

В канун 1960 года на рождественском обеде, устроенном американским физическим обществом в Калифорнийском технологическом институте, знаменитый физик-теоретик Ричард Фейнман прочитал лекцию о некоторых перспективах развития физики. Предлагаемые Фейнманом идеи были настолько неожиданными и парадоксальными, что кто-то из слушателей даже спросил: «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман?» (Позднее эта фраза стала названием его известной книги.) Но примерно к началу 90-х возникло и стало развиваться целое научно-техническое направление, позднее названное нанотехнологией (строго говоря, его следовало бы называть просто «квантовой технологией»).

К сожалению, из-за большого объема выступления Фейнмана мы печатаем перевод с сокращениями (они относятся к технически уже решенным проблемам фотолитографической записи, миниатюризации компьютеров и т. п.).

Лекция Фейнмана в оригинале называется «There's Plenty of Room at the Bottom». Английское слово «room», помимо общеизвестного «комната, место, пространство», имеет также значение «возможность, шанс», так что заголовков можно было бы перевести как «Внизу полным-полно места и возможностей». Эта лекция представляет собой редкий случай практически

безошибочного научного прогноза (например, названная им «дикой» идея создания крошечных, заглатываемых или имплантируемых медицинских аппаратов на наших глазах превращается в одно из интереснейших направлений диагностики и терапии).



Внизу ПОЛНЫМ-ПОЛНО места:



Художник Н.Крашин



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

Мне всегда казалось, что многие физики-экспериментаторы завидуют ученым вроде Каммерлинг-Оннеса, тем, кому посчастливилось открыть новую область (в данном случае физику низких температур), которая в определенном смысле бездонна, то есть в ней исследователь может бесконечно опускаться вниз, переходя ко все более низким значениям рассматриваемого параметра (например, температуры). Обычно эти ученые надолго остаются лидерами в открытой ими области, получая временно преимущество монопольного изучения целого класса новых физических явлений. Ярким примером такой деятельности может служить судьба Перси Бриджмена, создававшего установки для достижения все более высоких давлений и непрерывно открывавшего новые явления и новые применения обнаруживаемых закономерностей. Аналогичная ситуация складывается в высоковакуумной технике, где стремятся достичь все более высокой степени разреженности.

Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной. Она отличается от других направлений тем, что почти не связана с фундаментальными проблемами физики (то есть в ней не решают проблемы вроде: «Что представляют собой странные частицы?»). Ее можно сравнить скорее с физикой твердого тела, где исследуют множество странных, но чрезвычайно важных и полезных эффектов, происходящих в сложных системах и неожиданных ситуациях.

Я хочу рассмотреть проблему контроля и управления строением вещества в очень малых масштабах. Обычно, стоит мне заговорить на эту тему, как коллеги начинают рассказывать о достижениях миниатюризации, об электродвигателях размером с ноготок или об устройствах, позволяющих записывать текст «Отче наш» на булавочной головке. Сразу отмечу, что все эти достижения кажутся мне пустяковыми и примитивными по сравнению с задачами, которые я буду обсуждать. «Внизу» располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь (году, например, в 2000-м) люди будут удивляться тому, что до 1960 года никто не относился серьезно к исследованиям этого мира.

Давайте, например, обсудим проблему записи на булавочной головке всех 24 томов Британской энциклопедии и выясним для себя (хотя бы в принципе) связанные с этим технические проблемы. Диаметр булавочной головки составляет около 1/16 дюйма, поэтому после увеличения его в 25 000 раз мы получим окружность с площадью, примерно равной общей площади всех страниц Британской энциклопедии. Следовательно, задача может быть сведена к уменьшению в 25 000 раз размеров всех знаков, используемых для записи текста энциклопедии. Каким образом это можно сделать? Разрешающая способность человеческо-

