знаємо, що «блок» означає «принеси мені блок», нам невідомий фізичний механізм, за яким мозок слухача приходить до такого значення. Було б корисним мати приклад ситуації, у якій частка інформації може бути розтлумачена лише одним способом і в якій механізм реакції слухача є цілком зрозумілим.

Комп'ютери дають нам такий механізм. Вони реагують на комп'ютерні мови (Java, C, Fortran, BASIC). Такі мови складаються з простих команд, як-от ДРУКУВАТИ або ДОДАВАТИ, що можуть бути пов'язані між собою і давати інструкцію комп'ютерові на виконання складних завдань. Якщо ви приймаєте точку зору Вітгенштайна, що значення частки інформації виявляється в дії, яку провокує ця інформація, то значення комп'ютерної програми, написаної певною комп'ютерною мовою, виявляється в діях, які комп'ютер виконує в міру того, як він тлумачить ту програму. Усе, що робить комп'ютер, – це виконує послідовності елементарних логічних операцій, таких як І, НЕ, КОПІЮВАТИ (обговоримо їх пізніше). Комп'ютерна програма чітко інструктує комп'ютер на виконання особливої послідовності тих операцій. «Значення» комп'ютерної програми, відповідно, має універсальний характер у тому розумінні, що два комп'ютери, які дотримуються тих самих інструкцій, виконуватимуть ту саму серію операцій з обробки інформації та отримають той самий результат.

Чіткий характер комп'ютерної програми означає, що одне і тільки одне значення приписане кожному вислову. Якщо вислів у комп'ютерній мові має більш ніж одне тлумачення, результатом буде помилка в повідомленні: для комп'ютерів багатозначність – це хиба. Натомість людські мови сповнені багатозначності: за винятком особливих обставин, більшість висловів мають безліч потенційних значень, і це є ключовим аспектом у поезії, художній літературі та побутовій розмові. Багатозначність людської мови – це не хиба. Це бонус!

Хоча значення складно визначити, це одна з найпотужніших особливостей інформації. Основна ідея інформації полягає в тому, що одна фізична система – тобто цифра, літера, слово, речення – може бути поставлена у відповідність іншій фізичній системі. Інформація є символом якогось предмета. Два пальці можуть бути використані для репрезентації двох корів, двох людей, двох гір, двох ідей. Слово може означати будь-що (будь-що, для чого в нас є слово): апельсин, корова, гроші, свобода. Складаючи слова в речення, можна передавати будь-що, що може бути виражене в словах. Слова в послідовності можуть означати складну думку.

Так само як слова можуть репрезентувати ідеї та предмети, їх також репрезентують і біти. Слово і біт – це засоби, за допомогою яких передається інформація, а інтерпретатор має надати їм значення.

Комп'ютер

– Що таке комп'ютер? – запитав я у своєї групи.

Відповіді не було. Дивно, бо я був упевнений, що мої студенти користувалися комп'ютерами від самого народження.

Я чекав. Врешті хтось зголосився відповісти:

– Машина, що маніпулює даними, які зберігаються у вигляді 0 і 1.

Інший студент не погодився:

– Ти говориш про цифровий комп'ютер. А є ж аналогові. Вони зберігають інформацію в безперервних аналогових сигналах.

У результаті всі разом дали значно ширше визначення: комп'ютер – це машина, що обробляє інформацію.

– Добре, – сказав я, – тоді яким був перший комп'ютер?

Тепер клас похвавився: «Марк 1», «механічний пристрій Беббіджа», «логарифмічна лінійка», «абак», «мозок», «ДНК»... Одна рука заворушила пальцями: «Цифри!»

Безперечно, якщо ви визначаєте комп'ютер як машину, що обробляє інформацію, то багато що здатне бути ним.

– Поки що, – сказав я, – просто погляньмо на машини, які люди створюють для обробки інформації, і залишмо питання про людей як машини, що обробляють інформацію, на потім.

Комп'ютери беруть свій початок від давньої епохи Homo sapiens – людини розумної. Подібно до перших інструментів, перші комп'ютери були кам'яними. Calculus – латинське слово, що означає «камінець», і перші калькуляції-підрахунки виконувалися шляхом розташування чи перерозташування саме камінців. І кам'яні комп'ютери не обов'язково були малими. Цілком можливо, що Стоунгендж був великим кам'яним комп'ютером для вираховування зв'язку між календарем і розташуванням планет.

Метод, що використовується в обчисленнях, накладає об'єктивні обмеження на обчислення, які можуть бути виконані (уявіть камінці проти IntelPentium IV). Кам'яні комп'ютери підходять для додавання та віднімання, але гірше пристосовані для множення

та ділення. А щоб давати раду великим числам, вам потрібно багато каміння. Кілька тисяч років тому комусь сягнула геніальна думка поєднати каміння з деревом: якщо тримати камінці в заглибинах на дерев'яному столі, їх легше пересувати туди-сюди. Потім відкрили: якщо ви використовуєте замість камінців кісточки й нанизуєте їх на дерев'яні стрижні, кісточки складно пересувати туди й назад, але також важко загубити.

Дерев'яний комп'ютер, або абак, – це потужний пристрій для лічби. До винайдення електронних комп'ютерів кваліфікований користувач абака міг перевершити в лічбі досвідченого користувача арифмометра. Але абак – це не просто зручна машина для числових маніпуляцій. Він утілює могутню математичну абстракцію – нуль. Поняття нуля є невід'ємною частиною арабської числової системи – системи, що дає можливість легко подавати й комбінувати в довільному порядку великі числа, і абак є її механічним утіленням. Але що з'явилося першим? Беручи до уваги походження слова «зеро» та стародавність першого абака, ймовірно, що такі пристрій[4 - У XVIII ст. до н. е. у вавилонян була вже усталена «арабська» числова система, але нуль був вилучений з контексту, його не писали (наприклад, 210 і 21 писали однаково). Найстаріша відома «прото-абакова» Саламінська лічильна табличка датована IV ст. до н. е. Використання 0 (нуля) було введене Птолемеєм у 130 р. н. е. і стало загальноприйнятим в Індії на середину VII ст. н. е. (Прим. авт.)]. Іноді пристрої створюють ідеї.

І навпаки, ідеї також створюють пристрої. Спершу камінь, потім деревина: який матеріал забезпечить дальший прогрес в обробці інформації? Кістка. На початку XVII століття шотландський математик Джон Непер відкрив спосіб замінити множення додаванням. Він вирізав зі слонової кістки палички, зробив на них позначки відповідно до чисел, а потім виконував множення, рухаючи палички одну поряд з одною й зіставляючи позначки, що відповідають двом числам. Загальна довжина двох паличок давала добуток двох чисел. Так народилася логарифмічна лінійка.

