

# 4. НАНОТЕХНОЛОГИИ

---

ВСЕ ИЗ НИЧЕГО?



Принципы физики, насколько я их понимаю, ничего не говорят о невозможности переставлять в объектах атомы буквально по одному.

Ричард Фейнман, нобелевский лауреат

Нанотехнология дала нам инструменты, при помощи которых можно задействовать в игре самые мелкие кубики природы — атомы и молекулы.

Все состоит из них, и возможность создавать новые вещи ничем, судя по всему, не ограничена.

Хорст Штормер, нобелевский лауреат

Значение бесконечно малого бесконечно велико.

Луи Пастер

Владение орудиями труда — вот то высшее достижение, что отличает человека от животных. Согласно классической мифологии, процесс овладения ими начался, когда Прометей, сжалившись над несчастьями людей, украл из топки Вулкана драгоценный огонь и подарил его им. Но этот поступок разгневал богов, и Зевс, чтобы наказать людей, пустился на хитрость. Он попросил Вулкана сковать из металла шкатулку и красивую женщину. Вулкан создал статую, получившую имя Пандора, а затем волшебным образом оживил ее и наказал ей никогда не открывать шкатулку. Конечно, однажды Пандора не выдержала и из любопытства открыла шкатулку, выпустив оттуда в мир все ветры хаоса, все несчастья и страдания. В шкатулке осталась лишь надежда.

Таким образом, из божественной топки Вулкана вышли как мечты, так и страдания рода человеческого. Сегодня мы разрабатываем принципиально новые машины, «скованные»

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

из отдельных атомов. Эти машины должны стать нашими «первичными инструментами». Но что они принесут человечеству: пламя познания или ветры хаоса?

На протяжении всей истории человечества нашу судьбу определяло владение инструментами. Когда много тысяч лет назад были изобретены лук и стрелы, это означало, что человек научился посылать метательное оружие на гораздо большее расстояние, чем это можно сделать руками, что увеличило эффективность охоты и расширило доступные человеку источники пищи. Когда около 7000 лет назад человек научился обрабатывать металл, это означало, что со временем он сможет заменить землянки и хижины великолепными прочными домами, которые вознесутся над землей. Вскоре на месте лесов и пустынь начали расти великие империи, построенные металлическими инструментами.

В настоящий момент человечество стоит на пороге овладения совершенно новым типом орудий труда, намного более мощным, чем все, чем мы владели до сих пор. На этот раз мы обретаем власть над самими атомами, из которых состоит все вокруг. Возможно, еще в этом столетии мы получим самое важное орудие, какое только можно вообразить. Речь идет о нанотехнологиях, которые позволят нам манипулировать отдельными атомами. Это событие может стать началом второй промышленной революции, поскольку молекулярное производство создаст материалы, о которых сегодня мы можем только мечтать, — сверхпрочные, сверхлегкие, с поразительными электрическими и магнитными свойствами.

Нобелевский лауреат Ричард Смолли (Richard Smalley) утверждает: «Величайшая мечта нанотехнологии — научиться строить из атомов, как из кирпичиков». Филип Кукес (Philip Kuekes) из компании Hewlett-Packard говорит: «Вообще, цель не в том, чтобы просто сделать компьютер размером с пылинку. Идея в том, чтобы научиться делать простые компьютеры размером с бактерию. Тогда можно будет упаковать нечто столь же

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

мощное, как ваш настольный компьютер, до размеров пылинки».

И это не просто надежды мечтателей с горящими глазами. Правительство США воспринимает все это очень серьезно. В 2009 г., учитывая громадный потенциал нанотехнологий в медицине, промышленности, авионавтике и коммерческом применении, в рамках Национальной инициативы в области нанотехнологий на исследования было выделено 1,5 млрд долларов. В докладе по нанотехнологиям правительственного Национального научного фонда говорится: «Нанотехнологии могут в перспективе сделать человека умнее, обеспечить устойчивое улучшение материалов, воды, энергии и пищи, защитить от неизвестных бактерий и вирусов...»

В конце концов может оказаться, что от нанотехнологий зависит состояние мировой экономики и судьба целых стран. Около 2020 г. или вскоре после него закон Мура начнет давать сбои, а возможно, и совсем перестанет действовать. Развитие компьютерной отрасли остановится. Мировой экономике будет грозить хаос, если физики не найдут подходящей замены для кремниевых транзисторов в чипах наших компьютеров. Решение этой проблемы, вероятно, будет найдено в области нанотехнологий.

Не исключено также, что при помощи нанотехнологий удастся, возможно еще до конца этого века, создать машину, которой прежде могли владеть только боги, — машину, способную создавать что угодно почти из ничего.

## Квантовый мир

Первым внимание научного сообщества к этой новой области физики привлек нобелевский лауреат Ричард Фейнман, задавший обманчиво простой вопрос: «Насколько маленькой можно сделать машину?» Вопрос этот не был чисто академическим. Компьютеры постепенно становились все меньше и меньше, меняя лицо промышленности, и делалось все более очевидным,

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

что ответ на этот вопрос может оказать громадное влияние на общество и экономику.

В пророческой лекции, прочитанной в 1959 г. в Американском физическом обществе и озаглавленной «Там, внизу, полно места», Фейнман сказал: «Интересно, что физик в принципе может (как мне кажется) синтезировать любое химическое вещество по написанной химиком формуле. Пишите заказ, и физик все сделает. Каким образом? Поставит атомы на те места, которые укажет химик, и таким образом построит вещество». Фейнман сделал вывод, что возможны машины, состоящие из отдельных атомов, но новые законы физики делают их создание трудным, хотя и не невозможным, делом.

