

## «Внизу много места: приглашение в новую область физики»



Ричард П. Фейнман

Эта стенограмма классической речи, которую [Ричард Фейнман](#) произнес 29 декабря 1959 года на ежегодном собрании [Американского физического общества](#) в [Калифорнийском технологическом институте \(Калифорнийский технологический институт\)](#), была впервые опубликована в [Caltech Engineering and Science](#), том 23:5, февраль 1960 года, стр. 22-36. Он был размещен в Интернете по адресу <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> с их любезного разрешения. [Отсканированный оригинал](#) имеется.

Запись [в Википедии о выступлении Фейнмана](#).

[Информация о премиях Фейнмана](#)

[Найдите на YouTube Ричарда Фейнмана](#)

Отчет о выступлении и о том, как на него отреагировали люди, см. в главе 4 [Nano! Эд Реджис](#), Литтл/Браун, 1995. Отличным техническим введением в нанотехнологии является [«Наносистемы: молекулярные машины, производство и вычисления»](#), К. Эрик Дрекслер, Wiley, 1992.

[Лекции Фейнмана по физике](#) доступны онлайн.

---

Я полагаю, что физики-экспериментаторы часто должны с завистью смотреть на таких людей, как Камерлинг-Оннес, открывших область, подобную низкой температуре, которая кажется бездонной и в которой можно спускаться все ниже и ниже. Тогда такой человек становится лидером и имеет некую временную монополию в научной авантюре. Перси Бриджмен, разработав способ получения более высоких давлений, открыл еще одну новую область и смог войти в нее и все это время вести нас. Развитие все более высокого вакуума было продолжающимся развитием того же рода.

Я хотел бы описать область, в которой мало что сделано, но в которой можно сделать в принципе очень много. Эта область не совсем такая же, как другие, в том смысле, что она не расскажет нам много о фундаментальной физике (в смысле «Что такое странные частицы?»), но она больше похожа на физику твердого тела в том смысле, что она может рассказать нам много интересного о странных явлениях, происходящих в сложных ситуациях. Кроме того, наиболее важным моментом является то, что она будет иметь огромное количество технических приложений.

Я хочу поговорить о проблеме манипулирования вещами и контроля над ними в малом масштабе.

Как только я упоминаю об этом, люди рассказывают мне о миниатюризации и о том, как далеко она продвинулась сегодня. Мне рассказывают об электродвигателях размером с ноготь на мизинце. И, говорят мне, на рынке есть устройство, с помощью которого можно написать «Отче наш» на булавочной головке. Но это ничего; это самый примитивный, неуверенный шаг в том направлении, которое я намереваюсь обсудить. Это ошеломляюще маленький мир, который находится внизу. В 2000 году, когда они оглядываются на этот век, они удивляются, почему только в 1960 году кто-то начал серьезно двигаться в этом направлении.

*Почему мы не можем написать все 24 тома Британской энциклопедии на булавочной головке?*

Посмотрим, что будет задействовано. Головка булавки составляет шестнадцатую часть дюйма в поперечнике. Если увеличить его на 25 000 диаметров, то площадь головки булавки будет равна площади всех страниц Британской энциклопедии. Поэтому все, что нужно сделать, это уменьшить все записи в Энциклопедии в 25 000 раз. Это возможно? Разрешающая способность глаза составляет около 1/120 дюйма — это примерно диаметр одной из маленьких точек на прекрасных полутонковых репродукциях в Энциклопедии. Это, когда вы уменьшаете его в 25 000 раз, все еще имеет диаметр 80 ангстрем — 32 атома в поперечнике в обычном металле. Другими словами, одна из этих точек по-прежнему будет содержать на своей площади 1000 атомов. Таким образом, каждая точка может быть легко отрегулирована по размеру в соответствии с требованиями фотогравировки.

Кроме того, его можно прочитать, если он так написан. Представим, что это написано выпуклыми металлическими буквами; то есть там, где в Энциклопедии черный цвет, мы подняли металлические буквы, которые на самом деле составляют 1/25 000 их обычного размера. Как бы мы это прочитали?

Если бы у нас было что-то, написанное таким образом, мы могли бы прочитать это, используя методы, широко используемые сегодня. (Они, несомненно, найдут лучший способ, когда мы на самом деле запишем его, но чтобы консервативно изложить свою точку зрения, я просто воспользуюсь методами, которые мы знаем сегодня.) Мы вдавливали металл в пластиковый материал и делали из него форму, затем очищали. очень осторожно удалите пластик, испарите кремнезем в пластик, чтобы получить очень тонкую пленку, затем затените его, напылив золото под углом к кремнезему, чтобы все маленькие буквы были видны четко, растворите пластик вдали от пленки кремнезема и тогда рассмотрите его с помощью электронного микроскопа!

