

# Содержание

<i>Предисловие автора к русскому изданию</i> .....	7
<i>Пролог</i> .....	9
<b>Часть I. Общая картина</b> .....	13
Глава 1. Введение .....	15
Глава 2. Вычисление.....	31
Глава 3. Вычислительная Вселенная .....	53
<b>Часть II. Крупным планом</b> .....	79
Глава 4. Информация и физические системы.....	81
Глава 5. Квантовая механика.....	117
Глава 6. Атомы за работой .....	147
Глава 7. Универсальный компьютер .....	171
Глава 8. Упрощая сложность.....	201
<i>Примечания</i> .....	241
<i>Личные заметки: информация как утешение</i> .....	244
<i>Благодарности</i> .....	249
<i>Дальнейшее чтение</i> .....	251
<i>Об авторе</i> .....	255



# Предисловие автора к русскому изданию

Я с удовольствием пишу это специальное введение для издания книги «Программируя Вселенную» на русском языке. Я хотел бы поблагодарить Сергея Белоусова, Евгения Демлера, Мишу Лукина и всех коллег из Российского квантового центра, которые помогли сделать возможной публикацию этого русского перевода. Российский квантовый центр — это новое прогрессивное учреждение, которое сохраняет великую русскую традицию фундаментальной науки. Исследователи центра уже внесли важный вклад в теорию и практику обработки квантовой информации, которая является одной из центральных тем моей книги. Я с нетерпением жду от этой научной организации новых больших и прекрасных научных достижений.

Идея «Программируя Вселенную» состоит в том, что мы должны воспринимать Вселенную в терминах обработки информации, проводимой ею на самом фундаментальном уровне. В традиционном физическом описании Вселенной главной величиной является энергия. Недавно, однако, стало ясно, что информация является столь же важной величиной. Как гласит знаменитая формула Эйнштейна  $E = mc^2$ , вся материя сделана из энергии. Однако информация задает форму, которую принимает вещество, и определяет те преобразования, которым подвергается энергия. В глубине своей Вселенная — это танец вращений и щелкающих звуков, в котором энергия и информация являются равными партнерами. Вселенная, в сущности, является гигантским компьютером, в котором каждый атом и каждая элементарная частица содержат биты информации, и каждый раз, когда два атома или две частицы сталкиваются, эти биты меняют свои значения. Вычислительная природа Вселенной дает начало ее запутанности и сложности: все, что может быть вычислено — все, что может вообразить наш разум, и даже сверх того — существует где-то во Вселенной.

Российские математики и ученые вписали много прекрасных страниц в теорию информации. Работы Андрея Николаевича Колмогорова были очень важны для этой книги: Колмогоров был одним из основоположников в области теории алгоритмической информации, в которой утверждается, что информация должна быть определена на языке ее обработки, то есть через вычисления. Теория сложности Колмогорова является естественной основой теорий вычисления и образования сложности, обсуждаемых в этой книге. В последнее время российские ученые сделали исключительно важный вклад в теорию квантовой информации и квантовых вычислений. Квантовая механика — это раздел физики, который изучает поведение вещества и энергии в их самой фундаментальной форме. В своей основе она является странной и контринтуитивной: частицы имеют соответствие в виде волн, а волны сделаны из частиц — это корпускулярно-волновой дуализм. Один электрон может находиться одновременно в двух местах, и множество вещей, которые для нашего классического воображения представляются невозможными, в действительности происходят ежесекундно. Вселенная — это не просто компьютер; в силу своей природы она является квантово-механическим компьютером. Сочетание квантовой странности с обработкой информации как раз и придает Вселенной ее стабильность, мощь и сложность.

Я имел счастье начинать свою научную карьеру в 1980-е гг., в момент, когда российские и советские ученые начали выезжать за границу после многих десятилетий разобщения с остальным миром. Помимо открытия сокровищницы фундаментальной научной информации, которая до этого была опубликована только на русском языке, эти ученые придали научному дискурсу уникальный и чудесный дух. В юности я читал Толстого и Достоевского и потому был знаком с богатством русской интеллектуальной дискуссии, но я никогда до этого не участвовал в настоящем русском научном споре, когда начинают говорить на повышенных тонах, когда по столу бьют кулаком, когда кусок мела могут в сердцах разбить о доску, но в конце, когда задачу удалось решить, все снова становятся друзьями. Страсть, настойчивость и дружеское разрешение фундаментальных проблем — вот истинный дух науки! И я надеюсь, что русское издание «Программируя Вселенную» породит яркие научные споры.

Сет Ллойд

Кембридж, штат Массачусетс, 15 июня 2013 г.

# Пролог

## Яблоко и Вселенная

«В начале был бит», — начал я. Часовня женского монастыря XVII в., где находится занятый изучением сложных систем Институт Санта-Фе, была заполнена обычными слушателями: физиками, биологами, экономистами и математиками с закусочной из нескольких Нобелевских лауреатов. Один из отцов-основателей астрофизики и квантовой гравитации, Джон Арчибальд Уилер, предложил мне прочесть лекцию на тему «Всё из бита». Я принял вызов. Стоя перед аудиторией, я стал сомневаться, стоило ли это делать, но отступить было некуда. Я взял в руку яблоко.

«Вещи возникают из информации, то есть из битов, — продолжил я, нервно подбрасывая яблоко в воздух. — Это яблоко — хороший объект. Яблоко часто ассоциируют с информацией. Впервые, яблоко — плод познания, “смертельный вкус которого принес на землю смерть и все страдания наши”. Оно несет информацию о добре и зле. Позже именно траектория падающего яблока подсказала Ньютону универсальные законы тяготения, а искривленная поверхность яблока есть метафора искривленного пространства времени Эйнштейна. Ближе к нашей теме то, что в генетическом коде, записанном в семенах яблока, запрограммирована структура будущих яблонь. И еще одно, не менее важное свойство яблока: оно содержит свободную энергию — калории богатой биотами энергии, благодаря которой функционирует наше тело». Я откусил кусочек яблока.

