

## Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики\*

Р. Ф. Фейнман

*РИЧАРД ФИЛЛИПС ФЕЙНМАН — (1918–1988) — знаменитый американский физик-теоретик, один из создателей квантовой электродинамики (Нобелевская премия 1965 г.)*

*В предлагаемой читателям лекции, прочитанной в Калифорнийском технологическом институте на Рождественском обеде Американского физического общества в канун 1960 г., обсуждаются возможности научно-технического направления, которое в наши дни получило название нанотехнологии. Лекция печатается с некоторыми сокращениями; полный текст доступен в Интернете: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman/html>*

... Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений. Речь идет о проблеме контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. Внизу (т. е. «внизу или внутри пространства», если угодно) располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира.

### Чудеса биологических систем

Поразительны примеры микроскопической, сверхкомпактной записи в биологических системах. В биологии информация не просто записывается, она обрабатывается и используется. Несмотря на то, что сами биологические системы (имеются в виду биоклетки) очень малы, они могут осуществлять весьма разнообразные и очень активные действия: вырабатывать различные вещества, изменять собственную форму и выполнять другие сложные операции. Представьте себе возможности, которые открываются в случае изготовления микроскопических объектов, способных выполнять такие действия!

В сущности, производство таких сверхмалых объектов может быть коммерчески интересным. Например, можно напомнить о некоторых проблемах, связанных с вычислительной техникой. Компьютеры должны хранить огромное количество информации. Очень важно иметь возможность «стирать» предыдущую информацию и записывать на ее место новую, причем всегда жалко уничтожать материал, на котором осуществляется запись. Однако если для записи требуется лишь ничтожный объем легко воспроизводимого вещества, то материал можно не экономить, а просто выбрасывать после считывания информации.

### Миниатюризация компьютеров

Существующие вычислительные машины слишком громоздки, и мне хочется обсудить (не вдаваясь в детали практической реализации предлагаемых идей) возможность существенного изменения их размера. Если,

например, диаметр соединяющих проводов будет составлять от 10 до 100 атомов, то размер любой схемы не будет превышать нескольких тысяч ангстрем. Каждый, кто связан с компьютерной техникой, знает о тех возможностях, которые обещает ее развитие и усложнение. Если число используемых элементов возрастет в миллионы раз, то возможности компьютеров существенно расширятся. Они научатся рассуждать, анализировать опыт и рассчитывать собственные действия, находить новые вычислительные методы и т. п. Рост числа элементов приведет к важным качественным изменениям характеристик ЭВМ.

Рассмотрим, например, следующую проблему. Любой из нас без труда воспринимает изображение или лицо другого человека, однако пока не удалось создать компьютер, который был бы способен достаточно быстро воспринимать изображение и распознавать на нем человеческие лица. Разумеется, компьютеры не могут идентифицировать эти лица (пока они способны лишь сопоставить два абсолютно одинаковых изображения). Между тем человек без каких-либо проблем узнает знакомое лицо через много лет, на разных расстояниях или при разном освещении, т. е. микрокомпьютер, заложенный в наш мозг природой, легко справляется с задачей, совершенно непосильной для самых мощных современных вычислительных систем. Причина этого в том, что число логических элементов внутри нашей маленькой черепной коробки (ее можно рассматривать как выполненный из кости корпус этого микрокомпьютера) значительно превышает число элементов в самых высококлассных современных компьютерах, имеющих внушительные размеры. Дело не в том, что существующие компьютеры слишком велики, а в том, что элементы мозга имеют микроскопические размеры, и это наводит меня на мысль о создании субмикроскопических элементов.

### Миниатюризация методами напыления

Естественно, нужно задуматься о методах создания таких устройств. Как можно изготавливать такие сверхмалые элементы и какие производственные процессы должны для этого применяться? При мысли об использовании заданным образом расположенных атомов вспоминаются возможности применения тонких напыленных

\* Перевод с английского канд. физ.-мат. наук А. В. Хачояна

слоев из атомов проводников и изоляторов. Действительно, уже сейчас мы умеем формировать напылением нужные конфигурации, содержащие все требуемые крошечные элементы электрических схем (катушки, конденсаторы, транзисторы и т. п.) в необходимом порядке.

Однако хочется предложить, хотя бы в шутку, и совсем другие методы. Почему бы, например, не производить крошечные компьютеры теми же методами, какими мы производим большие? Почему бы не научиться обрабатывать микроскопические объекты точно так же, как обрабатываются большие изделия, т. е. научиться штамповать или отливать их, сверлить в них отверстия, резать, паять и т. п.?

Давайте всерьез задумаемся над тем, что мешает создать сверхмалую копию какого-либо механического устройства, например обычного автомобиля? Прежде всего должны возникнуть проблемы с точностью обработки деталей. Предположим, что автомобиль изготавливается с точностью  $10^{-5}$  м (при меньшей точности поршни будут, например, застревать в цилиндрах двигателя и работа машины будет нарушена). При микроскопической обработке следует позаботиться о размерах порядка атомных. Копия автомобиля, уменьшенного в 4000 раз, будет иметь в длину около 1 мм, так что указанная выше стандартная точность обработки деталей двигателя ( $10^{-5}$  м) должна в крошечной модели соответствовать размерам порядка 10 атомов (разумеется, если несколько снизить требования к эксплуатационным характеристикам этого микроавтомобиля, то можно дополнительно уменьшить его размеры).