Ричард Фейнман

приглашение в новый мир

го глаза составляет около 1/120 дюйма, что примерно соответствует размеру самой маленькой точки в так называемой автотипической полиграфии с полутонами, используемой при издании Британской энциклопедии. При уменьшении ее в 25 000 раз мы получаем точку диаметром всего в 80 ангстрем, вдоль которого можно уложить 32 атома обычного размера (например, атомов распространенных металлов). Другими словами, на поверхности такой точки будет расположено около одной тысячи атомов, что, кстати, вполне достижимо уже при существующих методах фотогравировки, то есть практически мы действительно можем уже сейчас записать весь текст Британской энциклопедии на поверхности булавочной головки! <>

До сих пор я говорил о Британской энциклопедии, но давайте подумаем вообще о всех книгах на свете! Каковы их общая численность и объем? Библиотека Конгресса США содержит около 9 миллионов книг, библиотека Британского музея и Национальная библиотека Франции — примерно по 5 миллионов. Разумеется, огромные разделы библиотечных фондов разных библиотек просто дублируют друг друга, поэтому общее число книг в мире, представляющих хоть какой-то интерес, можно оценить как 24 миллиона. Поскольку мы вполне можем записать на булавочной головке текст 24 томов Британской энциклопедии, для записи 24 миллионов книг нам потребуется миллион таких головок, то есть площадь квадрата, на каждой стороне которого укладывается около 1000 булавочных головок. Это составляет примерно три квадратных ярда, что соответствует 35 страницам Британской энциклопедии. Другими словами, для изготовления печатной формы при записи всей информации, содержащейся в мировых библиотеках, нам потребуется лишь тонкая пленка (из окиси кремния на полимерной основе) общей площадью около 2,5 м², то есть вы можете, вообще говоря, держать в руках брошюру, содержащую в себе всю накопленную человечеством информацию (причем не в какой-то сложной, закодированной форме, а в виде обычного текста, со всеми оригинальными рисунками, схемами, чертежами и т.д.), и эта брошюра будет отличаться от обычных изданий лишь особо малым форматом печати.

Я вспоминаю, как наша старая библиотекарша в Калифорнийском технологическом институте годами «упорядочивала» информацию, укладывая и переставляя 120 000 книг, громоздившихся на полках и в старых хранилищах, регистрируя их разными способами, заводя на них библиографические карточки и т.д. Интересно, что бы она сказала, узнав, что всю эту информацию можно будет хранить на одном-единственном библиотечном бланке! А если какая-нибудь университетская библиотека (например, в Бразилии) вдруг погибнет при пожаре, то мы сможем просто скопировать и переслать им тексты всех книг нашей библиотеки авиапочтой в обычном конверте.

Напомню, что я назвал свою лекцию «Внизу полным-полно места», а не просто «Внизу есть место». Пока я лишь показал вам, что внизу действительно *есть место*, если только мы на самом деле научимся уменьшать размеры используемых нами объектов. Однако мне хочется доказать также, что места там действительно *полным-полно*. Я буду говорить не о методах, а о том, что можно сделать в принципе, то есть о том, чего можно добиться, используя законы физики. Речь идет не о фантастических идеях вроде антигравитации (возможно, она тоже когда-нибудь станет реальностью, если мы обнаружим некоторые новые, неожиданные закономерности в природных явлениях), а об использовании уже известных нам законов. Мы не продвинулись в этом направлении лишь потому, что не ставили перед собой подобной задачи.

Сжатие информации

До сих пор я говорил лишь о возможностях прямого воспроизведения рисунков, текста и другой информации. Предположим, однако, что нам необходимо записать информацию, используя какой-либо код вроде комбинаций точек и тире. При такой записи каждая буква соответствует примерно 6–7 битам информации, и поэтому для записи одной буквы нам потребуется 6–7 точек или тире соответственно. Давайте задумаемся над тем, что можно сделать, если вместо буквальной записи текста на булавочной головке мы будем вести запись с помощью внутренней структуры материала.