«Очевидно, это яблоко содержит информацию разных типов. Но сколько оно вмещает? Сколько битов в нем?» Я положил яблоко на стол и повернулся к доске, чтобы сделать быстрый расчет. «Что интересно, количество битов в яблоке известно с на-

чала XX в., когда еще не было самого слова “бит”. Может показаться, что яблоко содержит бесконечное число битов, но это не так. В действительности законы квантовой механики, управляющие всеми физическими системами, говорят, что требуется лишь конечное число битов, чтобы определить микроскопическое состояние яблока и всех его атомов. Каждый атом, а точнее, его положение и скорость содержит всего несколько битов; каждый ядерный спин в ядре атома хранит один-единственный бит. Поэтому битов в яблоке всего в несколько раз больше, чем атомов — несколько миллионов миллиардов миллиардов нулей и единиц».

Я повернулся к аудитории. Яблока на столе не было. Ничего себе! Кто его взял? Уилер безмятежно смотрел на меня. Лицо Мюррея Гелл-Манна, нобелевского лауреата, изобретателя кварка и одного из ведущих физиков мира, также не отражало никаких эмоций.

«Я не могу продолжать без яблока. Нет объекта — нет битов», — заявил я и сел.

Моя голодная забастовка продлилась всего несколько мгновений: улыбнувшись, инженер из исследовательского центра Bell Labs протянул мне яблоко. Я взял его и поднял над головой, бросая вызов любому, кто решится совершить еще одну попытку воровства. Это была моя ошибка. Но тогда мне казалось, что все идет хорошо.

Я продолжал: «С точки зрения количества информации, которую могут хранить биты, все они равны. Бит — сокращение от *binary digit* (двоичное число) — может находиться в одном из двух различных состояний: 0 или 1, да или нет, “орел” или “решка”. Любая физическая система, где есть два этих состояния, содержит один бит. Система, в которой больше состояний, содержит больше битов. Система с четырьмя состояниями, например, 00, 01, 10, 11, содержит два бита; система, где есть восемь состояний, например 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111, содержит три бита, и т.д. Как я уже говорил, согласно законам квантовой механики любая физическая система, ограниченная конечным объемом пространства и конечным количеством энергии, имеет конечное число различных состояний и поэтому содержит конечное число битов. Все физические системы содержат информа-

цию. Как сказал Рольф Ландауэр из IBM, «информация — величина физическая»».

Тут меня перебил Гелл-Манн: «Но все ли биты равны на самом деле? Пусть один бит говорит нам, является ли истинной некая знаменитая, но недоказанная математическая гипотеза, а бит получен в результате случайного подбрасывания монетки. Мне кажется, что одни биты важнее других».

Я согласился. Разные биты играют во Вселенной разную роль. Биты могут содержать одинаковое количество информации, но качество и важность этой информации меняются от бита к биту. Значимость ответа «да» зависит от заданного вопроса. Два бита информации, определяющих одну конкретную пару нуклеотидов в ДНК яблока, гораздо важнее для будущих поколений яблок, чем биты информации, созданной тепловым колебанием атома углерода в одной из молекул яблока. Передать запах яблока могут всего несколько молекул и сопутствующих им битов, но чтобы обеспечить яблоку пищевую ценность, необходимы миллиарды миллиардов битов.

«Однако, — снова вмешался Гелл-Манн, — существует ли математически строгий способ определить значимость некоторого бита?»

У меня нет полного ответа на этот вопрос, сказал я, все еще держа в руке яблоко. Значимость бита информации зависит от того, как обрабатывается эта информация. Все физические системы содержат информацию. Более того, динамически развиваясь во времени, они преобразовывают и обрабатывают эту информацию. Если электрон «здесь» содержит 0, а электрон «там» содержит 1, то, когда электрон переходит отсюда туда, он меняет значение своего бита. Естественную динамику физической системы можно воспринимать как вычисление, в котором бит не только содержит 0 или 1, но действует как инструкция: 0 может означать «делай это», а 1 может означать «делай то». Значимость бита зависит не только от его значения, но и от того, как это значение с течением времени влияет на другие биты, будучи частью процесса постоянной обработки информации, который и составляет динамическую эволюцию Вселенной.

Я продолжал описывать биты, из которых возникает яблоко, и стал говорить о той роли, которую они играют в процессах, благодаря которым яблоко получает определенные характеристики. Все шло хорошо. Я раскрыл тему «все из бита» и даже смог достойно ответить на вопросы аудитории. По крайней мере, мне так казалось.

Я закончил лекцию и отошел от доски. Вдруг кто-то похлопал меня по плечу. Один из слушателей всерьез решил завладеть моим яблоком. Это был Дойн Фармер — один из основателей теории хаоса, высокий, спортивный человек. Он схватил меня за руки — хотел, чтобы я уронил яблоко. Освобождаясь от захвата, я прижал его спиной к стене. Висевшие на ней изображения фракталов и фотографии индейцев упали на пол. Фармер повалил меня на пол. Мы стали кататься по полу, опрокидывая стулья. Яблоко куда-то делось. Вероятно, оно снова превратилось в отдельные биты.





Часть

# **Общая картина**



# 1 Г Л А В А

## Введение

Эта книга — история всей Вселенной и отдельного бита. Вселенная — самый большой объект, существующий на свете, а бит — самый маленький кусочек информации. Вселенная состоит из битов. Каждая молекула, атом и элементарная частица содержат биты информации. В любом взаимодействии между этими частицами Вселенной информация обрабатывается путем изменения этих битов. Иначе говоря, Вселенная вычисляет. Но ею управляют законы квантовой механики, поэтому она вычисляет так, как это свойственно квантовой механике; ее биты — это квантовые биты. По сути, история Вселенной — это огромное, постоянное квантовое вычисление. Вселенная — это квантовая вычислительная машина.

Здесь возникает вопрос: что вычисляет Вселенная? Ответ: саму себя, свое собственное поведение. Как только Вселенная возникла, она тут же начала вычислять. Сначала конструкции, которые она создавала, были простыми: они включали элементарные частицы и устанавливали фундаментальные законы физики. Со временем, обрабатывая все больше и больше информации, Вселенная давала начало все более запутанным и сложным объектам, включая галактики, звезды и планеты. Жизнь, язык, люди, общество, культура — все они обязаны своим существованием естественной способности вещества и энергии обрабатывать информацию. Способность Вселенной к вычислению

объясняет одну из величайших тайн природы: как из очень простых законов физики возникают сложные системы, например живые существа. Эти законы позволяют предсказывать будущее, но только как вероятность и только в общих чертах. Квантово-вычислительная природа Вселенной такова, что конкретные детали будущего всегда остаются непредсказуемыми. Их смог бы вычислить только компьютер размером с саму Вселенную. Так что единственный способ заглянуть в будущее — подождать и посмотреть, что произойдет.