На початку XIX століття один дивакуватий британець на ім'я Чарльз Беббідж запропонував створювати комп'ютери з металу. «Різницева машина» Беббіджа, призначенням якої було розраховувати численні тригонометричні та логарифмічні таблиці, повинна була мати в основі шестерні й вали, подібно до парової машини. Кожна шестерня передавала б інформацію своїм розташуванням, і машина обробляла б ту інформацію, поєднуючи шестерні та обертаючи їх. Хоча за своєю конструкцією машина Беббіджа була повністю механічною, її спосіб організовувати інформацію став передвісником способу структурування інформації сучасними електронними комп'ютерами. Її було створено з центральним блоком обробки даних та запам'ятовувальним пристроєм, що міг містити і програму, і дані.

Незважаючи на щедру фінансову підтримку від британської корони, план Беббіджа з конструювання різницевої машини зазнав краху. Технології початку XIX століття не давали ні достатньої точності методів обробки, ні достатньо твердих сплавів для конструювання шестерень та валів. (Спроба, проте, не минула даремно: розробка

техніками Беббіджа більш точних методів обробки та твердіших сплавів значно прискорила промислову революцію, що тоді розгорталася.) Хоча дієві механічні калькулятори були доступні наприкінці XIX століття, великомасштабним робочим комп'ютерам довелося очікувати на технологію електронної схеми початку XX століття.

До 1940 року серед різноманітних груп виникло міжнародне змагання з побудови комп'ютерів із використанням електронних перемикачів, таких як електровакуумна трубка або електромеханічні реле. Перший простий електронний комп'ютер був сконструйований Конрадом Цузе в Німеччині у 1941 році, що, своєю чергою, підштовхнуло появу комп'ютерів у Сполучених Штатах Америки та Великій Британії пізніше в 1940-х роках. Вони мали розмір кількох кімнат з електровакуумними трубками, перемикальними схемами та блоками електропостачання, але за обчислювальною потужністю були слабкими – їхня потужність була в мільйони разів менша, ніж у комп'ютера, на якому зараз пишеться ця книжка.

Перші електронні комп'ютери хоч і коштували недешево, проте були достатньо широковживаними, тож були спроби вдосконалити їх. У 1960-х роках електровакуумні трубки та електромеханічні реле замінено на транзистори – напівпровідникові перемикальні схеми, що були меншими, надійнішими й потребували менше енергії. Напівпровідник – це матеріал, наприклад кремній, що проводить електроенергію краще, ніж непровідники, такі як скло або гума, але гірше за такий провідник, як мідь.

Від кінця 1960-х років транзистори стали меншими: їх гравіювали на інтегральних схемах на кремнієвій основі, що містили всі складники, необхідні для обробки інформації на напівпровідниковій схемі.

З 1960-х років досягнення у фотолітографії – науці проектування дедалі складніших схем – зменшували вдвічі розміри складників інтегральних схем приблизно кожних півтора року. У результаті потужність комп'ютерів подвоювалася з такою самою швидкістю – явище, відоме як закон Мура. У наші дні проводи в інтегральних схемах у пересічних комп'ютерах мають ширину лише 1000 атомів.

Дозвольте мені визначити для деяких видів комп'ютерів терміни, які я використовуватиму. Цифровий комп'ютер – це комп'ютер, що працює завдяки застосуванню логічних схем бітів; цифровий комп'ютер може бути електронним або механічним. Класичний комп'ютер – це комп'ютер, що обчислює завдяки використанню законів класичної механіки. Класичний цифровий комп'ютер – це той, що працює, виконуючи класичні логічні операції на класичних бітах. Електронний комп'ютер – це той, що обчислює, використовуючи електронні пристрої, такі як електровакуумні трубки або транзистори. Цифровий електронний комп'ютер – то цифровий комп'ютер, що працює в електронному режимі. Аналоговий комп'ютер – це той, що працює на тривалих сигналах на противагу бітам; його так називали, бо зазвичай такий комп'ютер використовується для конструювання обчислювального «аналога» фізичної системи. Аналогові комп'ютери можуть бути

електронними або механічними. Квантовий комп'ютер – це той, що працює, використовуючи закони квантової механіки. Квантові комп'ютери мають властивості як цифрові, так і аналогові.

Логічні схеми

Що ж роблять іще потужніші комп'ютери? Вони обробляють інформацію, розбиваючи її на біти й використовуючи ті біти по кілька за один раз. Як зазначено вище, інформація, що має бути оброблена, наявна в комп'ютері у формі програми – серії інструкцій комп'ютерною мовою. Програма закодована в пам'ять комп'ютера як послідовність бітів. Наприклад, команда ДРУКУВАТИ (PRINT) пишеться в коді ASCII як P = 1010000, R = 1010010, I = 1001001, N = 1001110, T = 1010100. Комп'ютер зчитує програму по кілька бітів за раз, інтерпретує біти як інструкцію і виконує її. Потім він дивиться наступні кілька бітів і виконує їхню інструкцію. І так далі. Складні процедури можуть бути побудовані з серій простих інструкцій, але це не межа.

Звичайні комп'ютери складаються переважно з електронних схем, що фізично втілюють логічні схеми. Логічні схеми забезпечують логічне вираження, побудоване на простих операціях, що мають справу з кількома бітами за один раз. З точки зору фізики, логічні схеми складаються з бітів, сполучень та елементів. Біти, як бачимо, можуть передавати або 0, або 1; сполучення переміщують біти з одного місця в інше; елементи трансформують один або два біти за один раз.

Наприклад, елемент НЕ бере вхідний біт і змінює його, тобто НЕ перетворює 0 на 1, а 1 – на 0. Елемент КОПІЮВАТИ робить копію біта: він перетворює вхідний біт 0 на два вихідні біти 00, а вхідний біт 1 – на два вихідні біти 11. Елемент І бере два вхідні біти й утворює один-єдиний вихідний біт, що дорівнює 1, якщо і тільки якщо обидва вхідні біти дорівнюють 1, інакше він утворить вихідний 0. Елемент АБО бере два вхідні біти й утворює вихідний біт, що дорівнює 1, якщо один або обидва біти дорівнюють 1; якщо обидва вхідні біти дорівнюють 0, тоді він утворює вихідний 0. Від часу, як логік Джордж Буль, викладач Королівського коледжу в місті Корк, опублікував своє «Дослідження законів думки» у 1854 році, ми знаємо, що будь-який логічний вираз, зокрема й складні математичні розрахунки, може ґрунтуватися на складниках НЕ, КОПІЮВАТИ, І й АБО. Вони складають універсальний набір логічних елементів.