В качестве точки я предлагаю использовать маленькие «пятна» или крапинки из атомов металла одного типа, а в качестве тире — пятна атомов другого металла. Предположим (это достаточно просто и умеренно), что запись одного бита информации требует от нас формирования одного «кубика» металла определенного типа размером $5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$ атомов. Эта сотня атомов (надо еще учесть возможность использования в кубике атомов другого типа) должна гарантировать нам, что информация не будет потеряна из-за атомной диффузии или аналогичных физических процессов. Зная число букв, содержащихся в одном томе Британской энциклопедии, и умножив его на 24 миллиона, я просто вычислил количество «битов информации» во всей мировой литературе, которое оказалось примерно равным 10^{15} . Поскольку для записи одного бита информации нам необходимо примерно 100 атомов, вся заботливо собранная человечеством книжная информация может быть «записана» по указанной системе в кубике металла с размером грани около 1/200 дюйма, представляющем собой крошечную, едва различимую человеческим глазом пылинку! Как видите, я оказался прав — в глубинах пространства, внизу, полным-полно места и возможностей! Стоит ли после этих примеров даже вспоминать о микрофильмах?

Интересно, что сама возможность записи огромного количества информации в исключительно малых объектах давно и хорошо известна, например, биологам. Именно этим объясняется явление, которое веками казалось людям просто чудом, — вся информация, необходимая для создания и развития столь сложных существ, какими мы являемся, содержится внутри крошечной биоклетки. Полная информация о человеке (начиная с цвета глаз и кончая последовательностью формирования в организме косточки в челюсти эмбриона, в результате чего внутри этой косточки формируется крошечный канал для прорастания нерва) содержится в очень небольшой части клетки, а именно в длинной молекуле ДНК, где каждый бит информации записывается посредством комбинации из примерно 50 атомов.

Совершенствуйте электронные микроскопы!

Говоря о возможности кодирования или записи бита информации группой из $5 \cdot 5 \cdot 5$ атомов, мы вновь возвращаемся к вопросу о методах считывания текста, записанного подобным образом. Использование электронных микроскопов для такого считывания пока представляется совершенно бесполезным, поскольку даже у самых современных электронов разрешение составляет около 10 ангстрем. Поэтому я попытаюсь вам доказать важность проблемы значительного совершенствования методов электронной микроскопии. На самом деле, эта проблема вовсе не является сложной



или неразрешимой и не связана законами дифракции электронов. Длина волны электрона в таких микроскопах составляет лишь $1/20$ ангстрема, так что мы вполне можем рассматривать в электронном микроскопе отдельные атомы. Впрочем, вы вправе спросить у меня, а зачем вообще нужно заниматься разглядыванием отдельных атомов?

У всех нас есть друзья, работающие в других областях науки (например, в биологии), и мы, физики, часто шуточно спрашиваем их: «Ребята, а почему ваша наука развивается столь медленно?» (Хочу сразу отметить, что лично я считаю современную биологию наиболее динамично развивающейся наукой!) Иногда физики даже начинают давать биологам советы (например, мы рекомендуем им шире использовать математические методы). Биологи достаточно вежливы и обычно не реагируют на замечания физиков, но я могу ответить за них: «Для прогресса в биологии необходимо прежде всего чтобы *вы*, физики, специально ради нас, биологов увеличили разрешение электронного микроскопа в сто раз».

Важнейшие проблемы современной биологии: какова последовательность звеньев в молекуле ДНК? как эта последовательность связана с аминокислотной последовательностью в РНК? состоит ли молекула РНК из одной или двух цепочек? как связаны последовательности в ДНК и РНК? как происходит синтез белков? как устроены микросомы? каким образом молекула РНК перемещается и располагается в клетке? какова роль аминокислот? В фотосинтезе мы до сих пор не представляем, где располагается хлорофилл и какова его структура, какова роль каротиноидов, каким образом, вообще говоря, при фотосинтезе свет преобразуется в химическую энергию.

Все эти фундаментальные для биологии вопросы можно будет решить, как только мы научимся *видеть изучаемые объекты и процессы*! Тогда вы сможете *просто наблюдать* последовательность оснований в молекулярной цепочке или структуру микросомы. К сожалению, современные микроскопы слишком грубы для подобных исследований. Увеличьте их разрешение в сто раз, и многие биологические задачи сразу станут простыми и легкими. Мне даже кажется, что биологи наконец станут искренне благодарны физикам, если мы начнем давать им новые возможности для работы вместо советов о пользе применения математических методов.