Позвольте мне сказать несколько слов о себе. Мои первые детские воспоминания — как мы жили в курятнике. Мой отец был учеником мебельщика, мы обитали в Линкольне, штат Массачусетс. Курятник находился в дальнем конце большого сарая хозяйки. Мой отец превратил его в двухкомнатную квартиру; там, где раньше жили куры, теперь были спальные места для меня и моего старшего брата. (Моему младшему брату разрешили сделать люльку.) Вечером мать пела нам колыбельную, укрывала одеялами и закрывала деревянные двери. Мы оставались одни и глядели на мир за окном.

Вот мое первое воспоминание: я вижу, как горит бумага в корзине для мусора — проволочной корзине с ромбическим плетением. Затем я помню, как прижимаюсь к ноге матери, одетой в синие джинсы, чуть выше колена, а отец запускает японского бумажного змея. Потом воспоминания начинают быстро сменять друг друга, словно на киноплёнке. Каждое живое существо воспринимает мир по-своему, замечает множество деталей и создает из них определенную структуру. Тем не менее все мы живем в одном и том же пространстве, нами управляют одни и те же физические законы. В школе я узнал, что законы физики, управляющие Вселенной, удивительно просты. Как это может быть, думал я, что такой запутанный и сложный мир, который я вижу из окна своей спальни, возникает из простых законов физики? Я решил детально исследовать этот вопрос и много лет изучал законы природы.

Хайнц Пэджелс, трагически погибший в горах Колорадо летом 1988 г., был блестящим и оригинальным мыслителем. Он

считал, что нам пора нарушить обычные границы науки. Он поощрял меня разрабатывать физически точные методы описания и измерения сложности. Позже, под руководством Мюррея Гелл-Манна в Калифорнийском технологическом институте, я изучал, как законы квантовой механики и физики элементарных частиц «программируют» Вселенную и при этом сеют семена сложности.

Сейчас я профессор машиностроения в Массачусетском технологическом институте. Но поскольку формально у меня нет образования в этой сфере, правильнее было бы назвать меня профессором квантово-механической техники. Она опирается на квантовую механику — раздел физики, изучающий вещество и энергию на микроуровне. Квантовая механика относится к атомам, как классическая механика к механизмам. По сути, меня можно назвать инженером атомов.

В 1993 г. я понял, как создать квантовый компьютер. Квантовые компьютеры — это устройства, которые используют способность отдельных атомов, фотонов и других элементарных частиц обрабатывать информацию. Они вычисляют так, как не могут вычислять классические компьютеры, например Mac или PC. Изучая, как заставить атомы и молекулы — самые маленькие частицы Вселенной — вычислять, я стал все лучше видеть естественную способность к обработке информации, свойственную самой Вселенной. Сложный мир, который мы видим вокруг, — проявление квантовых вычислений Вселенной.

Цифровая революция, происходящая сегодня, — последнее звено в длинной цепи революций в области обработки информации, уходящей в прошлое. Среди них — возникновение человеческих языков, половое размножение, рождение жизни, наконец, начало самой Вселенной. Каждая из них заложила основу для следующей, и все эти революции в сфере обработки информации, начиная с Большого взрыва, происходили благодаря естественной способности Вселенной обрабатывать данные.

Вычисляющая Вселенная с необходимостью создает сложность. Жизнь, пол, мозг и человеческая цивилизация возникли не случайно.

## Квантовый компьютер

Квантовая механика славится своими парадоксами. Волны ведут себя как частицы, а частицы — как волны, и можно находиться в двух местах одновременно. Пожалуй, не так уж удивительно, что на микроуровне вещи ведут себя странным и парадоксальным образом; в конце концов, мы привыкли воспринимать объекты, которые по размеру намного больше отдельных атомов. Но парадоксы квантового мира все же сбивают нас с толку. Нильс Бор, отец квантовой механики, как-то заметил: если кто-то считает, будто может разбираться в квантовой механике, не испытывая при этом головокружения, то на самом деле он ее не понимает.

Квантовые компьютеры используют «квантовую странность», чтобы выполнять задачи, слишком сложные для обычных компьютеров. Квантовый бит, или «кубит», может находиться в состоянии и 0, и 1 *в одно и то же время*, в то время как классический бит может содержать только 0 или только 1. Поэтому квантовый компьютер может выполнять миллионы вычислений одновременно.

Квантовые компьютеры обрабатывают информацию, хранящуюся в отдельных атомах, электронах и фотонах. Квантовый компьютер — это демократия в мире информации: каждый атом, электрон и фотон равным образом участвуют в процессах хранения и обработки информации. И эта фундаментальная демократия информации не ограничена квантовыми компьютерами. Все физические системы в основе своей являются квантово-механическими, и все физические системы записывают, содержат и обрабатывают информацию. Мир построен из элементарных частиц — электронов, фотонов, кварков, и каждый элементарный фрагмент физической системы запечатлевает часть информации: одна частица — один бит. Взаимодействуя между собой, эти фрагменты постепенно преобразуют и обрабатывают информацию, бит за битом. Каждое столкновение элементарных частиц действует как простая логическая операция, сокращенно «оп».

Чтобы осознать любую физическую систему с точки зрения ее битов, нужно хорошо понимать механизм, посредством которого каждый элемент этой системы записывает и обрабатывает инфор-

мацию. Если мы выясним, как это делает квантовый компьютер, то узнаем также, как это делает физическая система.

Идею такого компьютера предложили в начале 1980-х гг. Пол Бенев, Ричард Фейнман, Дэвид Дойч и другие. В то время квантовые компьютеры были чисто абстрактной концепцией: никто не знал, как можно их создать. В начале 1990-х я показал, как это можно сделать с использованием существующих экспериментальных методов. В течение десяти последних лет я трудился с некоторыми из лучших ученых и инженеров мира, чтобы разработать и изготовить квантовые компьютеры и использовать их.