Несомненно, если бы вещь была уменьшена в 25 000 раз в виде выпуклых букв на булавке, нам было бы легко читать ее сегодня. Кроме того, нет никаких сомнений в том, что нам будет легко сделать копии мастера; нам просто нужно было бы снова вдавить ту же металлическую пластину в пластик, и у нас была бы еще одна копия.

### ***Как написать очень мелко?***

Следующий вопрос: как мы это *напишем*? У нас сейчас нет стандартной методики для этого. Но позвольте мне утверждать, что это не так сложно, как кажется на первый взгляд. Мы можем перевернуть линзы электронного микроскопа, чтобы не только увеличивать, но и уменьшать. Источник ионов, пропущенный через линзы микроскопа в обратном направлении, мог быть сфокусирован в очень маленькое пятно. Мы могли бы писать этим пятном, как мы пишем в телевизионном электронно-лучевом осциллографе, проходя по линиям и имея настройку, которая определяет количество материала, которое будет осаждаться при сканировании по строкам.

Этот метод может быть очень медленным из-за ограничений пространственного заряда. Будут более быстрые методы. Сначала мы могли бы сделать, возможно, с помощью фотопроцесса экран с отверстиями в форме букв. Затем мы зажжем дугу за отверстиями и протянем через них ионы металлов; тогда мы могли бы снова использовать нашу систему линз и сделать маленькое изображение в виде ионов, которые осаждали бы металл на штифте.

Более простой способ может быть таким (хотя я не уверен, что он сработает): мы берем свет и с помощью оптического микроскопа, работающего в обратном направлении, фокусируем его на очень маленьком фотоэлектрическом экране. Затем электроны уходят от экрана, на который падает свет. Эти электроны фокусируются по размеру линзами электронного микроскопа, чтобы попасть прямо на поверхность металла. Будет ли такой луч вытравливать металл, если он будет работать достаточно долго? Я не знаю. Если это не сработает для металлической поверхности, то должна быть возможность найти какую-то поверхность, которой можно покрыть исходный штифт,

чтобы там, где бомбардируют электроны, произошло изменение, которое мы могли бы распознать позже.

В этих устройствах нет проблем с интенсивностью — не то, к чему вы привыкли при увеличении, когда вам нужно взять несколько электронов и распределить их по все большему и большему экрану; это как раз наоборот. Свет, который мы получаем от страницы, концентрируется на очень небольшой площади, поэтому он очень интенсивен. Несколько электронов, которые исходят от фотоэлектрического экрана, уменьшаются до очень крошечной области, так что они опять же очень интенсивны. Не знаю, почему этого еще не сделали!

Это Британская энциклопедия на булавочной головке, но давайте рассмотрим все книги в мире. Библиотека Конгресса насчитывает около 9 миллионов томов; библиотека Британского музея насчитывает 5 миллионов томов; есть также 5 миллионов томов в Национальной библиотеке во Франции. Несомненно, есть дубликаты, поэтому скажем, что в мире существует около 24 миллионов томов, представляющих интерес.

Что произойдет, если я распечатаю все это в масштабе, который мы обсуждали? Сколько места это займет? Это заняло бы, конечно, площадь около миллиона булавочных головок, потому что вместо 24 томов Энциклопедии их 24 миллиона. Миллион булавочных головок можно разместить на квадрате с тысячей булавок на стороне или на площади около 3 квадратных ярдов. Иными словами, кремнеземная копия с тонкой, как бумага, подложкой из пластика, с которой мы сделали копии, со всей этой информацией, занимает площадь примерно в 35 страниц энциклопедии. Это примерно вдвое меньше страниц, чем в этом журнале. Всю информацию, которую все человечество когда-либо записывало в книги, можно носить с собой в брошюре в руке, а не закодированную,

Что сказала бы наша библиотекаряша в Калифорнийском технологическом институте, бегая из одного здания в другое, если бы я сказал ей, что через десять лет вся информация, которую она из всех сил пытается уследить, — 120 000 томов, сложенных с пола до потолка, ящики, полные карточек, кладовые, полные старых книг — можно хранить всего на одном читательском билете! Когда, например, Бразильский университет обнаружит, что их библиотека сгорела, мы можем послать им копию каждой книги в нашей библиотеке, сняв копию с оригинала за несколько часов и отправив ее по почте в конверте размером не больше или меньше, тяжелее, чем любое другое обычное авиапочтовое письмо.

Итак, название этого доклада — «Внизу полно места», а не просто «Внизу есть место». Я продемонстрировал, что *место* есть — что вы можете уменьшить размер вещей на практике. Теперь я хочу показать, что места *предостаточно*. Я не буду сейчас говорить о том, как мы собираемся это сделать, а только о том, что возможно в принципе, иначе говоря, что возможно по законам физики. Я не изобретаю антигравитацию, которая когда-нибудь станет возможной только в том случае, если законы будут не такими, как мы думаем. Я говорю вам, что можно было бы сделать, если бы законы *были* такими, как мы думаем; мы не делаем этого просто потому, что еще не дошли до этого.