Обсуждение проблем, связанных с созданием столь малых механизмов, ставит перед нами ряд интересных физических проблем. Уменьшение размеров ведет, естественно, к соответствующему уменьшению массы и площадей контактов, так что некоторые параметры механизмов (например, масса и силы инерции) теряют свое значение. Другими словами, мы можем просто считать, что прочность используемых материалов значительно возросла. Более того, механические напряжения и связанные с ними деформации (возникающие, например, во вращающихся деталях) должны значительно уменьшиться (они останутся неизменными лишь в том случае, если скорость вращения возрастет во столько же раз, во сколько уменьшатся размеры). В то же время следует помнить и о зернистой структуре металлов, из-за чего на микроуровне могут возникнуть серьезные проблемы, обусловленные микронеоднородностью материалов. Поэтому, возможно, сверхмалые механизмы следовало бы изготавливать из аморфных веществ, обладающих высокооднородной структурой (типа пластиков или стекол).

Некоторые проблемы могут возникнуть и при изготовлении деталей электрооборудования (например, медных проводов или магнитных устройств), поскольку магнитные свойства объектов существенно зависят от их размеров (это связано с так называемой доменной структурой магнитных материалов). Поэтому нам придется задуматься о возможностях создания и использования магнитов, состоящих не из миллионов доменов (как принято считать в физике), а из одного единственного домена. Разумеется, схему электропитания автомобиля нельзя просто уменьшить в несколько тысяч раз, а следует существенно изменить. Но я не считаю, что

при этом могут возникнуть какие-то принципиальные осложнения.

### Проблемы смазки

Гораздо более важные проблемы должны возникнуть при обеспечении смазки таких сверхмалых механизмов. Дело в том, что вязкость смазочных масел растет по мере уменьшения размера зазоров (и при соответствующем увеличении скорости). Если не стремиться к очень высоким скоростям и применять вместо масла керосин или другие жидкости, то ситуация может оказаться не безнадежной. Однако я хочу обратить внимание на то, что реально можно обойтись, вероятно, вообще без смазки! Существует масса других возможностей. Например, микроскопические подшипники смогут работать и в сухом состоянии, поскольку выделяющееся в таких устройствах тепло может рассеиваться настолько легко и быстро, что подшипники не будут нагреваться.

Однако мгновенный отвод тепла в микрообъемах не позволит нагреть до достаточной температуры бензин в камере сгорания, вследствие чего в микроавтомобильчиках нельзя использовать привычные двигатели внутреннего сгорания. Придется поискать какие-то другие химические реакции, позволяющие получать энергию при низких температурах (возможно, наилучшим решением станет просто подача электроэнергии от внешнего источника).

### Сотни крошечных манипуляторов

Я думаю о создании системы с электрическим управлением, в которой используются изготовленные обычным способом «обслуживающие роботы» в виде уменьшенных в четыре раза копий «рук» оператора. Такие микромеханизмы смогут легко выполнять операции в уменьшенном масштабе. Я говорю о крошечных роботах, снабженных серводвигателями и маленькими «руками», которые могут закручивать столь же маленькие болты и гайки, сверлить очень маленькие отверстия и т. д. Короче говоря, они смогут выполнять все работы в масштабе 1:4. Для этого, конечно, сначала следует изготовить необходимые механизмы, инструменты и руки-манипуляторы в одну четвертую обычной величины (на самом деле, ясно, что это означает уменьшение всех поверхностных контактов в 16 раз). На последнем этапе эти устройства будут оборудованы серводвигателями (с уменьшенной в 16 раз мощностью) и присоединены к обычной системе электрического управления. После этого можно будет пользоваться уменьшенными в 16 раз руками-манипуляторами! Сфера применения таких микророботов, а также микромашин может быть довольно широкой — от хирургических операций до транспортирования и переработки радиоактивных материалов.

Я надеюсь, что принцип предлагаемой программы, а также связанные с ней неожиданные проблемы и блестящие возможности понятны. Более того, можно задуматься о возможности дальнейшего существенного уменьшения масштабов, что, естественно, потребует дальнейших конструктивных изменений и модификаций (кстати, на определенном этапе, возможно, придется отказаться от «рук» привычной формы), но позволит изготовить новые, значительно более совершенные устройства описанного типа.

Ничто не мешает продолжить этот процесс и создать сколько угодно крошечных станков, поскольку не имеется ограничений, связанных с размещением станков или их материалоемкостью. Их объем будет всегда намного меньше объема прототипа. Легко рассчитать, что общий объем 1 млн уменьшенных в 4000 раз станков (а следовательно, и масса используемых для изготовления материалов) будет составлять менее 2% от объема и массы обычного станка нормальных размеров.