Есть множество веских причин для того, чтобы создать квантовый компьютер. Прежде всего, мы можем это сделать. Квантовые технологии — технологии управления материей на уровне атомов — в последние годы получили замечательное развитие. Сейчас у нас есть достаточно стабильные лазеры, довольно точные методы производства и быстрая электроника — все это позволяет выполнять вычисления на уровне атомов.

Вторая причина заключается в том, что нам нужно научиться создавать квантовые компьютеры, по крайней мере если мы хотим, чтобы наши компьютеры становились все более быстрыми и мощными. На протяжении полувека вычислительная мощность компьютеров удваивалась каждые полтора года. Этот взрыв называется «законом Мура», в честь Гордона Мура, впоследствии ставшего топ-менеджером компании Intel, который указал на экспоненциальный характер роста еще в 1960-е. Закон Мура — это не закон природы, а свидетельство человеческой изобретательности. Каждые восемнадцать месяцев компьютеры становятся в два раза быстрее, потому что каждые восемнадцать месяцев инженеры находят способ уменьшить вдвое размер соединений и логических элементов, из которых они состоят. Каждый раз, когда размер основных компонентов компьютера уменьшается вдвое, на чипе того же размера становится возможно разместить в два раза больше элементов. В результате компьютер оказывается вдвое мощнее своего предшественника, созданного полтора года назад.

Если спроецировать закон Мура на будущее, мы увидим, что размер соединений и логических элементов, из которых состоят

компьютеры, лет через сорок должен будет достичь уровня атомов; следовательно, если мы хотим, чтобы закон Мура действовал и дальше, нам придется научиться создавать компьютеры, работающие на квантовом уровне. Квантовые компьютеры представляют собой последний рубеж миниатюризации.

Квантовые компьютеры, которые сделали мы с коллегами, уже достигли этой цели: каждый атом содержит один бит. Но сегодня мы можем создавать совсем небольшие квантовые компьютеры — и по размеру, и по вычислительной силе. Самые большие квантовые компьютеры общего назначения, существующие в настоящий момент, содержат от семи до десяти квантовых битов и могут выполнять тысячи квантовых логических операций в секунду\*. (Для сравнения, обычный настольный персональный компьютер может содержать триллионы битов и выполнять миллиарды обычных, классических логических операций в секунду.) Мы уже научились делать компьютеры с элементами размером с атом, но еще не умеем делать *большие* компьютеры с элементами такого размера. Первые квантовые компьютеры появились десять лет назад, и количество битов, которые они могут содержать, удваивается почти раз в два года. Даже если эта скорость сохранится, пройдет еще сорок лет, прежде чем квантовые компьютеры смогут сравняться с сегодняшними классическими по количеству битов. Квантовым компьютерам предстоит еще долгий путь до обычной «персоналки».

Третья причина для создания квантовых компьютеров заключается в том, что они позволяют нам понять, как Вселенная записывает и обрабатывает информацию. Один из лучших способов понять закон природы — это создать машину, которая бы иллюстрировала этот закон. Часто мы сначала создаем машину, а законы возникают позже. Колесо и волчок появились за много тысячелетий до того, как был открыт закон сохранения момента импульса; брошенный камень — до того, как Галилей открыл законы движения; призма и телескоп — раньше оптической теории Ньютона; паровой двигатель изобрели задолго до того, как Джеймс

---

\* В 2011 г. компания D-Wave Systems объявила о создании коммерческого компьютера со 128 кубитами. — Прим. ред.



Уатт сконструировал свой регулятор, а Сади Карно открыл второй закон термодинамики.

А поскольку квантовую механику так трудно понять, было бы здорово создать машину, которая бы воплощала в себе ее законы! Взаимодействуя с ней, можно было бы на практике увидеть, как «работает» квантовая механика; так ребенок, играющий с волчком, интуитивно усваивает понятие и свойства момента импульса, воплощенные в этой игрушке. Только практический опыт, возможность своими глазами наблюдать, как ведут себя атомы, позволит по-настоящему понять, что такое квантовая механика. «Игрушечные» квантовые компьютеры, которые мы научились делать сегодня, — это машины, позволяющие нам все больше и больше узнавать о том, как физические системы запечатлевают и обрабатывают информацию на квантово-механическом уровне.

Наконец, есть еще одна причина для создания квантовых компьютеров: это очень интересно. На страницах этой книги мы встретимся с некоторыми из лучших ученых и инженеров мира. Это Джефф Кимбл из Калифорнийского технологического института, конструктор первых в мире фотонных квантовых логических элементов; Дейв Вайнленд из Национального института стандартов и технологий, создавший самый первый простой квантовый компьютер; Ханс Моэй из Делфтского технологического университета, чья группа провела некоторые из самых ранних демонстраций квантовых битов в сверхпроводящих схемах; Дэвид Кори из Массачусетского технологического института, который построил первый молекулярный квантовый компьютер и чьи квантовые аналоговые компьютеры могут выполнять вычисления, для которых потребовался бы обычный компьютер, превышающий размерами саму Вселенную. Как только мы увидим, как работают квантовые компьютеры, мы сможем определить границы вычислительной способности Вселенной.

## Язык природы

Совершая вычисления, Вселенная без труда создает запутанные и сложные структуры. Чтобы понять, как она вычисляет, а значит,

чтобы понять эти сложные структуры, нужно выяснить, как она хранит и обрабатывает информацию. То есть изучить язык самой природы.

Я занимаюсь чем-то вроде «массажа» атомов. Я профессор квантово-механической техники в Массачусетском технологическом институте. Моя работа — делать «массаж» электронам, фотонам, атомам и молекулам, чтобы привести их в те особые состояния, в которых они превращаются в квантовые компьютеры и квантовые системы коммуникации. Атомы малы, но они сильны; эластичны, но чувствительны. С ними легко «говорить» (просто толкните стол — тем самым вы «заговорите» с миллиардами и миллиардами атомов), но их трудно «услышать» (думаю, вы не сможете мне сказать, что вам ответил стол, кроме «бум!»). Мы их не интересуем, они просто живут своей жизнью, занимаются своим делом, и так было всегда. Но если правильно сделать им массаж, то их можно очаровать. И они начнут делать для вас вычисления.