Так что в конечном итоге может оказаться, что судьбы мировой экономики и множества стран зависят от интуитивно непонятных и даже нелепых на взгляд непосвященного принципов квантовой теории. В обычной жизни нам представляется, что законы физики при переходе к более мелкому масштабу не меняются. Из фильмов типа «Дорогая, я уменьшил детей» и «Невероятно уменьшающийся человек» зритель получает ошибочное впечатление о том, что для миниатюрных человечков законы природы выглядели бы точно так же, как для нас. К примеру, в одной из сцен диснеевского фильма уменьшившиеся герои едут на муравье во время грозы. Капли падают на землю и образуют крошечные лужицы, в точности как в нашем мире. На самом же деле капли будут крупнее муравьев, так что муравей, столкнувшись с упавшей каплей, увидит большую водяную полусферу. Водяная полусфера не растекается, потому что сила поверхностного натяжения удерживает ее, как накинутая сверху сеть. В нашем мире поверхностное натяжение воды невелико и не играет существенной роли; мы его просто не замечаем. Но в масштабе муравья поверхностное натяжение приобретает громадное значение.

(Более того, если вы попытаетесь пропорционально увеличить муравья, так чтобы он стал размером с дом, у вас возникнет

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

серьезная проблема: ноги такого муравья-гиганта не выдержат и сломаются. Дело в том, что при увеличении муравья его вес будет расти намного быстрее, чем сила его ног. Если вы сделаете муравья в десять раз длиннее, его объем, а значит, и масса вырастут в  $10 \times 10 \times 10 = 1000$  раз. Но сила мускулов пропорциональна их толщине, т. е. площади сечения, и увеличится всего лишь в  $10 \times 10 = 100$  раз. Следовательно, гигантский муравей станет в 10 раз слабее, в относительных единицах, своего реального прототипа. Это означает также, что Кинг-Конг, вместо того чтобы терроризировать Нью-Йорк, просто рассыпался бы, попытавшись влезть на небоскреб.)

Фейнман отметил, что на атомном уровне доминируют другие силы, к примеру водородные связи и силы Ван-дер-Ваальса, порождаемые электрическим взаимодействием между атомами и молекулами. Многие физические свойства веществ определяются именно этими силами.

(Для наглядной демонстрации этого рассмотрим простой вопрос: почему на дорогах северо-востока США\* так много выбоин и ухабов? Каждую зиму вода проникает в крохотные трещинки в асфальте; при замерзании вода расширяется, асфальт начинает крошиться и образуется выбоина. Но сама мысль о том, что вода при замерзании расширяется, противоречит житейскому здравому смыслу. А вода действительно расширяется, и причиной тому — водородные связи. Молекула воды по форме напоминает букву V, причем в основании располагается атом кислорода. Молекула воды несет легкий отрицательный заряд у основания и легкий положительный заряд «наверху», где располагаются атомы водорода. Поэтому при замораживании воды ее молекулы выстраиваются в правильную пространственную решетку и застывают, а между ними остается пустое пространство. Молекулы воды образуют пространственные шестиугольники, расстояние между атомами в которых больше, поэтому лед объемнее воды. По этой же причине снежинки обладают

---

\* И России, конечно. — Прим. пер.

шестисторонней симметрией, а лед плавает в воде, хотя по идее должен бы в ней тонуть.)

### Проходить сквозь стены

Помимо поверхностного натяжения, водородных связей и сил Ван-дер-Ваальса на атомном уровне существуют и странные квантовые эффекты. Как правило, в повседневном быту мы не видим, как работают квантовые силы. На самом же деле они всюду. Известно, к примеру, что внутри атомы по большей части пусты, и по идее ничто не должно нам мешать проходить сквозь стены. Между ядром в центре атома и электронными оболочками ничего нет, там вакуум. Если увеличить атом до размеров футбольного поля, поле окажется пустым, поскольку его ядро при этом приобретет примерно размеры песчинки.

(Мы иногда удивляем студентов простой демонстрацией. Берем счетчик Гейгера, кладем перед студентом, а со спины к нему подносим безвредную крупинку радиоактивного вещества. Студентов поражает, что какие-то частицы пронизывают его тело насквозь, вызывая щелчки счетчика, как если бы занимаемый его телом объем был по большей части пуст. А ведь так и обстоит дело в действительности!)

Но если мы с вами по большей части пусты, то почему мы не можем проходить сквозь стены? В фильме «Привидение» герой Патрика Суэйзи, убитый соперником, превращается в призрак. Каждый раз, когда он пытается прикоснуться к своей бывшей невесте, которую играет Деми Мур, у него ничего не получается. Его руки проходят сквозь обычное вещество; он понимает, что утратил вещественную составляющую и теперь просто плавает, не замечая твердых объектов. В одной сцене он засовывает голову в движущийся вагон метро. Поезд несется мимо, голова героя торчит сквозь летящую стену, но он ничего не чувствует. (Фильм не объясняет, почему сила тяжести не заставляет героя провалиться сквозь пол и дальше до самого центра Земли. Судя

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

по всему, привидения могут проходить сквозь любые вещи, кроме твердого пола.)

И все же, почему мы не можем, подобно привидениям, проходить сквозь твердые объекты? Ответ заключается в одном любопытном квантовом явлении. Принцип запрета Паули гласит, что в одной квантовой системе два электрона не могут существовать в одном и том же квантовом состоянии. Поэтому при сближении два почти идентичных электрона отталкиваются друг от друга. Именно поэтому объекты представляются нам твердыми, что, вообще говоря, иллюзия. Реальность заключается в том, что вещество по большей части пусто.

Садясь на стул, мы думаем, что касаемся его поверхности. На самом же деле мы зависаем чуть выше под действием электрических и квантовых сил стула и плаваем меньше чем в нанометре над сиденьем. Это означает, что любое «касание» условно, мы не можем добиться непосредственного контакта. Атомные силы гарантируют, что между двумя объектами всегда остается какое-то расстояние. (Это означает также, что если бы мы научились нейтрализовать каким-то образом на время принцип запрета, то могли бы проходить сквозь стены. Однако никто не знает, как можно было бы это сделать.)

Квантовые силы не только не дают атомам сталкиваться друг с другом, но и связывают их в группы — молекулы. Представьте на мгновение, что атом похож на крохотную Солнечную систему с центральным светилом и обращающимися вокруг него планетами. При встрече двух таких систем планеты либо начнут сталкиваться между собой, либо разлетятся в разные стороны, а сами системы перестанут существовать. Солнечные системы не могут оставаться стабильными при столкновениях, так что по идее атомы при столкновениях друг с другом должны были бы прекращать существование.