### ***Информация на малом масштабе***

Предположим, что вместо того, чтобы пытаться воспроизвести изображения и всю информацию непосредственно в ее нынешнем виде, мы запишем только информационное содержание в виде кода из точек и тире или чего-то подобного для представления различных букв. Каждая буква представляет шесть или семь «битов» информации; то есть вам нужно всего около шести или семи точек или тире для каждой буквы. Теперь вместо того, чтобы писать все, как я делал раньше, на *поверхности* булавочной головки, я буду использовать и внутреннюю часть материала.

Представим точку маленьким пятнышком одного металла, следующую черточку соседним пятном другого металла и так далее. Предположим, если быть консервативным, что для бита информации потребуется небольшой куб атомов  $5 \times 5 \times 5$ , то есть 125 атомов. Возможно, нам понадобится

сотня с лишним атомов, чтобы гарантировать, что информация не будет потеряна в результате диффузии или какого-либо другого процесса.

Я подсчитал, сколько букв содержится в энциклопедии, и предположил, что каждая из моих 24 миллионов книг имеет размер тома энциклопедии, и подсчитал, сколько в ней битов информации ( $10^{15}$ ). На каждый бит я допускаю 100 атомов. И оказывается, что вся информация, которую человек старательно накопил во всех книгах мира, может быть записана в таком виде в кубе материала шириной в двести дюймов, который является мельчайшим куском пыли, который может быть различимы человеческим глазом. Так что места внизу предостаточно! Не говорите мне о микрофильме!

Этот факт — что огромное количество информации может быть перенесено в чрезвычайно малом пространстве — конечно, хорошо известен биологам и разрешает загадку, которая существовала до того, как мы все это ясно поняли, как могло быть, что в мельчайшей клетке может храниться вся информация для организации такого сложного существа, как мы. Вся эта информация — карие ли у нас глаза, или мы вообще мыслим, или что у зародыша челюстная кость сначала должна развиваться с небольшим отверстием сбоку, чтобы потом сквозь нее мог прорасти нерв, — вся эта информация содержится в очень крошечная часть клетки в виде длинноцепочечных молекул ДНК, в которых примерно 50 атомов используются для одного бита информации о клетке.

### **Улучшенные электронные микроскопы**

Если я написал код размером от  $5 \times 5 \times 5$  атомов до бита, возникает вопрос: как я могу прочитать его сегодня? Электронный микроскоп недостаточно хорош, при максимальной осторожности и усилиях он может разрешать только около 10 ангстрем. Я хотел бы попытаться произвести на вас впечатление, пока я говорю обо всех этих вещах в небольшом масштабе, о важности стократного улучшения электронного микроскопа. Это не невозможно; это не противоречит законам дифракции электрона. Длина волны электрона в таком микроскопе составляет всего  $1/20$  ангстрема. Таким образом, должна быть возможность видеть отдельные атомы. Что хорошего в том, чтобы отчетливо видеть отдельные атомы?

У нас есть друзья в других областях, например, в биологии. Мы, физики, часто смотрим на них и говорим: «Знаете, почему вы, ребята, так мало продвинулись?» (На самом деле я не знаю ни одной области, в которой они добились бы более быстрого прогресса, чем сегодняшняя биология.) «Вы должны использовать больше математики, как это делаем мы». Они могли бы нам ответить — но они вежливы, так что я отвечу за них: «Что бы вы сделали, чтобы мы двигались быстрее, так это сделайте электронный микроскоп в 100 раз лучше».

Каковы самые главные и **фундаментальные проблемы биологии сегодня**? Это такие вопросы, как: Какова последовательность оснований в ДНК? Что происходит, когда у вас есть мутация? Как порядок оснований в ДНК связан с порядком аминокислот в белке? Какова структура РНК; является ли оно одноцепочечным или двухцепочечным, и как он связан по порядку оснований с ДНК? Какова организация микросом? Как синтезируются белки? Куда уходит РНК? Как она сидит? Где сидят белки? Куда деваются аминокислоты? В фотосинтезе, где хлорофилл; как это устроено; при чем тут каротиноиды? Какова система преобразования света в химическую энергию?

На многие из этих **фундаментальных биологических вопросов** очень легко ответить; Вы только *посмотрите на вещь!* Вы увидите порядок оснований в цепочке; вы увидите структуру микросомы. К сожалению, современный микроскоп видит в слишком грубом масштабе. Сделайте микроскоп в сто раз мощнее, и многие проблемы биологии станут намного проще. Я, конечно, утрирую, но биологи наверняка были бы вам очень благодарны — и они предпочли бы это критике, что они должны больше использовать математику.