Атомы не одиноки в своей способности обрабатывать информацию. Фотоны (частицы света), фононы (частицы звука), квантовые точки (искусственные атомы), сверхпроводящие схемы — все эти микроскопические системы могут записывать информацию. И если вы говорите на их языке и вежливо задаете им вопросы, то они обработают эту информацию для вас. На каком языке говорят такие системы? Как и все физические системы, они реагируют на энергию, силу, импульс, на свет и звук, на электричество и силу тяжести. Физические системы говорят на языке, грамматику которого составляют законы физики. За последние десять лет мы изучили этот язык достаточно хорошо, чтобы говорить с атомами — чтобы убедить их выполнять вычисления и сообщать о результатах.

Трудно ли говорить «на языке атомов»? Чтобы пользоваться этим языком свободно, нужно учиться всю жизнь. Сам я владею им плохо по сравнению с другими учеными и квантовыми инженерами, с которыми вы встретитесь на страницах этой книги. Но поддерживать с атомами простую беседу не так уж трудно.

Как и все языки, «язык атомов» легче выучить, когда вы молоды. Мы с Полом Пенфилдом читаем курс лекций для первокурсников Массачусетского технологического института, он называ-

ется «Информация и энтропия». Цель этого курса, как и цель этой книги, — раскрыть фундаментальную роль, которую информация играет во Вселенной.

Пятьдесят лет назад первокурсники Массачусетского технологического института знали все о двигателях внутреннего сгорания, передачах и рычагах, трансмиссиях и шкивах. Двадцать пять лет назад они прекрасно разбирались в электронных лампах, транзисторах, любительских радиоприемниках и электронных схемах. Теперь они переполнены знаниями о компьютерах, дисководах, волоконной оптике, разбираются в пропускной способности линий и средствах сжатия музыкальных и графических файлов. Их предшественники жили в мире механики и электричества; они — в мире информации. Их предшественники уже знали много о силе и энергии, напряжении и заряде; а они очень много знают о битах и байтах. Наши первокурсники так хорошо разбираются в информационных технологиях, что мы, преподаватели, можем вести для них предметы, включая курс по квантовым вычислениям, которые раньше были по зубам только выпускникам. (Мои старшие коллеги с факультета машиностроения жалуются, что нынешние первокурсники никогда не держали в руках отвертки. Это неправда. Добрая половина из них умеет пользоваться отверткой, чтобы установить больше памяти в свой компьютер.)

В рамках научно-исследовательского проекта, который я вел при поддержке Национального научного фонда США, я разработал курс лекций для учеников первых и вторых классов средней школы — о том, как обрабатывается информация на микроуровнях. Даже шести- и семилетние дети сегодня очень много знают о компьютерах. Кажется, они не испытывают никаких затруднений с битами и байтами. Когда мы с ними играем в игру, где каждый берет на себя роль атома в квантовом компьютере, они делают это с легкостью и прекрасно понимают смысл своих действий.

Те, кто родился и вырос задолго до нынешней революции обработки информации, тоже прекрасно понимают разнообразие и все значение информации, не хуже наших переполненных битами детей. Неважно, сколько вам лет — к моменту, когда вы закончите читать эту книгу, вы будете знать, как можно попросить атомы вы-

полнить простые вычисления, используя машины, которые уже есть во всем мире, а также грамматику языка природы.

## Революции в сфере обработки информации

Естественная и фундаментальная способность Вселенной обрабатывать информацию несколько раз в истории приводила к революциям в этой сфере, и сейчас происходит очередная. Ее причина — стремительное развитие электронных вычислительных технологий, воплощенное в законе Мура. Квантовые компьютеры — в авангарде этой революции. Она восхищает, ее невозможно не заметить, но ее нельзя назвать ни самой первой, ни самой важной.

Не менее серьезной революцией в сфере обработки информации было изобретение нуля. Цифру «ноль» изобрели древние вавилоняне, а из Вавилона оно распространилось по всему арабскому миру. Использование нуля для обозначения десятков (10, 100, 1000 и т. д.) отличает арабскую систему записи чисел, которой пользуемся мы с вами, от других систем, например от римской, где для обозначения степеней десяти используются разные символы (X = 10; C = 100; M = 1000). Это новшество в представлении чисел может показаться несущественным, но изобретение арабских цифр оказало большое влияние на математическую обработку информации. (Немаловажным следствием этого стали более простые и прозрачные коммерческие сделки и расчеты. Если бы парни из корпорации Enron\* вели свой теневой бухгалтер в римских цифрах, возможно, им удалось бы выйти сухими из воды!)

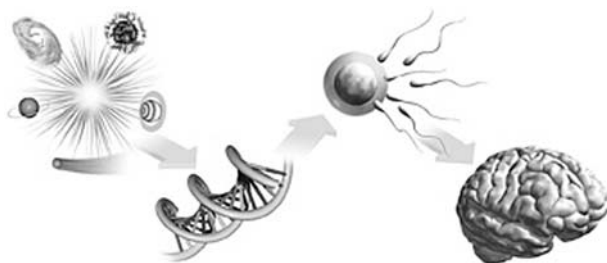
Арабская система записи родилась вместе с сопровождающей ее технологией, *абак*. Абак — простая, понятная и мощная вычислительная машина. Это дощечка, к которой прикреплены ряды подвижных бусинок, надетых на палочки\*\*. Первый ряд обозначает единицы, второй — десятки, третий — сотни и т. д. Абак, в котором всего десять рядов, может выполнять вычисления в диапазоне до миллиардов.

---

\* Американская энергетическая корпорация, обанкротившаяся в декабре 2001 г. — *Прим. ред.*

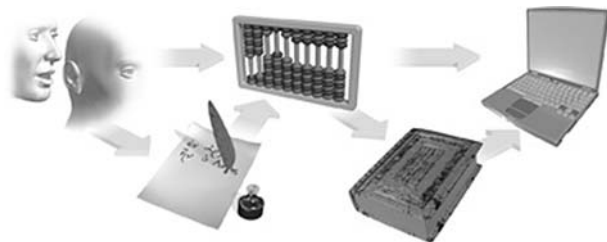
\*\* Русский аналог — счеты. — *Прим. ред.*

Но еще интереснее воплощенная в абак концепция нуля. Вероятно, абак возник раньше, чем само это слово. Английское *zero* пришло из итальянского, это сокращение от *zefiro*, от средневекового латинского *zephirum*. Как и старофранцузское *cifre*, оно восходит к арабскому *sifr*; на санскрите *shunya* — «пустота». В арабской системе записи нуль заполняет пустые места, позволяя легко обозначить большие числа (10, 100, 1000...). Пустота — это мощная концепция. Несмотря на всю ее мощь или благодаря ей, цифра нуль вызывает подозрения. Она не кажется естественной. Действительно, нуль не относится к натуральным числам (1, 2, 3...). Нуль как абстракция — это достаточно сложное понятие, но абак, на котором все бусинки опущены вниз, — это простой, конкретный символ: нуль.