Современная теория химических процессов целиком основана на теоретической физике, так что в каком-то смысле можно считать, что химия вытекает из физики. Однако в химии важную роль играют аналитические методы, и при встрече с новым или неожиданным веществом химик начинает длительный и сложный процесс его идентификации. Сейчас химики умеют анализировать практически все, так что предлагаемая мною идея, возможно, несколько запоздала, однако в принципе, если физики захотят, то они сумеют существенно помочь и химикам-аналитикам. Ведь физики могут легко проанализировать состав любого сложного соединения, просто-напросто определив местоположение и сорт входящих в его состав атомов! Единственная проблема для решения таких задач — нужно примерно в сто раз повысить разрешающую способность электронных микроскопов. В связи с этим чуть позднее я поставлю перед вами гораздо более важный вопрос, а именно: не могут ли физики решить третью важнейшую проблему химии, то есть осуществлять прямой синтез химических соединений? Я подразумеваю *физический* метод синтеза химических веществ!

Недостаточная мощность нынешних электронных микроскопов обусловлена тем, что фокусное расстояние электронных линз (так называемый f -фактор) составляет лишь



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

$1/1000$, так что вы просто не можете обеспечить для них требуемую числовую апертуру. Есть теоремы, в соответствии с которыми для стационарных полей с осевой симметрией вы никогда не можете получить достаточно большие значения f по целому ряду причин (существуют теоретические ограничения на величину разрешающей способности и т. п.). Однако почему, собственно говоря, мы должны пользоваться только осесимметричными полями? Почему эти поля должны быть обязательно стационарными? Разве нельзя использовать электрические пучки с переменной интенсивностью и с электрическим полем, изменяющимся вдоль траектории? Неужели используемые поля могут быть только симметричными? Я специально ставлю эти вопросы, чтобы вы почувствовали вызов, который диктует нам время. Неужели мы не можем создать более мощные электронные микроскопы?

Поразительные примеры микроскопической, сверхкомпактной записи в биологических системах заставляют нас задуматься и о других возможностях. В биологии информация не просто записывается, она обрабатывается и используется. При этом, несмотря на то что сами биосистемы (в частности, я говорю о клетках) очень малы, они могут осуществлять весьма разнообразные и очень активные действия: клетки вырабатывают различные вещества, изменяют собственную форму, энергично перемещаются и выполняют уйму других, весьма замысловатых операций. Вы только представьте себе возможности, которые открывает перед нами изготовление микроскопических объектов, способных выполнять задания и маневры в столь малых масштабах!

Проблемы миниатюризации

При существующем сейчас, в 1960 году, уровне техники компьютер, сравнимый по своим возможностям с человеческим мозгом, должен быть размером с Пентагон! Попробуйте только вообразить себе все сложности создания и эксплуатации такой чудовищной вычислительной машины! Прежде всего может выясниться, что для ее создания требуется слишком много материалов (например, количество германия на нашей планете может оказаться недостаточным для производства нужного количества транзисторов). Я уж не говорю об огромных сложностях, связанных с отводом выделяющего тепла, энергопотреблением и т. п. Однако основные сложности практического использования будут связаны, по-видимому, с конечностью скорости работы такого компьютера, поскольку из-за его огромных размеров необходимо учитывать время, требуемое для передачи информации из одного участка компьютера на другой. Поскольку скорость этой передачи не может превышать скорость света, развитие компьютерной техники с неизбежностью заставит нас решать проблему существенного уменьшения размеров вычислительных устройств. Однако, как я уже говорил выше, у нас есть много возможно-



стей для такого уменьшения, и я не вижу в законах физики никаких принципиальных ограничений, запрещающих или мешающих нам создавать вычислительные элементы малых и сверхмалых размеров.