У «Законах думки» Буля йдеться про те, що будь-який логічний вираз або обчислення можуть бути закодовані як логічна схема. Цифровий комп'ютер – це комп'ютер, що працює, застосовуючи велику логічну схему, що складається з мільйонів логічних елементів. Персональний комп'ютер – це електронне втілення цифрової машини.

В електронному комп'ютері біти реєструються такими електронними пристроями, як конденсатори. Конденсатор – це щось на кшталт відра, в якому містяться електрони. Щоб наповнити відро, до конденсатора підводять напругу. Конденсатор за нульової напруги не має зайвих електронів і вважається незарядженим. Незаряджений конденсатор у комп'ютері передає 0. Конденсатор за ненульової напруги містить певну кількість надлишкових електронів і передає 1.

Конденсатори – це не просто електронні пристрої, що використовуються комп'ютерами для зберігання інформації. На жорсткому диску вашого комп'ютера біти реєструються мікроскопічними магнітами; магніт, північний полюс якого напрямлений угору, означає 0, а той, чий північний полюс напрямлений униз, означає 1. Як завжди, будь-який пристрій, що має два визначальні стани, здатний передавати біт.

У звичайному цифровому електронному комп'ютері логічні схеми застосовуються в транзисторах. Транзистор може вважатися перемикачем. Коли перемикач відкритий, струм не може проходити по ньому. Коли ж перемикач закритий, струм проходить крізь нього. Транзистор має два входи та один вихід. У транзисторі n-типу, коли перший вхід утримується за низької напруги, перемикач увімкнений і струм не може проходити крізь другий вхід до виходу; підвищення напруги на першому вході дає можливість струмові проходити. У транзисторі p-типу, коли перший вхід утримується за низької напруги, перемикач вимкнено, тож струм може проходити з другого входу до виходу. Транзистори n- та p-типів можуть бути з'єднані разом для утворення елементів І, АБО, НЕ та КОПІЮВАТИ.

Коли комп'ютер обчислює, він просто застосовує логічні елементи до бітів. Комп'ютерні ігри, обробка слів, обробка великих обсягів числових даних та спаму – усе походить із електронної трансформації бітів, одного чи двох за раз.

Необчислюваність

До цього моменту ми робили акцент на глибинній простоті інформації та обчислення. Біт –

це проста річ, комп'ютер – це проста машина. Але це не означає, що комп'ютери не здатні функціонувати у складному режимі. Парадоксальний результат операції комп'ютера – нібито в суті своїй логічної – полягає в тому, що його майбутня поведінка непередбачувана. Єдиний спосіб дізнатися, що робитиме комп'ютер, почавши обчислення, – чекати й дивитися, що відбувається.

У 1930-х роках австрійський логік Курт Гедель показав, що будь-яка достатньо потужна математична теорія містить формулювання, котрі, якщо вони помилкові, зроблять її суперечливою, але це не може довести її хибність. Усі досить потужні системи логіки містять недоведені формулювання. Обчислювальним аналогом недоведеного формулювання є необчислювана кількість.

Загальновідома проблема, чия відповідь є необчислюваною, – це так звана проблема зупинення. Запрограмуйте комп'ютер. Запустіть його в роботу. Чи комп'ютер коли-небудь зупиниться і дасть результат? Чи він працюватиме вічно? Загальноприйнятої процедури вирахування відповіді на це питання немає. Інакше кажучи, жодна комп'ютерна програма не може прийняти як вхідні дані іншу комп'ютерну програму та визначити зі 100-відсотковою ймовірністю, чи зупиняється перша комп'ютерна програма, чи ні.

Звісно, щодо багатьох програм ви можете сказати, чи зупиниться комп'ютер. Наприклад, програма «print 1 000 000 000»: комп'ютер, якому задано цю програму, друкує «1 000 000 000» і зупиняється. Але, як правило, хоч як довго комп'ютер робить обчислення без зупинки, ви не можете певно сказати, що він ніколи не зупиниться.

Хоча це може звучати затеоретизовано, проблема зупинення має багато практичних наслідків. Візьмімо, наприклад, усунення «багів» комп'ютера. Більшість комп'ютерних програм містять дефекти, помилки, «баги», через які комп'ютер поводить себе неочікувано, наприклад, ламається. Було б корисно мати «універсальний усувач дефектів» для комп'ютерних програм. Такий усувач брав би як вхідні дані комп'ютерну програму разом з описом того, що програма повинна здійснити, і потім пересвідчувався б, що програма робить належно. Такий усувач неможливий.

Універсальний усувач повинен підтвердити, що його вхідна програма дає правильний результат. Тож перше, що універсальний усувач дефектів має перевірити, – чи ця вхідна програма має взагалі якийсь результат. Але щоб підтвердити, що програма дає результат, універсальний усувач дефектів повинен розв'язати проблему зупинення. Тобто те, чого він зробити не може. Єдиний спосіб визначити, чи програма зупиниться, – це запустити її й побачити, та в цей момент нам уже не потрібен універсальний усувач дефектів. Тож наступного разу, коли «баг» змушує ваш комп'ютер зависати, ви можете знайти відряду в глибокій математичній істині: системного способу усунути всі дефекти не існує. Або ви можете просто вилаятися і перезавантажити.

Гедель показав, що самопосилання призводить до парадоксів у логіці, а британський

математик Алан Тьюрінг – що воно ж призводить до необчислюваності в комп'ютерах. З'являється спокуса побачити аналогічні парадокси в тому, як функціонують люди. Усе-таки люди є майстрами самопосилань (деякі, схоже, не здатні до інших форм посилань) і однозначно піддаються дії парадоксу.

Люди відомі своєю нездатністю передбачати власні майбутні дії. Це важлива особливість того, що ми називаємо свободою волі. «Свобода волі» означає нашу очевидну свободу вирішувати. Наприклад, коли я сідаю в ресторані й дивлюся в меню, я і тільки я вирішую, що замовлю; і до того, як я вирішу, навіть я не знаю, яким буде мій вибір. Іншими словами, наші власні майбутні вибори є загадкою для нас самих. (Вони можуть, звісно, не бути загадкою для інших. Упродовж років ми з дружиною ходили обідати в ресторан «Джозі» в Санта-Фе. Довго й ретельно досліджуючи меню, я завжди замовляю півтарілки фаршированого перцю релено, з червоним та зеленим перцем чилі й посоле замість рису. У мене було сильне відчуття того, що я практикував свободу волі: доки я не обирав півтарілки чилі релено, я відчував, що можливе будь-що. Проте моя дружина весь час точно знала, що я замовлю!)

Загадковий характер наших виборів, коли ми практикуємо свободу волі, – це близький аналог проблеми зупинення: ми сідаємо в поїзд нашої думки, він рушає, але нам невідомо, куди він нас привезе. Навіть якщо він нас привозить кудись, ми не знаємо куди, доки не прибудемо.