**Рис. 1а.** Восхождение битов

*Историю Вселенной можно рассматривать как последовательность революций в сфере обработки информации, каждая из которых основана на технологиях, возникших в результате предыдущих революций*



**Рис. 1б.** Восхождение битов

Абак показывает нам, что революцию в сфере обработки информации невозможно отделить от механизма или технологии, которые определяют форму ее представления и обработки. Технология обработки информации (например, абак) обычно неотделима от новой концепции (например, нуля).

Если мы отправимся еще на несколько тысяч лет назад, то увидим еще более важную революцию: письменность. Ее первоначальная технология представляла собой значки, нацарапанные на глине или на камне. Письменность в буквальном смысле сделала язык конкретным и осязаемым. В результате возникли крупномасштабная социальная организация, деловые контракты, священные тексты и обыкновенные книги — такие, как эта. Технологии письменности постепенно развивались: от камня к бумаге, от бумаги к электронам. Каждое проявление письменности, от десяти заповедей и стихов до неоновой вывески, использует собственный вариант технологии для обозначения слов.

Появление человеческого языка примерно 100 000 лет назад или даже раньше стало (давайте польстим нашему биологическому виду) еще одной серьезной революцией в сфере обработки информации. Исследования окаменелостей показывают, что развитие языка сопровождалось и ускорялось относительно быстрым развитием участков мозга, отвечающих за обработку речи. Новые нейронные сети мозга, вместе с одновременным развитием голосовых связок, можно считать естественной «технологией», или механизмом, благодаря которому и возник язык. Эта новая «нейронная технология», очевидно, и дала начало замечательной универсальности человеческой речи — способности выразить на одном языке более или менее точно то, что было сказано на другом. По меньшей мере язык позволил создать уникальные человеческие формы социальной организации, сделавшей наш вид столь успешным.

Чем дальше в прошлое, тем более важные революции в сфере обработки информации мы наблюдаем. Развитие мозга и центральной нервной системы было триумфом естественной эволюции технологии, хорошо приспособленной к преобразованию информации, поступающей извне, и для связи между разными частями

организма. Развитие многоклеточных в первую очередь стало результатом многочисленных усовершенствований в сфере внутри- и межклеточной коммуникации. Каждая успешная мутация, каждый случай возникновения нового вида — это шаг вперед в сфере обработки информации. Но чтобы увидеть еще более серьезную революцию, затмившую все, о чем мы говорили до сих пор, нужно отправиться еще на миллиард лет назад, к появлению полового размножения.

Первая сексуальная революция представляла собой *tour de force*, ее огромный успех основан на идее, которая на первый взгляд кажется неудачной. Почему неудачной? Потому что половое размножение несет риск потери ценной информации. Успешная бактерия, размножаясь бесполом путем — почкованием, передает потомству точную копию своего генетического кода (конечно, при условии отсутствия случайных мутаций). Но если организм размножается половым путем, его гены смешиваются с генами партнера, и их потомок получает новый набор генов. Этот процесс называется рекомбинацией. Поскольку половина генов отпрыска приходит от одного из родителей, а половина от другого и они перемешиваются, то, какими бы успешными ни были уникальные комбинации генов каждого из родителей, геном потомка будет от них отличаться. Половое размножение никогда не передает потомкам удачную комбинацию генов в неизменном виде. В этом смысле секс препятствует успеху!

Так что же в нем хорошего? С точки зрения естественного отбора половое размножение способствует большей генетической изменчивости, в то же время добросовестно воспроизводя отдельные гены. Предположим, что в мире становится жарче. Успешная до этого бактерия, которая размножается почкованием, внезапно оказывается во враждебном окружении. Ее потомку, в точности похожему на нее и адаптированному к прохладному климату, теперь будет сложно выжить.

Единственный способ адаптации для бесполой бактерии — мутация, вызванная репродуктивной ошибкой или вредными факторами окружающей среды. Большинство мутаций неудачны, и они делают бактерию еще менее успешной, но в конце концов может

случиться удачная мутация, и на свет появится более теплостойкая бактерия.

Без полового размножения адаптация проблематична, потому что закон мира: «Изменись или умри», — противоречит одному из основных законов жизни: «Сохраняй целостность генома». Такое противоречие хорошо известно и в инженерном деле: две функции системы бывают связаны так, что невозможно откорректировать одну, не нарушив другой. А вот при половом размножении обмен генетическим материалом, или рекомбинация генов, приводит к большой изменчивости, и при этом поддерживается генетическая целостность.

К примеру, возьмем небольшой городок, где всего тысяча жителей. Давайте подсчитаем все возможные варианты спаривания для этих людей (если судить по телесериалам, их может быть очень и очень много) и количество способов, которыми гены всех участников могут перемешаться и рекомбинироваться в их детях. Окажется, что этот городок — целая генетическая «электростанция», способная создать столько же разнообразия, что и миллиарды делящихся бактерий. Разнообразие — это хорошо: если в город придет эпидемия чумы, то некоторые жители ее переживут, а затем передадут детям гены резистентности к этой болезни. Более того, способность к разнообразию, которую создает половое размножение, не наносит вреда геному. Отделяя функцию адаптации от функции поддержания целостности отдельных генов, половое размножение создает разнообразие отдельных особей, при этом сохраняя в целостности гены вида. В общем, секс — не только удовольствие, это хороший инженерный подход.

Если мы отправимся еще дальше в прошлое, то найдем бабушку всех революций в сфере обработки информации — это возникновение самой жизни. Жизнь на Земле началась в точке, отстоящей на одну треть от нашего времени к началу Вселенной. (Когда это произошло в других местах и произошло ли вообще, неизвестно.) У живых организмов есть гены, последовательности атомов в молекулах типа ДНК, в которых закодирована информация. Количество информации в одном гене можно измерить: человеческий геном содержит около 6 млрд битов информации. Организмы передают



свою генетическую информацию потомству, иногда в мутировавшей форме.