Теория химических процессов сегодня базируется на теоретической физике. В этом смысле физика составляет основу химии. Но в химии тоже есть анализ. Если у вас есть странное вещество

и вы хотите узнать, что это такое, вы проходите долгий и сложный процесс химического анализа. Анализировать сегодня можно почти что угодно, так что я немного запоздал со своей идеей. Но если бы физики захотели, они могли бы и подкопаться под химиков в проблеме химического анализа. Было бы очень легко провести анализ любого сложного химического вещества; все, что нужно было бы сделать, это посмотреть на него и увидеть, где находятся атомы. Беда только в том, что электронный микроскоп в сто раз слабее. (Позже я хотел бы задать вопрос: могут ли физики что-нибудь сделать с третьей проблемой химии, а именно: синтез? Есть ли *физический* способ синтеза любого химического вещества?)

Причина, по которой электронные микроскопы настолько плохи, заключается в том, что значение  $f$  линз составляет всего 1 часть к 1000; у вас недостаточно большая числовая апертура. И я знаю, что есть теоремы, которые доказывают, что невозможно с осесимметричными линзами стационарного поля получить значение  $f$  больше, чем то-то и то-то; и поэтому разрешающая способность в настоящее время находится на своем теоретическом максимуме. Но в каждой теореме есть предположения. Почему поле должно быть осесимметричным? Почему поле должно быть неподвижным? Разве мы не можем иметь импульсные электронные пучки в полях, движущихся вверх вместе с электронами? Должно ли поле быть симметричным? Я поставил это как вызов: нельзя ли сделать электронный микроскоп более мощным?

### *Чудесная биологическая система*

Биологический пример записи информации в небольшом масштабе вдохновил меня на мысль о том, что это должно быть возможно. **Биология — это не просто запись информации; она что-то делает с этим.** Биологическая система может быть чрезвычайно мала. Многие клетки очень маленькие, но очень активные; они производят различные вещества; они ходят; они шевелятся; и они делают всевозможные удивительные вещи — все в очень малом масштабе. Кроме того, они хранят информацию. Подумайте о возможности того, что мы тоже можем сделать очень маленькую вещь, которая делает то, что мы хотим, — что мы можем создать объект, который маневрирует на этом уровне!

Может быть даже есть экономический смысл в том, чтобы делать вещи очень маленькими. Позвольте мне напомнить вам о некоторых проблемах вычислительных машин. В компьютерах нам приходится хранить огромное количество информации. Тип письма, о котором я упоминал ранее, в котором я записывал все как распределение металла, является постоянным. Гораздо интереснее для компьютера способ записи, стирания и записи чего-то другого. (Обычно это происходит потому, что мы не хотим тратить впустую материал, на котором мы только что написали. Однако, если бы мы могли записать его на очень маленьком месте, это не имело бы никакого значения; его можно было бы просто выбросить после того, как он будет использован. читать. Это не очень дорого для материала).

### *Миниатюризация компьютера*

Я не знаю, как это сделать в малом масштабе на практике, но я знаю, что вычислительные машины очень большие; они заполняют комнаты. Почему бы нам не сделать их очень маленькими, сделать их из маленьких проводов, маленьких элементов — и под маленькими, я имею в виду, *очень маленькие*? Например, диаметр проводов должен составлять 10 или 100 атомов, а диаметр цепей должен составлять несколько тысяч ангстрем. Все, кто анализировал логическую теорию ЭВМ, пришли к выводу, что возможности ЭВМ очень интересны — если бы их можно было усложнить на несколько порядков. Если бы у них было в миллионы раз больше элементов, они могли бы выносить суждения. У них было бы время вычислить, как лучше всего произвести расчет, который они собираются сделать. Они могли бы выбрать метод анализа, который, исходя из их опыта, лучше, чем тот, который мы им дали бы. И во многих других отношениях они будут иметь новые качественные черты.

Если я посмотрю на твое лицо, я сразу узнаю, что видел его раньше. (На самом деле, мои друзья скажут, что я выбрал здесь неудачный пример для предмета этой иллюстрации. По крайней мере,

я узнаю, что это *человек*, а не *яблоко*). Но нет машины, которая с такой скоростью могла бы сфотографировать лицо и даже сказать, что это человек; и тем более, что это тот же человек, которого вы показывали раньше, если только это не точно такая же картина. Если изменилось лицо; если я ближе к лицу; если я дальше от лица; если свет меняется — я все равно это узнаю. Теперь этот маленький компьютер, который я ношу в своей голове, легко может это сделать. Компьютеры, которые мы создаем, не способны на это. Количество элементов в этом моем костяном ящике неизмеримо больше, чем количество элементов в наших «замечательных» компьютерах. Но наши механические компьютеры слишком велики; элементы в этой коробке микроскопические. Я хочу сделать что-то *субмикроскопическое*.