Понятно, что это сразу снимает и проблему стоимости материалов. В принципе, можно было бы организовать миллионы одинаковых миниатюрных заводиков, на которых крошечные станки непрерывно сверлили бы отверстия, штамповали детали и т. п.

По мере уменьшения размеров мы будем постоянно сталкиваться с очень необычными физическими явлениями. Все, с чем приходится встречаться в жизни, зависит от масштабных факторов. Кроме того, существует еще и проблема «слипания» материалов под действием сил межмолекулярного взаимодействия (так называемые силы Ван-дер-Ваальса), которая может приводить к эффектам, необычным для макроскопических масштабов. Например, гайка не будет отделяться от болта после откручивания, а в некоторых случаях будет плотно «приклеиваться» к поверхности и т. д. Существует несколько физических проблем такого типа, о которых следует помнить при проектировании и создании микроскопических механизмов.

### Атомная архитектура

И наконец, рискну предложить еще одну идею (рассчитанную, возможно, лишь на очень далекое будущее), которая мне представляется исключительно интересной. Речь идет о возможности располагать атомы в требуемом порядке — именно атомы, самые мелкие строительные детали нашего мира! Что произойдет, когда мы научимся реально выстраивать или укладывать атомы поштучно в заданной последовательности (разумеется, при этом будут сохраняться какие-то ограничения, например укладка атомов в структуры, соответствующие нестабильным химическим соединениям).

С древних времен человечество старательно добывает из недр Земли минералы, перерабатывает их в огромных количествах и изготавливает из них различные предметы. Мы заботимся о химической чистоте веществ, о составе и уровне примесей и т. д., однако при этом мы всегда работаем с тем набором и распределением атомов, которые предоставляет нам природа. Например, у нас нет возможности изучать или использовать вещество с «шахматной» структурой, где атомы примесей аккуратно располагаются на расстоянии 100 нм друг от друга.

Мы даже не очень задумываемся над тем, что можно сделать со слоистой структурой, состоящей из правильно уложенных слоев атомов. Какими свойствами, вообще говоря, могут обладать материалы, построенные из атомов, которые мы сами будем располагать в заданном порядке? Это очень интересный вопрос с точки зрения чистой теории, и я уверен (хотя, конечно, на эту тему нельзя пока сказать ничего определенного), что, научившись регулировать и контролировать структуры на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные эффекты.

Предположим, например, что мы создали кусочек вещества, внутри которого сформированы маленькие электрические цепи из конденсаторов и катушек индуктивности (или их твердотельные аналоги). Такие цепи, с размером от 100 до 1000 нм, могут быть снабжены антеннами и, будучи взаимосвязаны, могут покрывать довольно значительную площадь. Такие наборы сетей и антенн обычного размера уже в настоящее время широко используются для излучения радиоволн, поэтому существует вероятность, что аналогичный набор «атомарных» антенн будет излучать световые волны или даже точно направленные пучки света.

Применительно к сверхмалым электрическим цепям наиболее важными представляются проблемы, связанные с электрическим сопротивлением. Дело в том, что с уменьшением размеров цепи ее собственная частота возрастает (поскольку длины волн собственных колебаний уменьшаются), однако толщина поверхностного слоя (так называемого скин-слоя) при этом уменьшается пропорционально лишь квадратному корню из характерного размера, вследствие чего при расчете электрического сопротивления должны возникать дополнительные сложности. Возможно, впрочем, что эти проблемы удастся решить, используя какие-либо специальные технические приемы (сверхпроводимость при достаточно низкой частоте и т. п.).

При переходе к изучению самых маленьких объектов предлагаемого типа (например, электрических цепей, составленных из нескольких атомов) мы сталкиваемся со многими разнообразными явлениями, создающими новые возможности. Поведение отдельных атомов подчиняется законам квантовой механики и не имеет аналогов в макроскопическом масштабе, поэтому «внизу» мы будем постоянно наблюдать новые закономерности и эффекты, предполагающие новые варианты использования. Например, очень возможно, что в мире атомов, вместо привычных электрических цепей, мы научимся работать с квантовыми уровнями энергии, с взаимодействиями квантовых спинов и т. п.

Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами, в принципе, вполне реальна и не нарушает никаких законов природы. Практические же трудности ее реализации обусловлены лишь тем, что мы сами являемся слишком крупными и громоздкими объектами, вследствие чего нам сложно осуществлять такие манипуляции.

И, наконец, размышляя в этом направлении, мы доходим до проблем химического синтеза. Сейчас химики используют для синтеза сложные и разнообразные приемы. Как только физики создадут устройства, способные оперировать отдельными атомами, многие методы традиционного химического синтеза могут быть заменены приемами «атомной сборки». Мне представляется особенно интересным то, что физики, в принципе, действительно могут научиться синтезировать любое вещество, исходя из записанной химической формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики — просто «укладывать» атомы в предлагаемом порядке. Развитие техники манипуляции на атомарном уровне (а я убежден, что этого нам просто не избежать) позволит решить многие проблемы химии и биологии. . .