Организмы, которые умеют передавать генетическую информацию, по определению успешны; организмы, которые не могут передать свои гены, вымирают. Генетическая информация, дающая потомству репродуктивное преимущество, обычно сохраняется на протяжении множества поколений, хотя отдельные организмы, которые ее несут, рождаются, воспроизводят потомство и умирают.

Генетическая информация передается посредством естественного отбора. Гены и механизмы их копирования и воспроизведения — это ключевая технология обработки информации жизни. Неудивительно, что масштабы всей генетической информации, которую обрабатывают живые организмы, намного больше масштабов компьютерной обработки информации, и их объемы сравняются еще не скоро.

Жизнь — это очень серьезно. Какая революция может превзойти по своей мощи и красоте происхождение жизни? Но была еще одна, более ранняя революция в сфере обработки информации, без которой не было бы ни одной другой. Первый информационный процессор — сама Вселенная. Каждый атом, каждая элементарная частица содержит информацию. Каждое столкновение между атомами, каждое динамическое изменение во Вселенной, даже самое крошечное, обрабатывает эту информацию систематическим образом.

Такая вычислительная способность Вселенной лежит в основе всех последующих революций в сфере обработки информации. Как только физическая система приобретает способность обрабатывать информацию на рудиментарном уровне, выполняя простые операции с несколькими битами, из этих элементарных операций могут быть построены сколь угодно сложные формы обработки информации. Законы физики разрешают простую обработку информации на квантово-механическом уровне: одна частица — один бит; одно столкновение — один оп. Сложные формы, которые мы видим вокруг: жизнь, размножение, язык, общество, видеоигры — все они состоят из простых операций, которые управляются законами физики и в которых участвуют всего по несколько квантовых битов за раз.

Каждая революция в сфере обработки информации связана с той или иной новой технологией — это компьютер, книга, мозг, ДНК. Эти технологии позволяют записывать и обрабатывать информацию в соответствии с некими правилами. Но что за технология связана с обработкой информации Большого взрыва? Какая машина обрабатывает информацию в вычисляющей Вселенной? Чтобы увидеть эту универсальную технологию обработки в действии, достаточно просто открыть глаза и оглянуться вокруг. Машина, выполняющая «универсальные» вычисления, — это сам Универсум, сама Вселенная.

# Г Л А В А 2

## Вычисление

### Информация

Первую лекцию своего курса об информации для старшекурсников, который я читаю в Массачусетском технологическом институте, я начал так, как делаю это всегда: «Лучше всего, — сказал я двум десяткам студентов, сидящих передо мной, — если вы будете задавать мне вопросы, а я буду на них отвечать. Если вы не будете задавать вопросы мне, то я буду задавать вопросы вам. Если вы не ответите на мои вопросы, то я расскажу вам то, что, по моему мнению, вы должны знать. Вопросы есть?»

Я ждал. Тишина.

Что-то здесь не так. Обычно наши студенты радуются, если им удается озадачить преподавателя, особенно если знают, что он может озадачить их самих.

Я перешел ко второму шагу: «Вопросов нет? Тогда вот вопрос вам: что такое информация?»

Молчание. Что с ними такое? В конце концов, эти студенты с первого курса заполняли свои головы информацией. Если они не начнут извергать ее обратно, мне придется перейти к третьему шагу.

«Ладно. А как вам такой вопрос: какова *единица* информации?»

Все хором ответили: «Бит!»

О чем говорит этот ответ, впрочем, как и молчание? Намного легче измерить количество информации, чем сказать, что она та-

кое. А на вопрос «Сколько?» часто ответить проще, чем на вопрос «Что такое...?» Что такое энергия? Что такое деньги? Это трудные вопросы. Сколько нужно энергии, чтобы...? Сколько нужно денег, чтобы...? На такие вопросы можно дать точные и простые ответы.

«Что такое бит?», — спросил я. Теперь ответы посыпались со всех сторон: «0 или 1!»; «Орел или решка!»; «Да или нет!»; «Истина или ложь!»; «Выбор между двумя альтернативами!»

Все эти ответы правильны. Английское слово bit («бит») — сокращение от binary digit; здесь digit — это цифра, а binary («двоичный») значит «состоящий из двух частей», и бит представляет одну из этих двух альтернатив. Традиционно эти альтернативы обозначают как «0» и «1», но любые две четкие альтернативы (горячий/холодный, черный/белый, внутрь/наружу) можно считать способом хранения бита.

Бит — самая маленькая единица информации. Бросив монету, мы получим один бит: орел или решку. Два бита представляют немного больший фрагмент информации. Подбросив монету два раза, мы получим одну из четырех (два раза по две) альтернатив: орел-орел, орел-решка, решка-орел, решка-решка. Три броска монеты дадут нам одну из восьми альтернатив (два раза по два раза по две).

Как видно даже на этих простых примерах, если мы будем продолжать бросать монету, то количество альтернатив — то есть возможных исходов серии бросков — станет быстро расти. С каждым последующим броском (помните: каждый дает один бит) количество альтернатив удваивается. Поэтому, чтобы вычислить количество различных исходов в определенном сценарии, мы просто умножаем два на два столько раз, сколько у вас битов. Например, десять битов — это два умножить на два десять раз, или 1024 варианта:  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^{10} = 1024$ , что близко к одной тысяче, или  $10^3$ .

Иначе говоря, десять битов соответствуют приблизительно трем цифрам нашей обычной десятичной системы счисления, которые обозначают единицы, десятки и сотни. Измерение количества информации — просто вопрос подсчета. Вести счет в битах проще, чем в цифрах, хотя этот метод знаком нам меньше. Счет от 0 до 9 очень прост: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Но тут цифры кончаются,

и следующее число — это 1, после которого следует 0, то есть 10. Число 10 — это 1 в столбце десятков и 0 в столбце единиц. Следующее число, 11, — это 1 в столбце десятков и 1 в столбце единиц. Так можно продолжать считать вплоть до 99. Следующее число — 100. Это 1 в столбце сотен, 0 в столбце десятков и 0 в столбце единиц. (Понятно теперь, почему было так сложно понять десятичную систему счета в первый раз, в пятилетнем возрасте?)