На самом деле при сближении два атома либо упруго отскакивают друг от друга, либо соединяются в стабильную молекулу. Вообще, если из атомов могут образовываться стабильные

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

молекулы, то только потому, что некоторые электроны могут принадлежать одновременно двум атомам. С точки зрения здравого смысла такая ситуация представляется нелепой. Если бы электроны подчинялись интуитивно понятным законам Ньютона, это было бы невозможно. Но принцип неопределенности Гейзенберга гласит: мы не можем точно определить, где находится электрон. Вместо того чтобы кружить маленькой планетой вокруг атомного ядра, он оказывается размазан по общей электронной оболочке двух атомов, что и удерживает их вместе.

Иными словами, если «отключить» квантовую теорию (точнее, квантовые законы), все молекулы рассыплются при столкновениях и любой объект (в том числе и человеческое тело) превратится в облачко элементарных частиц. Именно квантовая теория объясняет, почему атомы могут существовать и сцепляться между собой, образуя твердое вещество, вместо того чтобы рассыпаться на отдельные частицы.

(Кстати говоря, поэтому вложенные миры невозможны. Некоторые воображают, что наша Солнечная система или даже Галактика на самом деле, возможно, является всего лишь атомом какой-то другой гигантской вселенной. Именно такой мир показан в финальной сцене фильма «Люди в черном»: вся известная нам Вселенная оказывается на самом деле лишь атомом шарика в руках у какого-то иномирного существа. Однако с точки зрения науки такая ситуация невозможна, потому что с изменением масштаба законы природы тоже меняются. Законы, которым подчиняются атомы, сильно отличаются от законов, которым подчиняются галактики.)

Вот некоторые принципы квантовой теории, которые непосвященному человеку покажутся слишком заумными:

- невозможно знать одновременно скорость частицы и ее положение в пространстве — здесь всегда присутствует неопределенность;

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

- частицы могут в определенном смысле находиться в двух местах одновременно;
- все частицы существуют как смесь различных состояний; к примеру, вращающиеся частицы могут представлять собой смесь частиц, оси которых вращаются одновременно вверх и вниз;
- вы можете исчезнуть здесь и появиться где-то в другом месте.

Все эти утверждения на первый взгляд звучат нелепо. Сам Эйнштейн однажды сказал: «Чем успешнее становится квантовая теория, тем глупее она выглядит». Никто не знает, откуда берутся такие странные законы. Ученые просто постулировали их — объявили истиной без всяких объяснений. Есть лишь одна вещь, которую можно сказать в оправдание квантовой теории: она верна. Ее верность измерена с точностью до одной десяти-миллиардной, а это значит, что квантовая теория — самая точная и успешная физическая теория всех времен.

Однако в повседневной жизни мы не наблюдаем ничего, что хотя бы отдаленно напоминало перечисленные выше невероятные явления. Дело в том, что мы с вами состоим из множества триллионов атомов, и квантовые эффекты в некотором смысле усредняются и становятся незначимыми.

### Двигать отдельные атомы

Ричард Фейнман мечтал о дне, когда физик сможет построить любую молекулу, собрав ее по «чертежу», атом за атомом. Тогда, в 1959 г., это казалось невозможным, но сегодня эта мечта в какой-то мере стала реальностью.

У меня была возможность наблюдать все это вблизи во время посещения Альмаденского исследовательского центра IBM в Сан-Хосе, штат Калифорния. Я приехал туда посмотреть на замечательный инструмент — сканирующий туннель-

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

ный микроскоп, позволяющий ученым увидеть отдельные атомы и даже воздействовать на них. Это устройство изобрели Герд Бинниг (Gerd Binnig) и Генрих Рорер из IBM, за что в 1986 г. им была присуждена Нобелевская премия. (Помню, когда я учился в школе, учитель говорил нам, что мы никогда не сможем увидеть атомы. Он слишком малы для этого, говорил он. К тому моменту я уже твердо решил стать ученым-атомщиком. Я понимал, что собираюсь посвятить жизнь изучению того, что никогда не увижу собственными глазами. Но сегодня мы можем не просто увидеть атомы, но даже поиграть с ними при помощи атомного пинцета.)

На самом деле сканирующий туннельный микроскоп — вовсе не микроскоп. Скорее он чем-то напоминает старинный фонограф. Тонкая игла (с кончиком, который должен заканчиваться одним атомом в вершине пирамидки) медленно проносится над поверхностью анализируемого материала. С иглы через изучаемый образец на базу инструмента проходит слабый ток. Всякий раз, когда атом на кончике иглы проходит над атомом образца, величина электрического тока слегка меняется. После нескольких проходов машина распечатывает поразительную вещь — очертания самого атома. При помощи точно такой же иглы микроскоп может не только регистрировать атомы, но и двигать их. Таким образом можно составить из атомов на образце буквы — IBM — и даже соорудить примитивную машину из атомов.

(Еще одно недавнее изобретение — атомно-силовой микроскоп, способный дать поразительное трехмерное изображение атомной решетки. В атомно-силовом микроскопе также используется игла с очень тонким кончиком, но на кончик этот направляют луч лазера. Проходя над поверхностью изучаемого образца, игла дрожит от взаимодействия с атомами вещества, и это движение регистрируется оптическим датчиком на основе лазерного луча.)

Я обнаружил, что передвигать отдельные атомы совсем не сложно. Я сидел перед экраном компьютера и видел на нем

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

поверхность, состоящую из белых сфер по 2–3 см в поперечнике, напоминающих мячик для пинг-понга. На самом деле каждый шарик на экране обозначал отдельный атом на поверхности образца. Я поместил курсор на один из атомов и перетащил его мышкой на другое место. Затем я нажал кнопку, которая запускает новое сканирование. Микроскоп проделал требуемую операцию. Картинка на экране изменилась, демонстрируя мне, что один из белых шариков передвинулся ровно в ту точку, которую я указал.