Если бы мы хотели создать компьютер со всеми этими замечательными дополнительными качественными способностями, нам пришлось бы сделать его размером, пожалуй, с Пентагон. Это имеет несколько недостатков. Во-первых, это требует слишком много материала; в мире может не хватить германия на все транзисторы, которые пришлось бы поставить в эту громадную штуку. Существует также проблема тепловыделения и энергопотребления; TVA потребуется для запуска компьютера. Но еще более практическая трудность состоит в том, что компьютер будет ограничен определенной скоростью. Из-за большого размера для передачи информации из одного места в другое требуется конечное время. Информация не может передаваться быстрее скорости света, поэтому, в конечном счете, когда наши компьютеры будут становиться все быстрее и быстрее и все сложнее и сложнее, нам придется делать их все меньше и меньше.

Но есть много места, чтобы сделать их меньше. Я не вижу ничего в физических законах, говорящих о том, что компьютерные элементы нельзя сделать намного меньше, чем они есть сейчас. На самом деле, могут быть определенные преимущества.

### *Миниатюризация путем испарения*

Как сделать такое устройство? Какие производственные процессы мы будем использовать? Одна из возможностей, которую мы могли бы рассмотреть, поскольку мы говорили о письме путем размещения атомов в определенном порядке, состояла бы в том, чтобы испарить материал, а затем испарить изолятор рядом с ним. Затем для следующего слоя выпаиваем еще одну позицию провода, еще один изолятор и так далее. Итак, вы просто испаряетесь до тех пор, пока не получите блок материала, состоящий из элементов — катушек и конденсаторов, транзисторов и т. д. — чрезвычайно мелких размеров.

Но я хотел бы обсудить, просто для развлечения, что есть и другие возможности. Почему мы не можем производить эти маленькие компьютеры так же, как мы производим большие? Почему мы не можем сверлить отверстия, резать, паять, штамповать, формировать различные формы на бесконечно малом уровне? Каковы ограничения относительно того, насколько маленькой должна быть вещь, прежде чем вы больше не сможете ее формовать? Сколько раз, работая над чем-то удручающе крошечным, вроде наручных часов вашей жены, вы говорили себе: «Если бы я только мог научить этому муравья!» Что я хотел бы предложить, так это возможность обучить муравья обучить клеща делать это. Каковы возможности небольших, но подвижных машин? Они могут быть или не быть полезными, но их, безусловно, было бы весело делать.

Рассмотрим любую машину — например, автомобиль — и спросите о проблемах создания бесконечно малой машины, подобной этой. Предположим, что в конкретной конструкции автомобиля нам нужна определенная точность деталей; нам нужна точность, допустим, 4/10 000 дюйма. Если вещи более неточны, чем форма цилиндра и так далее, это не будет работать очень хорошо. Если я сделаю вещь слишком маленькой, мне придется беспокоиться о размере атомов; Я не могу сделать круг из «шариков», так сказать, если круг слишком мал. Итак, если я сделаю ошибку, соответствующую 4/10 000 дюйма, соответствующей ошибке в 10 атомов, то получится, что я могу уменьшить габариты автомобиля в 4 000 раз, примерно — так, чтобы это было 1 мм. через. Очевидно,

Интересно рассмотреть, какие проблемы есть в таких маленьких машинах. Во-первых, когда детали нагружены в одинаковой степени, силы распространяются на площадь, которую вы уменьшаете, так что такие вещи, как вес и инерция, не имеют относительного значения. Прочность материала, другими словами, гораздо больше пропорционально. Напряжения и расширение маховика от центробежной силы, например, будут в той же пропорции, только если скорость вращения будет увеличиваться в той же пропорции, в которой мы уменьшаем размер. С другой стороны, металлы, которые мы используем, имеют зернистую структуру, и это было бы очень неприятно в малых масштабах, потому что материал неоднороден. Пластмасса, стекло и другие аморфные вещества гораздо более однородны, и нам пришлось бы делать наши машины из таких материалов.

Есть проблемы, связанные с электрической частью системы – с медными проводами и магнитными частями. Магнитные свойства в очень малом масштабе не такие, как в большом; есть проблема с доменом. Большой магнит из миллионов доменов можно сделать только в небольшом масштабе с одним доменом. Электрооборудование не будет просто уменьшено; он должен быть переработан. Но я не вижу причин, по которым его нельзя было бы переделать, чтобы он снова работал.

### *Проблемы со смазкой*

Смазка включает в себя несколько интересных моментов. Эффективная вязкость нефти будет все выше и выше по мере того, как мы снижаемся (и если мы увеличим скорость настолько, насколько сможем). Если мы не будем так сильно увеличивать скорость и перейдем с масла на керосин или какую-то другую жидкость, проблема не так уж и плоха. Но на самом деле нам может вообще не понадобиться смазывать! У нас много дополнительной силы. Дайте подшипникам высохнуть; они не будут нагреваться, потому что тепло уходит от такого маленького устройства очень, очень быстро.

Эта быстрая потеря тепла предотвратит взрыв бензина, поэтому двигатель внутреннего сгорания невозможен. Можно использовать и другие химические реакции, высвобождающие энергию при охлаждении. Вероятно, внешний источник электроэнергии был бы наиболее удобен для таких небольших машин.