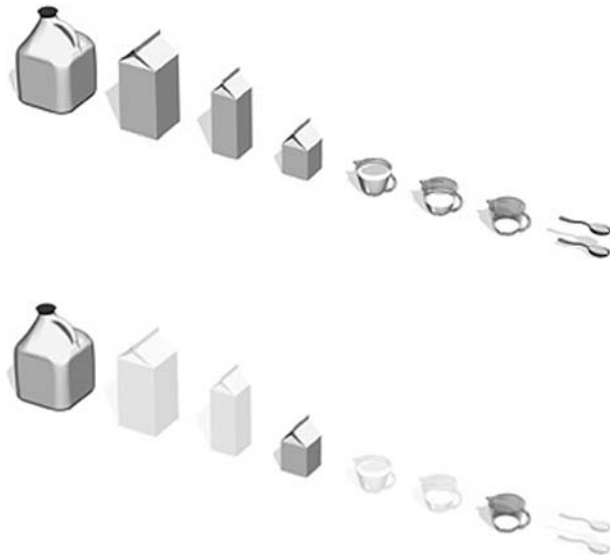
Счет в битах ведется сходным образом. Начнем: 0 = нуль, 1 = один. Пока получается неплохо, но у нас закончились двоичные цифры — биты! Следующая комбинация битов — 10, которая равняется двум: 1 в столбце двоек и 0 в столбце единиц. (Такое представление двойки — это деталь двоичной арифметики, которая дается новичкам труднее всего. Отсюда прекрасная поговорка: «Есть 10 типов людей: те, кто знает двоичную систему счисления, и те, кто ее не знает».) Следующая комбинация — 11, она соответствует трем: 1 в столбце двоек и 1 в столбце единиц. Теперь у нас закончились двухбитовые наборы.

Еще одна комбинация цифр — 100. Она обозначает число четыре: 1 в столбце четверок, 0 в столбце двоек, и 0 в столбце единиц. Затем — комбинация 101, которая обозначает пятерку (1 в столбце четверок плюс 1 в столбце единиц), 110 = шесть, 111 = семь. Число восемь представлено уже четырьмя битами: 1000, где у нас есть 1 в столбце восьмерок и 0 в столбцах четверок, двоек и единиц. У нас есть только два бита вместо десяти цифр, поэтому длина двоичных чисел увеличивается быстрее, чем обычных.

Так же как степени десяти (десятки, сотни, тысячи, миллионы) являются важными числами в обычной, десятичной системе счисления, степени двойки важны при счете битами: 1 = один =  $2^0$ ; 10 = два =  $2^1$ ; 100 = четыре =  $2^2$ ; 1000 = восемь =  $2^3$ ; 10000 = шестнадцать =  $2^4$ ; 100000 = тридцать два =  $2^5$ ; 1000000 = шестьдесят четыре =  $2^6$ ; 10000000 = сто двадцать восемь =  $2^7$ .

Эти цифры хорошо знакомы... поварам. Английская система мер и весов — это по сути двоичная система: 8 унций в чашке, 16 в пинте (если это американская пинта; британская пинта составляет 20 унций, а тройская пинта — 12 унций), 32 унции в кварте, 64 унции в половине галлона и 128 унций в амери-

канском галлоне. Записывать числа в двоичной системе ничуть не труднее, чем измерять объем в квартах, пинтах и чашках. Например, сто сорок шесть унций составляют один галлон плюс одна пинта плюс четверть чашки:  $128 + 16 + 2 = 146$ . В двоичной записи 146 равно 10010010, с единицей в столбце «галлонов», единицей в столбце «пинт», единицей в столбце «четвертинок» и с нулями во всех остальных. Чтобы перевести число в двоичный вид, нужно просто измерить его чайными ложками!



*Рис. 2.* Подсчеты в двоичной системе

*Американская система измерения объема основана на двоичной системе счисления*

*Сто сорок шесть унций составляют один галлон плюс одна пинта плюс одна четверть чашки. В двоичной записи,  $146 = 10010010$*

Вести счет в двоичной системе легко (но не очень, если вы встретились с ней впервые). Двоичная арифметика тоже проста. Вся таблица сложения здесь выглядит так:  $0 + 0 = 0$ ;  $0 + 1 = 1$ ;  $1 + 1 = 10$ .

Таблица умножения тут выглядит еще проще:  $0 \times 0 = 0$ ;  $0 \times 1 = 0$ ;  $1 \times 1 = 1$ . Прелесть, правда?

Кроме того, двоичная система практична. Благодаря компактности двоичной записи можно создавать простые электронные схемы, способные выполнять двоичные арифметические операции. Такие схемы, в свою очередь, служат базой для цифровых компьютеров. Так что даже если мы не можем дать определение того, что такое информация, это не мешает нам ее использовать.

## Точность

«А что будет, если у нас есть бесконечное число альтернатив? — спрашивает студент. — Например, между 0 и 1 находится бесконечное количество действительных чисел».

«Если у вас есть бесконечное число альтернатив, тогда у вас есть бесконечное количество информации», — отвечаю я.

Возьмем, например, такое двоичное число: 1001001 0110110 0100000 1110100 1101000 1100101 0100000 1100010 1100101 1100111 1101001 1101110 1101110 1101001 1101110 1101111. В стандартной таблице кодирования ASCII (American Standard Code for Information Interchange — американский стандартный код обмена информацией) каждой букве или символу на клавиатуре присвоено кодовое слово из семи битов\*. И если воспринимать наше число в кодировке ASCII, мы получим такие символы: I = 1001001; n = 1101110; (пробел) = 0100000; t = 1110100; h = 1101000; e = 1100101; (пробел) = 0100000; b = 1100010; e = 1100101; g = 1100111; i = 1101001; n = 1101110; n = 1101110; i = 1101001; n = 1101110; g = 1100111. Если мы прочтем буквы, то получится «*In the beginning*» — первые слова библейской фразы «В начале было слово...». Добавляя бит за битом, можно выписать число, соответствующее всему тексту Евангелия от Иоанна. Если мы добавим еще больше битов, то можем получить всю Библию, а за ней Коран, а за ним Сутру белого

---

\* Два разных алфавита в семибитный код ASCII уже не умещались. Стихийная адаптация его к требованиям других языков породила великое множество восьмибитных кодовых таблиц. — *Прим. ред.*