Іронія полягає в тому, що звичною справою є списати непередбачувану поведінку нас самих та інших людей на ірраціональність: якщо ми будемо поводитися раціонально, міркуємо ми, світ буде більш передбачуваним. Насправді ж лише тоді, коли ми поведимося раціонально й рухаємося логічно, як комп'ютер, крок за кроком, – наша поведінка стає доказово непередбачуваною. Раціональність поєднується з самопосиланням, щоб зробити наші дії парадоксальними й сумнівними.

Ця прекрасна загадковість чистого логічного міркування повертає нас до питання про роль логіки у Всесвіті. Розмірковуючи у своєму домі в Кордові про праці Аристотеля, ісламський філософ XII століття Аверроес (Ібн-Рушд) дійшов висновку, що безсмертною в людях є не душа, а здатність до логічного міркування. Логічне міркування безсмертне саме тому, що воно не стосується конкретної особи – насправді воно є спільним надбанням усіх осіб.

Комп'ютери, безумовно, володіють здатністю до логічного міркування та самопосилання. І якраз тому, що вони мають ці здібності, їхні дії за своєю природою загадкові. Тож не дивно, що в міру того, як вони стають потужнішими та виконують різноманітніші завдання, комп'ютери виявляють непередбачуваність, таку, як у людей. Насправді, за Аверроесом, вони володіють безсмертям тією ж мірою, що й люди.

Програмування комп'ютерів на виконання простих людських завдань є важким: запрограмувати робота, щоб пропилювати кімнату або помити посуд, навіть

із мінімальними вимогами до якості результату, – це проблема, над якою ламають голови кілька поколінь дослідників у галузі штучного інтелекту. Зате щоб запрограмувати комп'ютер на непередбачувану поведінку, яка нас роздратує, особливі зусилля не потрібні. З кожним днем комп'ютери стають дедалі більш схожими на людей, коли справа доходить до їхньої здатності все псувати[5 - Як на наклейці на бампері: «Помилятися властиво людині. Та щоб усерйоз усе зіпсувати, потрібен комп'ютер». (Прим. авт.)].

Розділ 3. Всесвіт-обчислювач

Історія Всесвіту: частина перша

Всесвіт складається з атомів та елементарних частинок, таких як електрони, кварки й нейтрино. Хоча ми незабаром заглибимось у бачення Всесвіту на основі комп'ютерної моделі, було б неправильним з нашого боку не дослідити спочатку приголомшливі відкриття космології та фізики елементарних частинок. Наука вже дає нам виняткові шляхи описування Всесвіту крізь призму фізики, хімії та біології. Всесвіт-обчислювач не є альтернативою фізичному Всесвітові. Всесвіт, що еволюціонує, обробляючи інформацію, і Всесвіт, що еволюціонує за законами фізики, – той самий. Два описи, обчислювальний та фізичний, – це взаємодоповняльні способи опису одного і того ж явища.

Звісно, люди робили припущення про походження Всесвіту задовго до появи сучасної науки. Розповідання казок про Всесвіт настільки ж старе, як і саме розповідання казок. За скандинавською міфологією, Всесвіт виник тоді, коли корова вилизувала соляні брили поля першопочатку. Згідно з японською міфологією, Японія виникла з кровозмісних обіймів богів – брата і сестри Ідзанагі та Ідзанами. В одному індійському міфі про створення світу всі створіння постали з очищеного масла, отриманого з жертви тисячоголового Пуруші. Водночас протягом останнього століття астрофізики й космологи сконструювали докладну історію Всесвіту на основі даних спостережень.

Всесвіт виник трохи менш ніж 14 мільярдів років тому у величезному спалахові під назвою Великий вибух. У міру розширення та охолодження різноманітні форми матерії згущувалися з космічного туману. Через три хвилини після Великого вибуху сформувалися будівельні елементи для таких простих атомів, як водень та гелій. Ці елементи скупчувалися під впливом гравітації, щоб сформувати перші зорі та галактики через 200 мільйонів років після Великого вибуху. Важчі елементи, такі як залізо, утворилися, коли ці ранні зорі вибухнули в наднові. Наше власне Сонце та Сонячна система сформувалися 5 мільярдів років тому, а життя на Землі почалося трохи більш як за мільярд років після

того.

Ця традиційна історія Всесвіту не така приваблива, як деякі версії, а молочні продукти з'являються в ній лише на останній стадії. Та, на відміну від старіших міфів про створення світу, наукова версія має властивість відповідати відомим науковим законам та спостереженням. І навіть така історія Всесвіту, яка виражена термінами фізики, здатна бути красивою. У ній є місце драмі та невідомості і залишається ще багато питань. Як виникло життя? Чому Всесвіт такий складний? Яким є майбутнє Всесвіту та життя зокрема? Коли ми дивимося на Молочний Шлях, нашу власну галактику, ми бачимо багато зір, подібних до нашої. Коли дивимося поза її межі, ми бачимо багато галактик, схожих на Молочний Шлях. У тому, що ми бачимо, є певний сценарій, у якому ті самі зоряні драми відтворюються знов і знов різними зоряними акторами в різних місцях. Якщо Всесвіт фактично безмежний у розтягненні, тоді десь урешті-решт буде втілено кожен можливий сценарій, дозволений законами фізики. Історія Всесвіту – це щось подібне до космічної мильної опери, чії актори розіграють усі можливі комбінації драми.

Енергія: перший закон термодинаміки

Давайте ознайомимося з провідними акторами в космічній опері. У традиційній космології головним актором є енергія: енергія випромінювання (насамперед енергія світла) та енергія маси в протонах, нейтронах та електронах. Що ж таке енергія? Як ви вже, напевне, дізналися в школі, енергія – це спроможність виконувати роботу. Енергія змушує фізичні системи утворювати речі.

Загальновідомо, що енергія зберігається; вона може набувати різних форм: теплоти, роботи, електроенергії, механічної енергії, – але ніколи не втрачається. Цей факт відомий як перший закон термодинаміки. Але якщо енергія зберігається і якщо Всесвіт виник із нічого, звідки ж тоді взялася вся енергія? Фізика дає пояснення.

Квантова механіка описує енергію в контексті квантових полів – внутрішньої структури Всесвіту, збурення якої утворює елементарні частинки: фотони, електрони, кварки. Енергія навколо нас тоді була виведена з глибинних квантових полів розширенням нашого Всесвіту – у формі Землі, зір, світла, теплоти. Гравітація – це сила тяжіння, що притягує речі одну до одної. У міру того як Всесвіт розширюється (що він і продовжує робити), гравітація висмоктує енергію з квантових полів. Енергія у квантових полях майже завжди додатна, і ця енергія точно збалансовується від'ємною енергією гравітаційного тяжіння. Оскільки розширення триває, все більше й більше додатної енергії стає наявною у вигляді матерії чи світла, що компенсується від'ємною енергією в силі тяжіння гравітаційного поля.