Какая польза от таких машин? Кто знает? Конечно, маленький автомобиль был бы полезен только для того, чтобы клещи могли разъезжать, и я полагаю, что наши христианские интересы не заходят так далеко. Однако мы отметили возможность изготовления мелких элементов для компьютеров на полностью автоматических заводах, содержащих токарные станки и другие станки на очень мелком уровне. Маленький токарный станок не обязательно должен быть точно таким же, как наш большой токарный станок. Я оставляю вашему воображению улучшение конструкции, чтобы в полной мере использовать свойства вещей в небольшом масштабе и таким образом, чтобы полностью автоматический аспект был бы самым простым в управлении.

Мой друг (Альберт Р. Хиббс) предлагает очень интересную возможность для относительно небольших машин. Он говорит, что, хотя это очень дикая идея, в хирургии было бы интересно, если бы вы могли проглотить хирурга. Вы помещаете механического хирурга внутрь кровеносного сосуда, и он входит в сердце и «осматривается». (Конечно, информация должна быть выдана.) Он выясняет, какой клапан неисправен, берет маленький нож и отрезает его. Другие маленькие машины могут быть постоянно встроены в тело, чтобы помочь какому-то неадекватно функционирующему органу.

Теперь возникает интересный вопрос: как сделать такой крошечный механизм? Я оставляю это вам. Однако позвольте мне предложить одну странную возможность. Знаете, на атомных станциях есть материалы и машины, с которыми они не могут работать напрямую, потому что они стали радиоактивными. Для откручивания гаек и надевания болтов и т. д. у них есть набор ведущих и подчиненных рук, так что, управляя набором рычагов здесь, вы управляете там «руками» и можете поворачивать их туда и сюда, чтобы вы могли справиться с вещами довольно хорошо.

Большинство этих устройств на самом деле устроены довольно просто, в том смысле, что есть особый кабель, похожий на веревку марионетки, который идет прямо от органов управления к «рукам». Но, конечно, вещи также были сделаны с использованием серводвигателей, так что связь между одной вещью и другой является электрической, а не механической. Когда вы поворачиваете рычаги, они включают серводвигатель, который изменяет электрические токи в проводах, что приводит к перемещению двигателя на другом конце.

Теперь я хочу построить почти такое же устройство — систему ведущий-ведомый, работающую от электричества. Но я хочу, чтобы рабы были изготовлены современными крупными машинистами особенно тщательно, чтобы они были вчетверо меньше «рук», которыми вы обычно маневрируете. Итак, у вас есть схема, по которой вы все равно можете делать что-то в масштабе одной четверти — маленькие серводвигатели с маленькими руками играют с маленькими гайками и болтами; они сверлят маленькие отверстия; они в четыре раза меньше. Ага! Поэтому я делаю токарный станок четверть размера; Я делаю инструменты четверть размера; и я делаю в масштабе одной четверти еще один набор стрелок, опять же относительно размера одной четверти! С моей точки зрения, это один шестнадцатый размер. И после того, как я закончу это делать, я подключу напрямую от своей крупномасштабной системы, возможно, через трансформаторы, к серводвигателям шестнадцатого размера. Таким образом, теперь я могу манипулировать руками размера один шестнадцатый.

Ну, отсюда вы поняли принцип. Это довольно сложная программа, но это возможно. Можно сказать, что за один шаг можно пройти гораздо дальше, чем от одного до четырех. Конечно, это все должно быть очень тщательно спроектировано и не обязательно просто делать это как руки. Если бы вы подумали об этом очень тщательно, вы, вероятно, могли бы прийти к гораздо лучшей системе для выполнения таких вещей.

Если вы работаете через пантограф, даже сегодня вы можете получить гораздо больше, чем в четыре раза, даже за один шаг. Но вы не можете работать напрямую через пантограф, который делает меньший пантограф, который затем делает меньший пантограф - из-за неплотных отверстий и неровностей конструкции. Конец пантографа покачивается с относительно большей неравномерностью, чем неравномерность, с которой вы двигаете руками. Спускаясь вниз по этой шкале, я обнаруживал, что конец пантографа на конце пантографа на конце пантографа так сильно трясся, что вообще не делал ничего разумного.

На каждом этапе необходимо повышать точность аппарата. Если, например, изготовив небольшой токарный станок с пантографом, мы обнаружим, что его ходовой винт неравномерен — более неравномерен, чем у крупногабаритного, — мы могли бы притереть ходовой винт к ломающимся гайкам, которые можно крутить обычным способом вперед и назад. пока этот ходовой винт в своем масштабе не станет таким же точным, как наши исходные ходовые винты в нашем масштабе.