Естественно, мы должны задуматься о методах создания таких устройств. При мысли об использовании определенным образом расположенных атомов прежде всего вспоминаются возможности напыления тонких слоев из атомов проводников и изоляторов. Действительно, уже сейчас мы умеем формировать напылением нужные нам конфигурации, содержащие все требуемые крошечные элементы электрических схем (катушки, конденсаторы, транзисторы и т. п.) в необходимом порядке.

Однако я хочу предложить вам, хотя бы в шутку, и совсем другие методы. Почему бы нам, например, не производить крошечные компьютеры теми же методами, какими мы производим большие? Почему бы нам не научиться обрабатывать микроскопические объекты точно так же, как мы обрабатываем большие изделия, то есть штамповать или отливать их, сверлить в них дырки, резать, паять и т. п.? В чем, собственно говоря, состоят ограничения на размер отливаемых деталей? Наверняка многие из нас, намучившись с ремонтом очень мелкого механизма (представьте, что вы пытаетесь починить изящные женские часики!), мечтали о том, что было бы очень здорово выдрессировать муравьев и научить их выполнять всякие мелкие операции. Напрягите воображение, я предлагаю вам нечто гораздо более интересное и сложное, а именно попытаться выучить механизмы-муравьи методам дрессировки совсем крошечных клещей или букашек для сборки нужных нам деталей! Мы должны создавать крошечные, но подвижные и активные механизмы. Независимо от практической ценности, проектирование и создание таких микроскопических роботов было бы очень забавным и интересным занятием!

Давайте всерьез задумаемся над тем, что мешает нам создать сверхмалую копию какого-либо механического устройства, например обычного автомобиля? Прежде всего у нас, разумеется, возникнут проблемы с точной обработкой деталей. Предположим, что автомобиль изготавливается с точностью 4/10000 дюйма (при меньшей точности, например, поршни будут застревать в цилиндрах двигателя). При микроскопической обработке точность должна быть порядка размеров атома, поскольку подшипники должны иметь шарики соответствующих размеров. Копия автомобиля, уменьшенного в 4000 раз, будет иметь 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 мы чуть-чуть снизим требования к эксплуатационным характеристикам этого крошечного авто, то сможем еще уменьшить его размеры).

Создание столь малых механизмов ставит перед нами ряд интересных физических проблем. Во-первых, уменьшение размеров ведет, естественно, к соответствующему уменьшению веса и площадей контактов, так что некоторые параметры механизмов (например, вес 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 (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). С другой стороны, 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 запросто уменьшить в несколько тысяч раз, ее следует существенно изменить, однако 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 размеров (и при соответствующем увеличении скорости). Если мы не будем стремиться к очень высоким скоростям и вместо масла возьмем керосин или другие жидкости, то ситуация может оказаться не безнадежной. Однако я хочу обратить ваше внимание на то, что смазка, вероятно, вообще окажется ненужной! Существует масса других возможностей. Например, наши микроскопические подшипники смогут работать в сухом состоянии, поскольку выделяющееся в микроскопических устройствах тепло будет рассеиваться так легко и быстро, что отпадает проблема нагрева подшипников вообще.

В то же время мгновенный отвод тепла в микрообъемах не позволит нам нагреть до достаточной температуры бензин в камере сгорания, поэтому мы не сможем пользоваться в микроавтомобильчиках привычными двигателями внутреннего сгорания и нам придется поискать какие-то другие химические реакции, позволяющие получать энергию при низких температурах (не исключено, что наилучшим решением станет просто подача электроэнергии от внешнего источника).

Пока совершенно неясно, какое практическое применение могут найти такие микромашины. Конечно, было бы забавно следить за гонками букашек на автомобильчиках, но столь трогательная забота об этих крошках не есть наша главная цель. Однако нас не может не заинтересовать возможность автоматизированного производства микродеталей для компьютеров на микрозаводах, где установлены сверхминиатюрные станки (например, токарные). Конечно, такие станки, по изложенным выше причинам, не могут быть просто уменьшенными копиями обычных, крупномасштабных прототипов. Я предлагаю поразмыслить о процессах механической обработки на микроуровне, позволяющих с максимальной пользой употребить открывающиеся возможности.