У традиційній історії Всесвіту чимала увага належить енергії. Скільки її там? Де вона? Що робить? І навпаки, в історії Всесвіту, про яку йде оповідь у цій книжці, головним актором у фізичній історії є інформація. Докорінним чином інформація та енергія відіграють

у Всесвіті взаємодоповняльні ролі: енергія змушує фізичні системи створювати речі. Інформація каже їм, що робити.

Ентропія: другий закон термодинаміки

Якби ми могли подивитися на матерію в атомарному масштабі, ми б побачили, як атоми танцюють і коливаються хаотично в різні боки. Енергія, що спонукає до цього хаотичного атомного танцю, називається теплотою, а інформація, що визначає кроки цього танцю, називається ентропією. Простіше кажучи, ентропія – це інформація, необхідна для уточнення хаотичних рухів атомів та молекул – рухів, надто малих, щоб ми їх побачили. Ентропія – це інформація, що міститься у фізичній системі, невидимій для нас.

Ентропія – це засіб вимірювання ступеня молекулярного безладу, що існує в системі: вона визначає, скільки теплової енергії недоступно для перетворення на механічну дію, і, відповідно, яку частину теплової енергії можна використати на практиці. Другий закон термодинаміки стверджує, що повна ентропія Всесвіту не знижується – іншими словами, кількість недоступної для використання енергії збільшується. Прояви другого закону термодинаміки – навколо нас. Гаряча пара рухає турбіну та виконує корисну роботу. Коли ж пара охолоджується, її молекули, коливаючись, передають частину їхнього безладу в безлад у навколишньому повітрі, і воно нагрівається, його ентропія зростає. Молекули пари коливаються дедалі повільніше, а молекули повітря – дедалі швидше, і в результаті пара і повітря набувають однакової температури. Коли різниця температур менша, ентропія системи більша. Але пара, досягнувши кімнатної температури, вже не працюватиме.

Ось іще один спосіб пояснити, що таке ентропія. Інформація здебільшого невидима. Кількість бітів, необхідних для опису танцю атомів, значно переважає кількість бітів, які ми бачимо або знаємо. Розгляньмо фотографію: в ній є природна зернистість, визначена розміром зернят галогену срібла, що утворюють фотоплівку; або, якщо це цифрове фото, – кількістю пікселів, які утворюють цифрове зображення на екрані. Високоякісне цифрове зображення може нести майже мільярд бітів видимої інформації. Як я отримав таку цифру? Одна тисяча пікселів на дюйм – це висока роздільна здатність, близька до роздільної здатності ока. За такої роздільної здатності кожен квадратний дюйм фотографії містить мільйон пікселів. Фото розміром 8 на 6 дюймів із 1000 пікселів на дюйм має 48 мільйонів пікселів. У кожного пікселя свій колір. Цифрові камери зазвичай використовують 24 біти, щоб утворити 16 мільйонів кольорів, – це знов-таки можна порівняти з кількістю, яку може виокремити людське око. Тож кольорова цифрова фотографія 8 на 6 із 1000 пікселів на дюйм і 24 бітами колірної розподільної здатності має 1 152 000 000 бітів інформації. (Простіший спосіб дізнатися, скільки бітів необхідно для фотографії, – подивитися, як швидко простір пам'яті у вашій цифровій фотокамері зникає, коли ви фотографуєте. Типова цифрова камера робить фотографії з високою роздільною здатністю на 3 мільйони байтів – 3 мегабайти – інформації. Байт – це 8 бітів, тож кожне

фото в цифровій фотокамері має приблизно 24 мільйони бітів.)

1 152 000 000 бітів – це дуже багато інформації, але кількість інформації, необхідна для опису невидимих коливань атомів у зернах галоїду срібла нецифрової фотографії, значно більша. Щоб описати їх, знадобиться понад мільйон мільярдів мільярдів бітів (10

, або 1 із 24 нулями). Невидимі атоми, коливаючись, містять набагато більше інформації, ніж видима фотографія, яку вони утворюють. Фотографія, яка передає ту саму кількість видимої інформації, що й невидима інформація в грамі атомів, має бути розміру штату Мен.

Кількість бітів, що містяться в коливних атомах, які утворюють зображення на фотоплівці, можна підрахувати так. Розмір зернини галоїду срібла – приблизно одна мільйонна метра, і в ній близько трильйона атомів. На фотографічній плівці є десятки мільярдів зернят галоїду срібла. Опис того, де перебуває окремий атом (за кімнатної температури) у своєму безмежно малому танці, вимагає від 10 до 20 бітів. Загальна кількість інформації, яку містять атоми у фотографії, таким чином, становить 10

бітів. Мільярд (10

) бітів інформації, видимої на цифровому фото, – це лише крихітна частка цієї загальної кількості. Решта інформації, що міститься в матерії фотографії, невидима. Ця невидима інформація і є ентропією атомів.

Вільна енергія

Закони термодинаміки є путівником у взаємодії між нашими двома діячами – енергією та інформацією. Щоб продемонструвати інший приклад першого та другого законів, надкусимо яблуко. Цукри в яблуку містять те, що зветься вільною енергією. Вільна енергія – це енергія у формі вищого порядку, яка асоціюється з відносно низькою ентропією. У випадку яблука енергія в цукрі зберігається не в хаотичному коливанні атомів, а в упорядкованих хімічних зв'язках, що тримають цукор разом. Потрібно значно менше інформації, щоб описати форму, якої енергія набуває в мільярдах упорядкованих хімічних зв'язків, ніж для того, щоб описати ту саму кількість енергії, яка міститься в тих же атомах, які хаотично рухаються. Відносно мала кількість інформації, необхідної для опису енергії хімічних зв'язків, робить її доступною для використання – саме тому вона й називається вільною.

Візьміть яблуко, надкусіть його. Ви проковтнули вільну енергію. Ваша травна система

містить хімічні реагенти – ензими, що перетворюють цукри яблука на глюкозу – форму цукру, яку можуть негайно використати ваші м'язи. Кожен грам глюкози містить кілька кілокалорій вільної енергії. Коли у вас перетравився цукор, ви можете пробігти кілька миль на кількох сотнях кілокалорій. (Калорія – це кількість енергії, необхідної для нагрівання одного грама води на один градус Цельсія. Кілокалорія, тобто 1000 калорій, – це те, що ми в побуті зазвичай називаємо «калоріями»: чайна ложка цукру містить десять кілокалорій вільної енергії. Сто кілокалорій – це енергія, якої достатньо для підняття авто «фольксваген жук» на висоту тридцять метрів у повітря!) Поки ви біжите, вільна енергія в цукрі перетворюється на рух ваших м'язів. Коли ви закінчите бігти, ви розігрієтесь: вільна енергія в цукрі перетвориться на теплоту й роботу. Кількість калорій теплоти й роботи точно збігається з калоріями вільної енергії в цукрі яблука. Згідно з першим законом термодинаміки, загальна кількість енергії лишається незмінною. (За другим законом, кількість інформації, необхідної для опису додаткового коливання молекул у ваших розігрітих м'язах та спітнілій шкірі, значно більша, ніж кількість інформації, необхідної для опису впорядкованих хімічних зв'язків у цукрі яблука.)