Мы можем сделать плоские поверхности, потирая неровные поверхности в трех экземплярах друг о друга — по три пары — и тогда плоские поверхности станут более плоскими, чем то, с чего вы начали. Таким образом, нет ничего невозможного в том, чтобы улучшить точность в малом масштабе с помощью правильных операций. Таким образом, когда мы строим все это, необходимо на каждом этапе повышать точность оборудования, работая какое-то время там внизу, изготавливая точные ходовые винты, блоки Йохансена и все другие материалы, которые мы используем для точной работы машин на месте. высший уровень. Мы должны останавливаться на каждом уровне и производить все необходимое, чтобы перейти на следующий уровень — очень длинная и очень сложная программа. Возможно, вы сможете придумать способ получше, чтобы быстрее перейти к мелкому масштабу.

Тем не менее, после всего этого у вас только что появился маленький токарный станок, в четыре тысячи раз меньший, чем обычно. Но мы думали сделать огромный компьютер, который мы собирались построить, просверлив отверстия на этом токарном станке, чтобы сделать маленькие шайбы для компьютера. Сколько шайб можно изготовить на одном токарном станке?

## *Сто крошечных рук*

Когда я сделаю свой первый набор рабских «рук» в масштабе одной четверти, я собираюсь сделать десять наборов. Я делаю десять наборов «рук» и подключаю их к своим оригинальным рычагам, чтобы они выполняли одно и то же действие одновременно и параллельно. Теперь, когда я делаю свои новые устройства вчетверо меньше, я позволяю каждому изготавливать десять копий, чтобы у меня было сто «рук» в размере 1/16.

Куда я поставлю миллион станков, которые у меня будут? Да ничего в этом нет; объем намного меньше, чем у даже одного полномасштабного токарного станка. Например, если я сделаю миллиард маленьких станков, каждый из которых имеет размер 1/4000 масштаба обычного станка, у меня будет достаточно материалов и места, потому что на миллиард маленьких станков приходится менее 2 процентов материалов одного большого станка.

Понимаете, это ничего не стоит за материалы. Поэтому я хочу построить миллиард крошечных заводов, моделей друг друга, которые одновременно производят, сверлят отверстия, штампуют детали и так далее.

По мере того, как мы уменьшаемся в размерах, возникает ряд интересных проблем. Все вещи не просто уменьшаются пропорционально. Существует проблема, заключающаяся в том, что материалы слипаются благодаря молекулярному (ван-дер-ваальсову) притяжению. Это было бы так: после того, как вы сделали деталь и открутили гайку от болта, она не упадет, потому что сила тяжести не заметна; его даже трудно будет снять с болта. Это было бы похоже на те старые фильмы, где человек с руками, полными патоки, пытается избавиться от стакана воды. Будет несколько проблем такого рода, к которым мы должны быть готовы к проектированию.

## *Перестановка атомов*

Но я не боюсь рассмотреть последний вопрос о том, сможем ли мы в конце концов — в великом будущем — расположить атомы так, как мы хотим; самые *атомы*, до самого низа! Что было бы, если бы мы могли расположить атомы один за другим так, как мы хотим (в пределах разумного, конечно; вы не можете расположить их так, чтобы они, например, были химически неустойчивыми).

До сих пор мы довольствовались копанием земли в поисках полезных ископаемых. Мы нагреваем их и делаем с ними что-то в больших масштабах, и мы надеемся получить чистое вещество с таким-то количеством примесей и так далее. Но мы всегда должны принимать какое-то атомарное расположение, которое дает нам природа. У нас нет ничего, скажем, в «шахматном» расположении, когда атомы примеси расположены точно на расстоянии 1000 ангстрем друг от друга, или в каком-то другом определенном порядке.

Что мы могли бы сделать со многоуровневыми структурами, используя только правильные слои? Какими были бы свойства материалов, если бы мы действительно могли расположить атомы так, как нам хочется? Их было бы очень интересно исследовать теоретически. Я не могу точно представить, что произойдет, но едва ли могу сомневаться в том, что когда мы будем иметь некоторый *контроль* над расположением вещей в малом масштабе, мы получим неизмеримо больший диапазон возможных свойств, которыми могут обладать вещества, и различных вещей, которые мы можем сделать.

Рассмотрим, например, кусок материала, из которого мы делаем маленькие катушки и конденсаторы (или их твердотельные аналоги) на 1000 или 10 000 ангстрем в цепи, расположенные рядом друг с другом на большой площади, с маленькими антеннами, торчащими на расстоянии друг от друга. другой конец – целый ряд цепей. Возможно ли, например, излучать свет целым набором антенн, подобно тому, как мы излучаем радиоволны организованным набором антенн, чтобы передавать радиопрограммы в Европу? То же самое было бы, если бы *свет*

излучался в определенном направлении с очень высокой интенсивностью. (Возможно, такой луч не очень полезен ни с технической, ни с экономической точки зрения.)

Я думал о некоторых проблемах построения электрических цепей в небольших масштабах, и проблема сопротивления серьезна. Если вы построите соответствующую цепь в малом масштабе, ее собственная частота возрастет, так как длина волны уменьшится по мере увеличения масштаба; но глубина скин-слоя уменьшается только с квадратным корнем из коэффициента масштаба, и поэтому задачи сопротивления становятся все более сложными. Возможно, мы сможем победить сопротивление, используя сверхпроводимость, если частота не слишком высока, или другими способами.