Мой друг Альберт Р.Хиббс предложил весьма интересный вариант использования таких маленьких механизмов. Идея на первый взгляд кажется довольно дикой и заключается в создании крошечного механического «хирурга» (которого пациент может просто проглотить). Попав через кровеносную систему, например, в сердце пациента, такой микрохирургический робот начинает «оглядываться», изучать и анализировать состояние сердечной мышцы (разумеется, информация при этом подается наружу), а затем микроланцетом производит необходимую опера-



цию на клапане сердца. Вы можете представить себе также крошечные автоматы, которые вводятся в больные органы и постоянно работают там, осуществляя лечение или профилактику.

Подумайте о методах изготовления таких механизмов, а я пока подброшу вам еще одну сумасшедшую идею. Вы наверняка слышали о сложных проблемах, связанных с транспортировкой и переработкой высокорadioактивных материалов, опасных для обслуживающего персонала. На атомных установках для таких работ используют сложные системы рычагов и манипуляторов с дистанционным управлением, заменяющие руки оператора и способные, например, затянуть гайку или открутить болт.

Сотня крошечных рук-манипуляторов

Предположим, что я изготовил набор из десяти рук-манипуляторов, уменьшенных в четыре раза, и присоединил их проводами к исходной системе рычагов управления, так что все эти манипуляторы одновременно и точно повторяют мои действия. Затем я вновь изготовлю набор из десяти манипуляторов в четверть нормальной величины. Естественно, что первые десять манипуляторов при этом изготовят $10 \cdot 10 = 100$ штук манипуляторов (уменьшенных, однако, уже в 16 раз!), так что на этом этапе я получу в свое распоряжение сотню манипуляторов, уменьшенных в 100 раз.

Ничто не мешает продолжить этот процесс и создать сколько угодно крошечных станков, поскольку это производство не имеет ограничений, связанных с размещением станков или их материалоемкостью. Их объем будет всегда намного меньше объема прототипа. Легко рассчитать, что общий объем миллиона уменьшенных в 4000 раз станков (а следовательно, и вес используемых для изготовления материалов) составит менее 2% от объема и веса обычного станка.

Понятно, что это сразу снимает и проблему стоимости материалов. В принципе мы могли 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 нам приходится встречаться в нашей 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 в некоторых случаях не будет отваливаться от болта после скручивания, а плотно «приклеится» к поверхности и т. д. (вспомните старые кинокомедии, в которых герой с измазанными липкой патокой руками пытается избавиться, например, от стакана с водой). Существует несколько физических проблем такого рода, о которых следует помнить при проектировании и создании микроскопических механизмов.

Атомная сборка и перестановка атомов

И наконец, я рискну предложить вам еще одну идею (рассчитанную, возможно, лишь на очень далекое будущее), которая мне



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

представляется исключительно интересной. Речь идет о возможности располагать в требуемом порядке атомы — 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, поскольку вы не можете, например, уложить атомы в структуру нестабильного химического соединения.)

На протяжении всей своей истории человечество старательно добывает из недр Земли минералы, перерабатывает их в огромных количествах и изготавливает из них разные предметы. Мы заботимся о химической чистоте веществ, о составе и количестве 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 1000 ангстрем 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, об этом 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, размером от 1000 до 10 000 ангстрем, можно снабдить антеннами, и, будучи взаимосвязанными, они могут покрывать довольно значительную площадь. Системы этого типа, но обычного размера уже сегодня широко используют для излучения радиоволн, поэтому есть вероятность, что аналогичный набор «атомарных» антенн будет излучать световые волны или даже точно направленные пучки света (я не исключаю, разумеется, и того, что подобные устройства могут оказаться совершенно бесполезными по экономическим или техническим причинам).