На жаль, розвернути цей процес не так просто. Якби ви хотіли перетворити енергію теплоти, де багато невидимої інформації (або ентропії), назад в енергію хімічних зв'язків, де ентропія значно менша, вам би довелося щось робити з цією надлишковою інформацією. Як ми ще будемо розглядати, проблема пошуку місця для надлишкових бітів у теплоті накладає фундаментальні обмеження на те, як здатні функціонувати машини, люди, мізки, ДНК та комп'ютери.

Проте в кожному разі ясно, що енергія та інформація (видима і невидима) – це два головні актори у всесвітній драмі. Всесвіт, який ми бачимо, походить із взаємодії між цими двома величинами, взаємодії, що керована першим та другим законами термодинаміки. Енергія зберігається. Інформація ніколи не зменшується. Енергія потрібна для того, щоб фізична система еволюціонувала з одного стану до іншого. Тобто енергія потрібна для обробки інформації. Чим більше енергії, яку можна застосовувати, тим швидше фізична трансформація відбувається і тим швидше інформація обробляється. Максимальна швидкість, за якої фізична система може обробляти інформацію, пропорційна її енергії. Чим більше енергії, тим швидше біти перевертаються. Земля, повітря, вогонь і вода – все зроблене з енергії, але різні форми, яких воно набуває, визначаються інформацією. Щоб зробити будь-що, потрібна енергія. Щоб уточнити, що зроблено, потрібна інформація. Енергія та інформація за природою (даруйте мимовільний каламбур) тісно пов'язані.

Історія Всесвіту: частина друга

Тепер, коли наші герої роману представлені, розповімо історію Всесвіту у світлі їхньої взаємодії. Саме ця взаємодія, перетягування каната між інформацією та енергією, і змушує Всесвіт обчислювати.

За останнє століття прогрес у конструюванні телескопів дав можливість точніше, ніж будь-коли, спостерігати за Всесвітом поза межами нашої Сонячної системи. Минуле десятиліття особливо визначне в плані спостережень за небосхилом. Наземні телескопи та супутникові обсерваторії накопичили велику кількість даних, що описують, який вигляд Всесвіт має зараз, а також який вигляд він мав у минулому. (Оскільки швидкість світла є скінченною, то, коли ви дивитесь на галактику, яка за мільярди світлових років, ви бачите зображення мільярдорічної давнини.) Отака історичність спостережень за космосом є корисною, коли ми намагаємося розплутати первісну історію Всесвіту.

Всесвіт виник лише трохи менш як 14 мільярдів років тому в гігантському вибуху. Що ж відбувалося до Великого вибуху? Нічого[6 - У деяких космологічних теоріях вважається, що Всесвіт існує вічно, а Великий вибух настав після Великого стиснення. У цих моделях наш Всесвіт розширюватиметься, а потім знов увійде у фазу Великого стиснення, за яким настане черговий Великий вибух і так далі. Хоча такі моделі Всесвіту узгоджуються із законами фізики, на сьогодні вони не вважаються найбільш коректними. (Прим. авт.)]. Не було ні часу, ні простору. Не порожній простір, а відсутність простору. Сам час мав початок. Немає нічого поганого в початку з нічого. Наприклад, додатні числа починаються з нуля («порожнє місце»). Перед нулем немає додатних чисел. До Великого вибуху не було нічого – ні енергії, ні бітів.

Потім ні з того ні з сього виник Всесвіт. Виник час, і разом з ним – космос. Новонароджений Всесвіт був простим, початкова мішанина квантових полів містила небагато інформації та енергії. Щонайбільше це вимагало кількох бітів для опису. Фактично, якщо, як домислюють деякі фізичні теорії, був лиш один можливий початковий стан Всесвіту і лиш одна самоузгоджена система фізичних законів, то початковий стан не потребував бітів інформації для опису. Пригадаймо, що для накопичення інформації повинні бути альтернативи, наприклад: 0 або 1, так або ні, цей чи той. Якщо не було альтернатив початковому стану Всесвіту, то для його опису потрібен нуль бітів, і він ніс нуль бітів інформації. Ця початкова нечисленність інформації відповідає точці зору про те, що Всесвіт виник із нічого.

Зате, щойно Всесвіт виник, він почав розширюватись. У міру розширення він витягав дедалі більше енергії з глибинної квантової структури часу та простору. Сучасні фізичні теорії припускають, що кількість енергії в ранньому Всесвіті росла дуже швидко (відбувався процес «космологічної інфляції» – «роздування»), а от кількість інформації – повільніше. Ранній Всесвіт залишався простим і впорядкованим, його можна було б описати лише кількома бітами інформації. Енергія, що була створена, була вільною енергією.

Проте ця нечисленність інформації тривала недовго. В подальшому процесі розширення після закінчення стадії «космологічної інфляції» вільна енергія, накопичена в квантових полях, почала перетворюватися в тепло, збільшуючи ентропію та створюючи всі існуючі види елементарних частинок. Ці частинки були гарячими: вони дуже сильно коливалися.

Щоб описати ці коливання, потрібно багато інформації. Після того як вік Всесвіту становив одну мільярдну частку секунди (кількість часу, потрібна світлові для подолання метра) минула, кількість інформації, що містилась у Всесвіті, була порядку 100 тисяч мільярдів мільярдів мільярдів мільярдів мільярдів (10

) бітів. Це приблизно один біт на кожен атом, що утворює Землю. Щоб зберігати стільки інформації візуально, потрібна була б фотографія завбільшки з Молочний Шлях. Великий вибух також був інформаційним вибухом.

Оскільки енергія у Всесвіті змінювала форму, Всесвіт також обробляв і трансформував свої біти, заповнюючи свій «реєстр пам'яті» результатами цієї обробки інформації. Після цієї мільярдної частки секунди Всесвіт виконав приблизно 10000 мільярдів мільярдів мільярдів мільярдів мільярдів мільярдів (10

) елементарних операцій, або «опів», на бітах, які він передавав. Багато що відбулось. Але що ж Всесвіт обчислював під час цієї початкової мільярдної частки секунди?