Процесс перестановки одного атома в любую указанную точку занимал всего одну минуту. Через полчаса я увидел, что составленные мной из атомов буквы уже можно прочесть на экране. Через час я научился составлять довольно сложные узоры примерно из десяти атомов.

Сознание того, что я собственными руками практически двигаю отдельные атомы — т. е. делаю то, что когда-то считалось абсолютно невозможным, — стало для меня настоящим потрясением.

## МЭМС и наночастицы

Хотя нанотехнологии на сегодняшний день находятся в младенческом состоянии, они уже породили стремительно развивающуюся коммерческую отрасль — химические покрытия. Если на изделие нанести путем распыления тончайший — в несколько молекул толщиной — слой нужного химического вещества, можно добиться множества полезных эффектов. С одной стороны, при помощи такого покрытия можно защитить изделие, к примеру, от ржавчины, а с другой — улучшить его, к примеру изменить в нужную сторону оптические свойства. Разработано множество различных покрытий: они оберегают нашу одежду от пятен, улучшают экраны компьютеров, усиливают режущие кромки металлообрабатывающих инструментов, защищают от царапин. В ближайшие годы на рынок поступит

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

множество новых товаров с микропокрытиями, призванными улучшить их потребительские свойства.

Конечно, нанотехнология — еще очень молодая отрасль науки. Но одна из ее сторон начинает входить в жизнь практически каждого человека; на ее базе уже выросла глобальная индустрия с годовым оборотом 40 млрд долларов. Речь о микроэлектромеханических системах (МЭМС); в эту категорию попадает множество самых разных вещей, от струйных картриджей, сенсоров для автомобильных мешков безопасности и дисплеев до гироскопов для машин и самолетов. МЭМС — это крошечные машины, такие маленькие, что могут с легкостью уместиться на кончике иглы. Изготавливают их при помощи той же технологии травления, которая уже несколько десятилетий используется в производстве микросхем. Но вместо того, чтобы вытравливать транзисторы, инженеры здесь вытравливают крохотные механические компоненты, создавая столь крохотные детали машин, что без микроскопа вы их просто не увидите.

Ученые сделали атомную версию абака — древнего азиатского счетного приспособления, очень напоминающего обычные конторские счеты. В 2000 г. в Цюрихской исследовательской лаборатории ИВМ изготовили атомную версию этого несложного прибора; в процессе его изготовления отдельные атомы передвигали и устанавливали на место при помощи сканирующего микроскопа. Вместо деревянных костяшек, которые в счетах двигаются по жестким проволочкам, в атомном абаке были использованы фуллерены — углеродные структуры, по форме напоминающие футбольный мяч в 5000 раз тоньше человеческого волоса.

В Корнеллском университете ученые пошли еще дальше и создали атомную гитару. У этой гитары шесть струн, каждая толщиной в 100 атомов. На срез человеческого волоса можно уложить в ряд двадцать таких инструментов. При этом гитара настоящая, ее струны, как струны ее макроскопического

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

прототипа, можно щипать (хотя звук, разумеется, будет слишком высоким и потому неслышимым для человеческого уха).

Но самое распространенное на сегодняшний день практическое применение этой технологии — автомобильные мешки безопасности, в которых установлены крохотные МЭМС-акселерометры, способные почувствовать резкое торможение машины. МЭМС-акселерометр представляет собой микроскопический шарик на пружинке или крохотном рычажке. Когда вы резко ударяете по тормозам, внезапное отрицательное ускорение заставляет шарик качнуться и порождает крохотный электрический заряд. Заряд служит детонатором для химического взрыва, при котором за  $1/25$  долю секунды высвобождается большое количество азота. Эта технология уже спасла множество жизней.

## БЛИЖАЙШЕЕ БУДУЩЕЕ (с настоящего момента по 2030 г.)

### Наномашины в наших телах

В ближайшем будущем следует ожидать появления новых разновидностей наноустройств, которые, возможно, совершат настоящий переворот в медицине; в качестве примера можно назвать наномашины, предназначенные для курсирования по кровотоку. В фильме «Фантастическое путешествие» команду ученых и специальный корабль вроде подводной лодки уменьшили до размеров красного кровяного тельца — эритроцита. Затем все они предприняли путешествие по кровеносным сосудам и мозгу пациента и пережили в его теле множество приключений. Одна из целей нанотехнологии — создание молекулярных охотников, которые будут целенаправленно искать раковые клетки и аккуратно уничтожать их, оставляя здоровые клетки нетронутыми. Авторы научной фантастики давно придумали такое устройство — молекулярное судно, курсирующее в кро-

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

вяном потоке в непрерывном поиске раковых клеток. Когда-то критики считали подобное абсолютно невозможным, а высказанные фантастами идеи называли пустыми мечтаниями фантазеров.

Тем не менее отчасти эта мечта сегодня уже реализована. В 1992 г. Джером Шентаг (Jerome Schentag) из университета Буффало изобрел умную таблетку, о которой мы упоминали ранее, — крохотный инструмент размером с настоящую таблетку, которую надо глотать и за продвижением которой затем можно следить при помощи электронного прибора. В нужный момент — и в нужном месте — ей можно подать команду на выброс лекарств. Созданы также умные таблетки с телекамерами для фотографирования внутренностей на пути их прохождения через желудок и кишечник. Движением таких таблеток можно отчасти управлять при помощи специальных магнитов. Таким образом, это устройство можно точно подвести к опухоли или полипу. В будущем, возможно, ученые научатся проделывать при помощи подобных устройств небольшие хирургические операции, удалять «лишние детали» и брать пробы на биопсию изнутри, не разрезая кожи.

Еще более миниатюрны так называемые наночастицы — молекулы, способные доставить противораковые лекарства к конкретной мишени; если этого удастся добиться, новая технология произведет революцию в лечении рака. Наночастицы можно сравнить с молекулярными «умными бомбами», их назначение — доставлять химический груз в конкретное точно заданное место и активировать там, что, естественно, резко снизит побочные эффекты. Если простая «бомба» бьет по всему вокруг, включая и здоровые клетки, то умная действует избирательно и сбрасывает свой химический груз только на раковые клетки.