Когда я думаю о сверхмалых электрических цепях, наиболее важными мне 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 поверхности, так называемого скин-слоя, при этом уменьшается пропорционально лишь квадратному корню из характерного размера, вследствие чего при расчете сопротивления должны воз-



ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОСТИ



никать дополнительные сложности. Впрочем, не исключено, 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 с кучей разнообразных явлений, создающих 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 вероятно, что в мире атомов вместо привычных электрических цепей мы научимся работать с квантовыми уровнями энергии, с взаимодействиями квантовых спинов и т. п.

Кроме того, при достаточном уменьшении масштаба мы сможем организовать массовое производство абсолютно одинаковых изделий или деталей. Вспомните, что мы никогда не умели создавать крупномасштабные механизмы с совершенно одинаковыми размерами. Однако если вам удалось изготовить машинку из заданного числа атомов (например, точно из 100 штук атомов в высоту), то ничто не мешает вам изготовить еще одну точную копию, укладывая буквально то же число атомов в требуемом измерении!

На атомарном уровне мы сталкиваемся с новыми физическими силами, с новыми эффектами и новыми возможностями, поэтому и проблемы производства или воспроизводства веществ, материалов и изделий должны выглядеть совсем по-иному. Меня, в частности, вдохновляют возможности, заложенные в биологических явлениях и процессах, когда под воздействием химических сил возникают весьма сложные и неожиданные структуры (например, автор этой работы!).

Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами 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. Химики будут приходить к нам, физикам, с конкретными заказами: «Слушай, друг, не сделаешь ли ты молекулу с таким-то и таким распределением атомов?» Сами химики используют для изготовления молекул сложные и даже таинственные операции и приемы. Обычно для синтеза намеченной молекулы им приходится довольно долго смешивать, взбалтывать и обрабатывать разные вещества. Как только физику создадут устройство, способное оперировать отдельными атомами, вся эта их деятельность станет ненужной и они смогут просто заказывать у физиков требуемые структуры.

Мне представляется особенно интересным то, что физики действительно могут научиться синтезировать любое вещество, исходя из написанной на бумаге формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики – просто «укладывать» атомы в нужном порядке. Развитие техники манипуляции на атомарном уровне (а я убежден, что этого нам не избежать) позволит решить огромное число проблем химии и биологии.

Конечно, вы вправе спросить у меня: «А зачем, собственно, мы должны заниматься этими странными проблемами?» Можно перечислить целый ряд важных экономических предпосылок, однако я лично убежден, что мы, физики, могли бы решать такие задачи просто ради интереса или забавы. Давайте начнем с забавы! Устроим соревнование между институтами и лабораториями, и пусть, например, одна лаборатория посылает другой крошечный электродвигатель, а затем получает его обратно с каким-то усовершенствованием или с дополнительной микродеталькой, добавленной в конструкцию рабочего вала.

Для развлечения и повышения общего интереса к предлагаемым исследованиям я бы рекомендовал организовать небольшой конкурс среди учащихся университетов и колледжей. В конце концов, с чего-то следует начинать, а молодежь вполне можно заинтересовать, например, проблемой микрозаписи. Пусть студенты из Лос-Анджелеса пошлют студентам в Венецию булавку, на острие которой написано: «Круто? Как вам это нравится?» Булавка может вернуться назад с короткой припиской: например, внутри точки над буквой «i» появится надпись: «Ничего особенного!»

Конечно, может оказаться и так, что одного интереса окажется недостаточно и серьезное развитие области удастся наладить лишь на экономической основе. Я не могу сейчас обсуждать эту проблему подробно, но (в качестве самого простого шага) обещаю выплатить приз в 1000 долларов тому парню, который сумеет первым записать информацию со страницы книги с уменьшением линейного масштаба в 25 000 раз таким образом, чтобы текст можно было затем прочитать, пользуясь электронным микроскопом.

Кроме того, я предлагаю еще один приз (надеюсь, что мне не придется вступать в дискуссию относительно постановки задачи) в 1000 долларов тому, кто первым изготовит нормально работающий электродвигатель с внешним управлением, объем которого без учета соединительных проводов не превышает 1/64 кубического дюйма. И я уверен, что претенденты на получение этих призов объявятся довольно скоро.

Перевод с английского

А.В.Хачояна