Письменники-фантасти припустили, що впродовж цього часу, значно коротшого за мить, могли виникати і зникати повністю цивілізації. У нас немає доказу існування цієї публіки, що жила так швидко. Найімовірніше, ці ранні «опи» склалися з елементарних частинок, що хаотично відскакували одна від одної.

Після цієї мільярдної частки секунди Всесвіт був дуже гарячий. Майже вся енергія, втягнута в нього, тепер мала форму теплоти. Для опису безмежно малих коливань елементарних частинок у цьому стані було необхідно дуже багато інформації. Узагалі, коли вся матерія має однакову температуру, ентропія сягає максимуму. У цей період вільної енергії, тобто порядку, було дуже мало, що робило миті після Великого вибуху шкідливим часом для процесів, подібних до життя. Життя потребує вільної енергії. Навіть якби там була якась форма життя, що могла б витримати високі температури Великого вибуху, то тій формі життя нічого було б істи.

У міру того як Всесвіт розширювався, він охолоджувався. Елементарні частинки коливалися повільніше. Хоча кількість інформації, необхідної для опису їхніх коливань, залишалася майже такою самою, вона поступово підвищувалася впродовж тривалого часу. Могло б здатися, що повільніші коливання потребують менше інформації для опису, і це так: менша кількість бітів необхідна для описування їхніх швидкостей. Але разом із тим кількість простору, в якому вони коливалися, більшала, потребуючи більше бітів для опису їхніх розташувань. Через це загальна кількість інформації залишалася сталою або підвищувалася згідно з другим законом термодинаміки.

Коливання уповільнювались, а біти й частинки космічного «супу» почали згущуватись. Це згущення породило деякі зі знайомих форм матерії, які ми бачимо сьогодні. Коли ж

кількість енергії в типовому коливанні стала меншою, ніж кількість енергії, необхідної для утримування разом деяких форм складної частинки, наприклад протона, ті частинки сформувалися. Інакше кажучи, щойно коливання складників, таких як кварки у протоні, більше не були достатньо енергійними для окремого існування цих складників, вони з'єднувалися до купи як одна частинка, яка «конденсувалась» із космічного «супу». Щоразу, коли конденсувався новий інгредієнт «супу», відбувалося підвищення ентропії – нова інформація вписувалася до космічної «кулінарної книги».

Частинки згущувались у «супі» в порядку енергії, необхідної, щоб з'єднати їх разом. Протони та нейтрони – частинки, що утворили ядра атомів, – згустилися за трохи менш ніж одну мільйонну частку секунди після Великого вибуху, коли температура була приблизно 10 мільйонів мільйонів градусів Цельсія. Атомні ядра почали формуватися через секунду, приблизно за мільярда градусів. Через три хвилини згустились ядра легких атомів: гідрогену, гелію, дейтерію, літію, берилію та бору. Проте електрони все ще кружляли надто швидко, щоб ядра могли «вхопити» їх. Через триста вісімдесят тисяч років після Великого вибуху, коли температура Всесвіту опустилася до трохи менше ніж 10000 градусів Цельсія, електрони врешті достатньо охолонули, щоб їх можливо було «вхопити», і сформувалися стійкі атоми.

Порядок з хаосу (ефект метелика)

До утворення атомів майже вся інформація у Всесвіті була на рівні елементарних частинок. Майже всі біти були записані позиціями та швидкостями протонів, електронів тощо. У більшому масштабі Всесвіт ще містив дуже мало інформації: він не мав характерних рис і був однорідним. (Наскільки однорідним? Уявіть поверхню озера в безвітряний ранок настільки спокійною, що відображення дерев неможливо відрізнити від самих дерев. Уявіть, що земля не має гір, вищих за кротову купку. Ранній Всесвіт був ще більш однорідним.)

Сьогодні ж, навпаки, телескопи виявляють у Всесвіті величезні різновиди та неоднорідності. Матерія концентрується, утворюючи планети, такі як Земля, та зорі, такі як Сонце. Планети й сонця скупчуються, утворюючи сонячні системи. Наша Сонячна система разом із мільярдами інших утворює галактику – Молочний Шлях.

Молочний Шлях є лише одним із десятків галактик у скупченні галактик, а наше скупчення галактик є лише одним скупченням у надскупченні. Ця ієрархія скупчень матерії, відокремлених космічними порожнинами, утворює великомасштабну структуру Всесвіту.

Як же ця великомасштабна структура виникла? Звідки взяли біти інформації? Ці біти ведуть своє походження з дуже раннього Всесвіту, який ми щойно дослідили. Їхнє походження можна пояснити законами квантової механіки в поєднанні з законами гравітації.

Квантова механіка – це теорія, що описує, як поведуться матерія та енергія на їхніх фундаментальних рівнях. У малих масштабах квантова механіка описує поведінку молекул, атомів та елементарних частинок. У більших масштабах – описує вашу та мою поведінку. У ще більших – поведінку Всесвіту як єдиного цілого. Закони квантової механіки відповідальні за виникнення у Всесвіті деталей та структур.

Теорія квантової механіки дає початок великомасштабній структурі через її, по суті, теоретико-ймовірнісну природу. Хоча це й може здатися парадоксальним, квантова механіка виробляє деталь та структуру, оскільки остання за своїм характером мінлива.

Ранній Всесвіт був однорідним: густина енергії всюди була майже однакою. Але вона була не точно однакою. У квантовій механіці величини, такі як положення, швидкість і густина енергії, не мають точних значень. Їхні значення варіюються, відбуваються флуктуації. Ми можемо описати їхні можливі значення, найімовірніше місце перебування частинки, наприклад, але не можемо претендувати на абсолютну певність. Через ці квантові флуктуації деякі райони раннього Всесвіту були ледь-ледь густішими, ніж інші райони.

З часом сила гравітації змусила більше матерії рухатись у напрямку до цих густіших районів, надалі підвищуючи їхню енергетичну густину та зменшуючи густину довколишнього простору. Гравітація, таким чином, посилила ефект початкової крихітної невідповідності, спричиняючи її зростання. Саме така крихітна квантова флуктуація біля початку часу і сформувала насіння того, що з часом перетворилося на скупчення галактик. Трохи пізніше подальші флуктуації сформували насіння для розташувань окремих галактик у скупченні, а ще пізніше флуктуації дали насіння для розташувань планет і зір.

У процесі створення цієї великомасштабної структури гравітація також створила вільну енергію, що необхідна істотам для виживання. У міру того як матерія скупчувалася в одне, вона рухалася дедалі швидше, отримуючи енергію з гравітаційного поля, тобто матерія розігрівалася. Чим більшим ставало скупчення, тим гарячішою – матерія. Якщо нагромаджувалося достатньо матерії, температура в центрі зростала до точки, за якої спалахували термоядерні реакції: починала сяяти зоря! Світло отримує від неї багато вільної енергії – тієї, яку, наприклад, рослини використовуватимуть для фотосинтезу. Тоді, коли виникнуть.