Каждый, кому довелось испытать чудовищные побочные эффекты химиотерапии, оценит громадный потенциал наночастиц в деле уменьшения человеческих страданий. Хи-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

миотерапия промывает все тело смертельно опасными ядами, убивая раковые клетки лишь чуть эффективнее, чем обычные. У человека во время химиотерапии возникает целый спектр побочных эффектов, включая тошноту, потерю волос, слабость и т. п. Они настолько серьезны и настолько тяжело переносятся, что некоторые раковые больные согласны скорее умереть от болезни, чем подвергнуться подобной пытке.

Наночастицы полностью изменяют ситуацию. Лекарства, к примеру противораковые, будут помещать внутрь молекулы, имеющей форму капсулы. Затем наночастицы с лекарством запустят в кровоток, но высвободится их химическое содержимое только тогда, когда наночастица отыщет место назначения.

Главная особенность наночастиц — их размер: от 10 до 100 нм. Они слишком велики, чтобы проникать в клетки крови, поэтому от нормальных клеток крови, или кровяных телец, наночастицы будут просто отскакивать. А вот раковые клетки выглядят иначе: их стенки пронизаны большими порами неправильной формы. Соответственно, наночастицы могут свободно заходить внутрь и доставлять лекарство по назначению, оставляя здоровые ткани нетронутыми. Врачам не потребуется сложная система управления, которая могла бы привести наночастицы внутри человеческого тела к цели. Они сами естественным образом аккумулируются в определенных типах злокачественных опухолей.

Красота этого метода в том, что он не требует сложного и опасного лечения, которое чревато серьезными побочными эффектами. Просто сами наночастицы должны быть правильного размера: слишком большие, чтобы нападать на нормальные клетки, но в самый раз для проникновения в клетки раковые.

Еще один пример — наночастицы, созданные учеными компании BIND Bioscience в Кембридже, штат Массачусетс. Эти наночастицы сделаны из полимолочной кислоты и кополимолочной/гликолевой кислоты, которые способны удерживать лекарства внутри молекулярной сетки. Это лекарство является

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

полезным грузом наночастицы. Проводниками наночастицам служат пептиды, покрывающие их и целенаправленно сцепляющиеся с целевыми клетками.

В этой работе особенно привлекает тот факт, что наночастицы формируются сами, без сложных заводов и химических комбинатов. Достаточно смешать различные химические вещества постепенно, в правильном порядке и точно соблюдаемых условиях, — и наночастицы «соберутся» сами.

«Поскольку самосборка не требует проведения множества сложных химических реакций, получается, что наночастицы очень просты в производстве... И мы можем производить их килограммами, чего прежде никто не делал», — говорит представитель BIND Омид Фарохзад, врач, преподающий в Медицинской школе Гарвардского университета. Эти наночастицы уже доказали свою эффективность в опытах на крысах — в борьбе против рака простаты, груди и легких. При помощи цветных красителей несложно убедиться, что наночастицы собираются в нужном органе и высвобождают свой полезный груз так, как нужно врачам. Через несколько лет начнутся клинические испытания на людях.

### Электрошок для раковых клеток

Не исключено, что наночастицы смогут не только разыскивать раковые клетки и доставлять к ним нужные химические вещества, но и уничтожать их на месте без посторонней помощи. Принцип прост. Наночастицы способны поглощать свет определенной частоты. Если сфокусировать на них луч лазера, они нагреваются или начинают вибрировать, разрушая клеточные стенки всех оказавшихся поблизости раковых клеток и уничтожая их. Таким образом, ключевая задача здесь — подвести наночастицы вплотную к раковым клеткам.

Несколько групп исследователей, работающих в этой области, уже создали первые образцы. Так, ученые Аргоннской наци-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

ональной лаборатории и Чикагского университета разработали наночастицы из диоксида титана (диоксид титана — распространенное вещество, присутствующее, в частности, в солнцезащитных кремах). Выяснилось, что эти наночастицы можно привязать к антителу, которое естественным образом ищет в организме раковые клетки определенного типа, так называемые мультиформные глиобластомы. Наночастицы подъезжают к раковым клеткам на этих антителах, как в такси. Затем на пять минут включается белый свет, раковые клетки нагреваются и в конце концов погибают. Исследования показывают, что таким образом можно уничтожить 80% раковых клеток.

Эта же группа исследователей разработала еще один способ убивать раковые клетки. Они создали крошечные магнитные диски, способные сильно вибрировать. Стоит подвести эти диски к раковым клеткам и включить небольшое внешнее магнитное поле — и вибрация дисков разрушит стенки раковых клеток. При испытаниях всего за 10 минут вибрации погибло 90% раковых клеток.

Такой результат не случаен. Ученые Университета Калифорнии в Санта-Крус разработали очень похожую систему с использованием золотых наночастиц. Эти частицы, всего лишь 20–70 нм в поперечнике, представляют собой сферическую оболочку толщиной в несколько атомов. Кроме того, ученые использовали определенный пептид, о котором известно, что его влечет к раковым клеткам кожи. При испытаниях на мышах этот пептид сцеплялся с золотыми наночастицами, после чего направлялся к раковым клеткам кожи. Если затем подсветить эти частицы инфракрасным лазером, они смогут нагреть клетки опухоли и тем самым разрушить их. «Примерно как если бы вы положили раковую клетку в горячую воду и сварили ее. Чем больше тепла выделяют наши металлические наносферы, тем лучше», — говорит Цзинь Чжан (Jin Zhang), один из исследователей.

Так что в будущем методики с использованием нанотехнологий смогут обнаруживать колонии раковых клеток

за несколько лет до того, как из них сформируется опухоль, а циркулирующие в крови наночастицы будут их уничтожать. Сегодня прорабатываются теоретические основы подобных методов лечения.

### Наномашины в нашей крови

Если продвинуться еще на шаг, то вместо наночастицы мы получим нанокар (наноавтомобиль) — устройство, которым можно по-настоящему управлять в его путешествиях по телу. Если наночастицы вводят в кровоток и оставляют в покое, то скоростью и направлением движения нанокаров можно управлять, примерно как машинками с пультом.