### *Атомы в маленьком мире*

Когда мы доберемся до очень, очень маленького мира — скажем, цепей из семи атомов — у нас появится много новых вещей, которые откроют совершенно новые возможности для дизайна. Атомы в малых масштабах ведут себя как *ничто* в больших масштабах, поскольку они удовлетворяют законам квантовой механики. Итак, когда мы спускаемся вниз и возимся там с атомами, мы работаем с другими законами, и мы можем ожидать, что будем делать разные вещи. Мы можем производить по-разному. Мы можем использовать не только цепи, но и некоторые системы, включающие квантованные уровни энергии или взаимодействия квантованных спинов и т. д.

Еще одна вещь, которую мы заметим, это то, что если мы спустимся достаточно далеко, все наши устройства могут производиться массово, так что они будут абсолютно идеальными копиями друг друга. Мы не можем построить две большие машины так, чтобы их размеры были абсолютно одинаковыми. Но если ваша машина имеет высоту всего 100 атомов, вам нужно исправить ее с точностью до половины процента, чтобы убедиться, что другая машина имеет точно такой же размер, а именно 100 атомов!

На атомном уровне у нас есть новые виды сил и новые виды возможностей, новые виды эффектов. Проблемы изготовления и воспроизводства материалов будут совершенно иными. Меня, как я уже сказал, вдохновляют биологические явления, в которых химические силы используются повторяющимся образом для получения всевозможных странных эффектов (одним из которых является автор).

Принципы физики, насколько я понимаю, не возражают против возможности маневрирования вещей атом за атомом. Это не попытка нарушить какие-либо законы; это то, что в принципе можно сделать; но на практике этого не было сделано, потому что мы слишком большие.

В конце концов, мы можем заняться химическим синтезом. К нам приходит химик и говорит: «Послушайте, мне нужна молекула, в которой атомы расположены так-то и так-то; сделайте мне эту молекулу». Химик делает загадочную вещь, когда хочет создать молекулу. Он видит, что у него есть это кольцо, поэтому он смешивает то и это, встряхивает его и возится. И в конце трудного процесса ему обычно удается синтезировать то, что он хочет. К тому времени, когда я заработаю свои устройства, так что мы сможем сделать это по физике, он поймет, как синтезировать абсолютно все, так что это будет действительно бесполезно.

Но интересно, что физику в принципе было бы возможно (я думаю) синтезировать любое химическое вещество, которое запишет химик. Отдайте приказы, и физик их синтезирует. Как? Расположите атомы там, где говорит химик, и вы получите вещество. Проблемы химии и биологии могут быть существенно решены, если наша способность видеть, что мы делаем, и делать что-то на атомарном уровне будет в конечном счете развита — развития, которого, я думаю, нельзя избежать.

Теперь вы можете сказать: «Кто должен это делать и почему они должны это делать?» Что ж, я указал на несколько экономических приложений, но я знаю, что причина, по которой вы это

сделаете, может быть просто для развлечения. Но повеселитесь! Давайте устроим соревнование между лабораториями. Пусть одна лаборатория изготовит крошечный двигатель, который она отправит в другую лабораторию, которая отправит его обратно с вещью, которая помещается внутри вала первого двигателя.

### ***Соревнование средней школы***

Просто для удовольствия и для того, чтобы заинтересовать детей в этой области, я бы предложил, чтобы кто-то, кто имеет некоторый контакт со старшими школами, подумал об организации какого-то школьного конкурса. В конце концов, мы даже не начинали в этой области, и даже дети могут писать меньше, чем когда-либо было написано раньше. У них может быть конкуренция в старших классах. Средняя школа Лос-Анджелеса могла бы послать старшей школе Венеции булавку с надписью «Как дела?» Они возвращают булавку, и в точке над буквой «i» написано: «Не так уж и жарко».

Возможно, это не побуждает вас делать это, и только экономика будет делать это. Затем я хочу что-то сделать; но я не могу сделать это в настоящий момент, потому что я не подготовил почву. Я намерен предложить приз в размере 1000 долларов тому, кто первым возьмет информацию со страницы книги и поместит ее на площадь, на  $1/25\ 000$  меньшую в линейном масштабе, таким образом, чтобы ее можно было прочитать с помощью электронного микроскопа.

И я хочу предложить еще один приз — если я смогу придумать, как это сформулировать, чтобы не запутаться в спорах об определениях — еще 1000 долларов тому, кто первым сделает действующий электродвигатель — вращающийся электродвигатель, которым можно управлять снаружи и, не считая подводных проводов, всего  $1/64$  кубического дюйма.

Я не ожидаю, что претендентам на такие призы придется очень долго ждать.

● Эта страница является частью веб-сайта, [посвященного нанотехнологиям.](#)