Здатність гравітації розширювати невеликі флуктуації в згущення – це відображення фізичного явища, відомого як хаос. У хаотичній системі те, що починається як крихітна різниця, збільшується в часі. Можливо, найвідомішим прикладом хаосу є так званий ефект метелика. Рівняння руху в межах атмосфери Землі у своїй суті є хаотичними, тому крихітне збурення, таке як помах крил метелика, може збільшуватись у часі та відстані, перетворюючись на масштабний ураган згодом. Мікроскопічні квантові флуктуації густини потоку енергії на час Великого вибуху – це ефекти «метелика», що прилітає і створює великомасштабну структуру Всесвіту.

Кожна галактика, зоря та планета мають свою масу та розташування відносно квантових випадковостей раннього Всесвіту. Але це ще не все – ті випадковості є також джерелом дрібних деталей Всесвіту. Шанс є визначальним складником мови природи. Кожне падіння квантового грального кубика вводить ще трохи бітів деталей у світ. У міру того як ці деталі нагромаджуються, вони формують насіння для всього розмаїття Всесвіту. Кожне дерево, гілка, листок, клітина та спіраль ДНК мають власну особливу форму деяких минулих підкидань квантового грального кубика. Без законів квантової механіки Всесвіт був би безликим і порожнім. Азартна гра на гроші, можливо, є породженням пекла, але підкидання квантового кубика – божественні.

Універсальний комп'ютер

Ми вже зрозуміли, що Всесвіт обчислює, записуючи і трансформуючи інформацію, тож те, що бачимо навколо, можна назвати універсальним комп'ютером. Але в цієї назви є ще одне, більш технічне значення. В інформатиці універсальний комп'ютер – це пристрій, що може бути запрограмований на обробку бітів інформації будь-яким бажаним способом. Класичні цифрові комп'ютери такого типу, як той, на якому пишеться ця книжка, є універсальними комп'ютерами, а їхні мови – це універсальні мови. Люди здатні проводити універсальні обчислення, а людські мови – універсальні. Більшість систем, які можуть бути запрограмовані на виконання довільних довгих послідовностей простих трансформацій інформації, є універсальними.

Універсальні комп'ютери можуть робити з інформацією буквально будь-що. Два винахідники універсальних комп'ютерів та універсальних мов, Алонсо Черч і Алан Тьюрінг, висунули гіпотезу, що будь-яка математична маніпуляція може бути виконана на універсальному комп'ютері, іншими словами, універсальні комп'ютери можуть генерувати математичні приклади будь-якого рівня складності. Проте сам універсальний комп'ютер має бути нескладною машиною, він повинен бути здатним лише брати біти, один чи два за раз, і виконувати з ними нескладні операції. Будь-яка бажана трансформація з будь-яким великим набором бітів може бути запущена періодичним виконанням операцій на лише одному або двох бітах за раз. І будь-яка машина, що може запустити цю послідовність простих логічних операцій, – це і є універсальний комп'ютер.

Відзначимо, що універсальні комп'ютери можуть бути запрограмовані трансформувати інформацію в будь-який бажаний спосіб, і будь-який універсальний комп'ютер може бути запрограмований трансформувати інформацію способом, аналогічним до того, що й інший універсальний комп'ютер. Іншими словами, будь-який універсальний комп'ютер здатний моделювати інший, і навпаки. Ця взаємомодельованість означає, що всі універсальні комп'ютери можуть виконувати ті самі завдання. Ця характерна особливість обчислювальності універсальності відома: якщо програма працюватиме на РС, її однозначно можна перекласти, щоб вона працювала й на «Макінтоші».

Звісно, програмі може знадобитися більше часу, щоб працювати на «Макінтоші», ніж на РС, або навпаки. Програми, написані для конкретного універсального комп'ютера, мають тенденцію працювати на тому комп'ютері швидше, ніж перекладені програми, створені для іншої машини. Але перекладена програма все ж таки працюватиме. У реальності кожен універсальний комп'ютер може не лише змодельовати інший універсальний комп'ютер, але й зробити це ефективно. Уповільнення через переклад є відносно незначним.

Цифровий чи квантовий?

Всесвіт обчислює. Його комп'ютерна мова складається з законів фізики та їхніх хімічних і біологічних наслідків. То чи можна вважати Всесвіт не чим іншим, як цифровим універсальним комп'ютером у тому розумінні, яке технічно висвітлили Черч і Тьюрінг? Дати точну наукову відповідь на це питання можливо. Ця відповідь – ні.

Гіпотеза про те, що Всесвіт може бути, по суті, цифровим комп'ютером, існує вже десятки років. У 1960-х роках Едвард Фредкін, на той час професор МТІ, та Конрад Цузе, який створив перші електронні цифрові комп'ютери в Німеччині на початку 1940-х, висунули припущення, що Всесвіт є цифровим універсальним комп'ютером. (Відносно нещодавно ця гіпотеза знайшла прихильника в особі вченого-програміста Стівена Вольфрама.) Гіпотеза є привабливою: цифрові системи прості, але все-таки здатні відтворювати поведінку будь-якого рівня складності. Зокрема, комп'ютери, чие архітектурне тіло є імітацією структури простору та часу (так звані клітинні автомати), можуть ефективно відтворювати рухи класичних елементарних частинок та взаємодії між ними.

Кінець ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию (https://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=44902120&from=362673004) на ЛитРес.

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

notes

1

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.)

2

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.)

3

American Standard Code for Information Interchange – Американський стандартний код обміну інформацією. (Прим. перекл.)

4

У XVIII ст. до н. е. у вавилонян була вже усталена «арабська» числова система, але нуль був вилучений з контексту, його не писали (наприклад, 210 і 21 писали однаково). Найстаріша відома «прото-абакова» Саламінська лічильна табличка датована IV ст. до н. е. Використання 0 (нуля) було введено Птолемеєм у 130 р. н. е. і стало загальноприйнятим в Індії на середину VII ст. н. е. (Прим. авт.)

5

Як на наклейці на бампері: «Помилятися властиво людині. Та щоб усерйоз усе зіпсувати, потрібен комп'ютер». (Прим. авт.)

6

У деяких космологічних теоріях вважається, що Всесвіт існує вічно, а Великий вибух настав після Великого стиснення. У цих моделях наш Всесвіт розширюватиметься, а потім знов увійде у фазу Великого стиснення, за яким настане черговий Великий вибух і так далі. Хоча такі моделі Всесвіту узгоджуються із законами фізики, на сьогодні вони не вважаються найбільш коректними. (Прим. авт.)