Джеймс Тур (James Tour) и его коллеги из Университета Райса разработали первый нанокар. Вместо колес у этой крохотной машинки — четыре фуллерена. Одна из задач, к решению которых стремятся исследователи, состоит в том, чтобы молекулярная машина могла буксировать по кровотоку крошечного робота, убивая по пути раковые клетки или доставляя жизненно необходимые лекарства точно к месту назначения.

Основная проблема состоит в том, что у нанокаров нет двигателя. Ученые изобретают все более сложные молекулярные машины, но вот создать молекулярный двигатель пока никому не удается, и это главный камень преткновения. Мать-природа решила эту задачу при помощи особой молекулы, аденозинтрифосфата (АТФ), которая и служит всем живым существам источником энергии. Именно за счет энергии этой молекулы на Земле существует жизнь; она ежесекундно обеспечивает энергией каждое движение наших мышц. Энергия запасается в молекуле АТФ за счет внутренних атомных связей. Однако создать синтетический аналог такому аккумулятору оказалось весьма сложно.

Томас Маллук (Thomas Mallouk) и Айюсман Сен (Ayusman Sen) из Университета штата Пенсильвания все же смогли най-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

ти потенциальное решение этой проблемы. Они создали нанокар, способный передвигаться со скоростью десятки микрон в секунду, т. е. примерно с такой же скоростью, с какой передвигается большинство бактерий. (Сначала они изготовили из золота и платины наностержень размером с бактерию, который затем поместили в водный раствор перекиси водорода. При этом на обоих концах наностержня началась химическая реакция, в результате которой протоны стали двигаться от одного конца стержня к другому. Поскольку двигались они в электрическом поле, создаваемом дипольными молекулами воды, возникла сила, толкающая наностержень вперед. Пока в воде присутствует перекись водорода, стержень будет двигаться.)

Подобные наностержни можно двигать при помощи магнитов. Ученые встроили в них никелевые диски, и теперь стержни, как стрелка компаса, разворачиваются вдоль линий магнитного поля. Двигая рядом обычный магнит с холодильника, можно направить наностержни в любую сторону.

Еще один способ заставить молекулярную машину двигаться — осветить фонариком пункт ее назначения. Свет способен разлагать молекулы на положительные и отрицательные ионы (фотодиссоциация). Ионы затем с разной скоростью диффундируют сквозь среду, создавая тем самым электрическое поле, а поле, в свою очередь, притягивает молекулярные машины. Таким образом, направив в определенное место фонарик, можно заставить молекулярные машины двигаться туда.

Нечто подобное я видел при посещении лаборатории Сильвена Мартеля (Sylvain Martel) в Монреальском политехническом институте в Канаде. Он работал над идеей использовать для направленного перемещения крохотного чипа в кровотоке жгутики обычных бактерий. До сих пор ученым не удается соорудить атомный движитель вроде того, что можно найти в жгутике бактерии. Мартель задался вопросом: если нанотехнология не в состоянии изготовить такое устройство, то почему не использовать жгутики настоящих живых бактерий?

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

Для начала он изготовил микропроцессор размером меньше точки в конце этого предложения. Затем вырастил группу бактерий. Он сумел поместить около восьмидесяти бактерий с одной стороны чипа (условно говоря, сзади), так что они

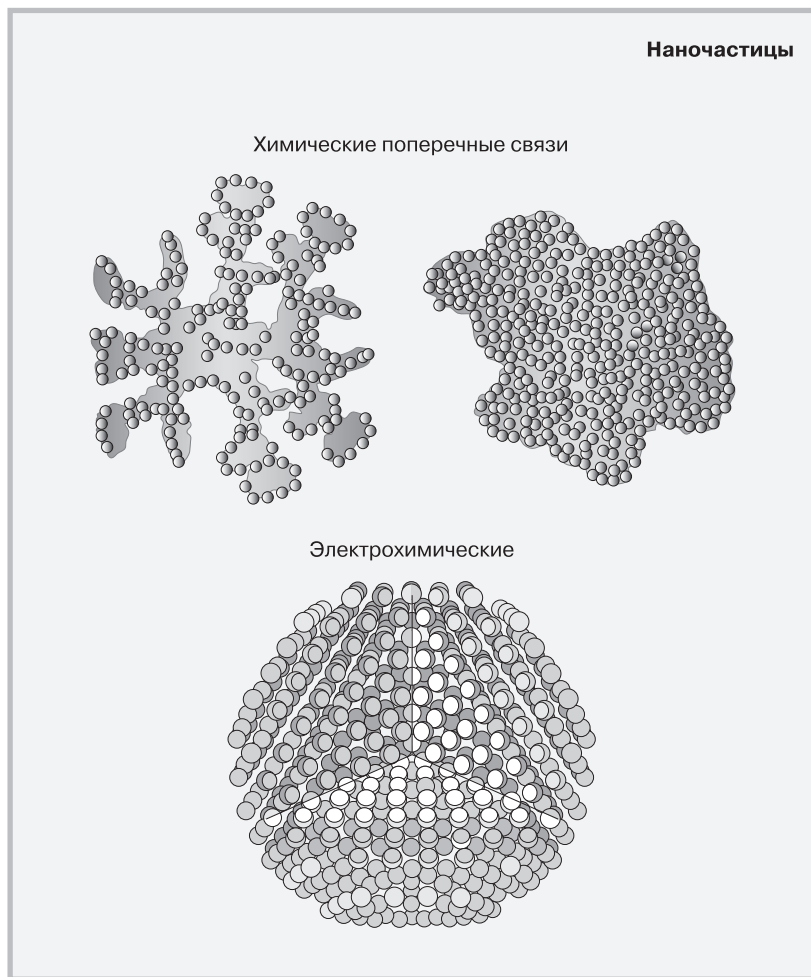


Рисунок Джеффри Хорда (Jeffrey L. Ward)

Молекулярные роботы будут патрулировать нашу кровь, распознавая и уничтожая раковые клетки и патогены. Это будет настоящая революция в медицине

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

вынуждены были играть роль живого винта и толкать микропроцессор вперед. А поскольку бактерии эти были слегка магнитными, Мартель мог при помощи внешних магнитов направить их в любую нужную ему сторону.

Мне и самому удалось попробовать себя в роли погонщика бактерий. Я смотрел в микроскоп и видел там крохотный чип, который толкали перед собой несколько бактерий. Когда я нажимал кнопку, включался магнит, и чип начинал двигаться вправо. Когда я отпускал кнопку, чип останавливался, а затем начинал беспорядочно дергаться из стороны в сторону. Таким образом, я действительно управлял его движением. При этом я представлял себе, что когда-нибудь, возможно, врач нажатием подобной кнопки будет управлять движением наноботов в венах пациента.

Можно вообразить себе будущее, когда хирургию полностью заменят молекулярные машины, которые под управлением магнитов будут свободно передвигаться по системе кровообращения, собираться у больного органа, а затем высвободить лекарства или проводить хирургическую операцию. Технологии, при которых требовалось разрезать кожные покровы человека, могут полностью уйти в прошлое. К примеру, магниты могли бы подвести наномашины к сердцу пациента, где требуется устранить блокаду артерий.

### ДНК-процессоры

Как мы уже упоминали в главе 3, в будущем в нашей одежде, теле и ванной комнате будут присутствовать крохотные датчики, постоянно следящие за здоровьем хозяина и способные распознать болезни, такие как рак, за несколько лет до того, как они начнут представлять опасность. Ключ к этому — ДНК-чип, или ДНК-процессор, который, по обещаниям ученых, станет настоящей «микросхемой-лабораторией». Подобно трикордерам «Звездного пути», эти крохотные датчики будут за несколько

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

минут проводить полный комплекс медицинских анализов и выдавать результат.

Сегодня проверка на рак — это долгий, дорогой и трудоемкий процесс, часто занимающий не одну неделю. Понятно, что количество пациентов, которых медики могут проверить, при таких условиях сильно ограничено. Однако компьютерные технологии меняют эту ситуацию. Ученые уже создают устройства, способные быстро и дешево распознать рак по определенным биомаркерам, выделяемым раковыми клетками.

Все та же технология травления, которая используется в производстве микросхем, позволяет вытравить на подложке такой микроскопический рельеф, при помощи которого можно будет распознавать специфичные для раковых клеток ДНК-последовательности.

Технология травления позволяет встроить в микросхему фрагменты ДНК. Эти фрагменты способны связываться с конкретными генными последовательностями, вылавливая их из текущей жидкости. Затем при помощи лазера можно быстро просканировать всю прилегающую область и найти соответствующие гены. Таким образом, гены не приходится считывать по одному, как раньше, а можно сканировать целыми тысячами за раз.

В 1997 г. компания Affymetrix выпустила на рынок первый коммерческий ДНК-чип, способный быстро проанализировать 50 000 ДНК-последовательностей. Уже в 2000 г. за несколько тысяч долларов можно было сделать 400 000 ДНК-проб. К 2002 г. цена упала до 200 долларов, при этом микросхемы-анализаторы стали еще более мощными. Цены, согласно закону Мура, продолжают падать и упадут до нескольких долларов.

Шейна Келли (Shana Kelley), профессор Медицинской школы при Университете Торонто, говорит: «Сегодня для оценки клинически значимого образца раковых биомаркеров вам потребуется целая комната компьютеров, и результата придется подождать. Мы научились измерять биомолекулы

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

при помощи электронного чипа размером с кончик пальца». Она предвидит день, когда все оборудование, необходимое для анализа, уменьшится до размеров сотового телефона. Создание микросхемы-лаборатории будет означать, что каждый сможет использовать в собственной ванной химическую лабораторию, которую сегодня можно найти в хорошей больнице или в университете, только втиснутую в один-единственный чип.

Врачи Массачусетской больницы общей практики сконструировали собственный биочип, в 100 раз более мощный, чем все, что есть сегодня на рынке. Обычно, когда в крови появляются циркулирующие опухолевые клетки, их там очень немного — меньше чем одна на миллион, — но со временем они, получив возможность беспрепятственно размножаться, могут убить человека. Новый биочип достаточно чувствителен, чтобы обнаружить циркулирующие в крови опухолевые клетки, даже если их там всего одна на миллиард. В результате экспериментально доказано, что этот чип способен всего по нескольким миллилитрам крови распознать рак легких, простаты, поджелудочной железы, груди и кишечника.

При помощи стандартной технологии травления изготавливают чипы, на которых размещается 78 000 микроскопических стержней (высотой 100 микрон каждый). Под электронным микроскопом эта поверхность выглядит как вырубка с торчащими пеньками. Каждый выступ покрывают антителом к адгезивной молекуле эпителиальных клеток, которая присутствует во многих типах раковых клеток, но отсутствует в обычных клетках. Эта молекула необходима раковым клеткам для взаимодействия друг с другом при формировании опухоли. Если пропускать кровь по чипу, циркулирующие в крови опухолевые клетки прилипают к шпешкам. При клинических испытаниях этот чип успешно распознал рак у 115 из 116 пациентов.

Помимо всего прочего, широкое распространение таких чипов-лабораторий радикально изменит стоимость диагностики болезней. В настоящее время биопсия или химический ана-

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

лиз может стоить несколько сотен долларов и продолжаться несколько недель. В будущем она, скорее всего, будет обходиться буквально в копейки и занимать несколько минут. Скорость и доступность диагностики рака резко вырастут. Можно представить, к примеру, что каждый раз при чистке зубов мы будем проходить тщательную проверку на множество разных болезней, включая рак.

Лерой Худ (Leroy Hood) и его коллеги из Вашингтонского университета создали чип размером около 4 см, способный обнаруживать определенные белки по одной-единственной капле крови. Белки — строительный материал жизни. Все в нас — мышцы, кожа, волосы, гормоны и ферменты — состоит из белков. Разработка технологии поиска белков, характерных для различных болезней вроде рака, могла бы привести к созданию системы раннего предупреждения. В настоящее время такой чип стоит всего 10 центов и может определить какой-то конкретный белок в течение десяти минут; можно сказать, что он в несколько миллионов раз более эффективен, чем предыдущая система. Худ считает, что наступит день, когда чип-анализатор сможет быстро проверить сотни тысяч белков и предостеречь человека от множества болезней за несколько лет до того, как они приобретут сколько-нибудь серьезный характер.

### Углеродные нанотрубки

Довольно наглядное представление о мощи нанотехнологий можно получить при взгляде на углеродные нанотрубки. В принципе известно, что они прочнее стали и к тому же проводят электричество, что сразу наводит на мысль об углеродных компьютерах. Но есть и проблема: для настоящей прочности такие трубки должны быть цельными, а самый длинный на сегодняшний день фрагмент чистого углеродного волокна составляет в длину всего несколько сантиметров. Но когда-нибудь из углеродных нанотрубок можно будет делать целые компьютеры и иные молекулярные структуры.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

Углеродные нанотрубки состоят из отдельных атомов углерода, соединенных между собой в форме трубки. Представьте себе обычную садовую сетку, где каждое проволочное перекрестье представляет собой атом углерода. А теперь скатайте сетку в рулон — и получите геометрию углеродной нанотрубки. Такие нанотрубки возникают естественным образом всякий раз, когда образуется печная сажа, но ученым никогда не приходило в голову, что атомы углерода могут связываться еще и в такой неожиданной геометрии.

Поистине чудесными свойствами углеродные нанотрубки обязаны своей атомной структуре. Как правило, любой твердый кусок вещества, скажем камень или кусок дерева, представляет собой конгломерат из множества перекрывающихся структур. В такой смеси легко возникают трещины, а значит, такие предметы легко ломаются. Из этого следует, что прочность вещества определяется несовершенством его молекулярной структуры. Но не всегда это несовершенство заключается в нарушениях правильной структуры. К примеру, графит тоже представляет собой чистый углерод, но мы знаем, что это очень мягкий материал, поскольку он состоит из слоев углеродных атомов. Слои связаны между собой слабее, чем атомы внутри слоя, где каждый атом связан с тремя соседними, и могут легко скользить друг по другу.

Алмаз — это тоже чистый углерод, но одновременно это самый прочный природный минерал. Атомы углерода в алмазе организованы в плотную кристаллическую решетку с сильными связями, что и придает этому минералу его феноменальную прочность. Так же и углеродные нанотрубки обязаны своими поразительными свойствами правильной атомной структуре.

Углеродные нанотрубки постепенно прокладывают себе путь в промышленность. Благодаря хорошей проводимости из них можно делать кабели для мощных линий электропередач. Благодаря прочности их можно использовать для создания материалов более прочных, чем кевлар.

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

Однако самое важное, возможно, применение углеродные нанотрубки найдут в компьютерном деле. Углерод — один из нескольких кандидатов на замену кремния в качестве основы компьютерных технологий. Не исключено, что когда-нибудь будущее мировой экономики будет зависеть от ответа на вопрос: что заменит кремний?

### Послекремниевая эпоха

Мы уже говорили, что закон Мура — фундамент информационной революции — не будет работать вечно. Не исключено, что страна, которой удастся первой найти подходящую замену кремнию, будет определять судьбы мира.

Когда рухнет закон Мура? Этот вопрос уже давно сотрясает мировую экономику. В 2007 г. самого Гордона Мура спросили, сможет ли знаменитый закон, названный его именем, работать всегда. «Разумеется, нет», — сказал Мур и предсказал, что его действие прекратится через десять–пятнадцать лет.

Примерно так же оценил перспективы компьютерной отрасли Паоло Гардини, сотрудник фирмы Intel, отвечающий за внешние исследования. Поскольку Intel Corporation задает тон всей полупроводниковой промышленности, слова Гардини подверглись тщательному анализу. В 2004 г. на ежегодной конференции Semicon West он сказал: «Мы понимаем, что можем продержаться на законе Мура еще по крайней мере лет пятнадцать–двадцать».

Движущей силой нынешней революции в мире кремниевых компьютеров является один принципиальный факт: способность УФ-излучения наносить на кремниевую подложку все более и более миниатюрные транзисторы, которые затем вытравливаются. Сегодня в процессоре Pentium на площади размером с ноготь может уместиться несколько сотен миллионов транзисторов. Поскольку длину волны УФ-излучения можно уменьшить до 10 нм, технология травления позволяет получать

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

компоненты всего по 30 атомов в поперечнике. Но процесс миниатюризации не может продолжаться вечно. Рано или поздно он остановится по нескольким причинам.

Во-первых тепло, выделяемое мощными микросхемами, рано или поздно начнет их плавить. Поэтому не годится предложенное кем-то наивное решение — наложить несколько микросхем одна на другую, создав кубический чип. Да, это увеличит мощность процессора, но лишь ценой большего тепловыделения. Кубический чип выделяет так много жара, что на нем можно приготовить яичницу. К тому же кубическая форма затрудняет теплообмен, поскольку из всех параллелепипедов куб имеет минимальную площадь поверхности. Представьте: если увеличить сторону куба вдвое, то его объем (а значит, и выделяемое им тепло) вырастет в восемь раз, а площадь поверхности — только вчетверо. Это значит, что у кубического чипа количество выделяемого тепла с увеличением размеров растёт вдвое быстрее, чем возможность охлаждения. Очевидно, кубические чипы — всего лишь частичное, временное решение проблемы.

Кое-кто предлагал использовать для травления микросхем не УФ-излучение, а рентгеновские лучи. В принципе это могло бы сработать, поскольку длина волны у рентгеновского излучения может быть в 100 раз меньше, чем у ультрафиолетового света. Но за все надо платить. При переходе с УФ на рентген энергия луча также увеличивается примерно в 100 раз. Это означает, что травление рентгеновским излучением может попросту погубить подложку, на которой вы пытаетесь что-то изобразить. Попытку применить рентген для литографии можно сравнить с попыткой художника изваять тонкую скульптуру при помощи паяльной лампы. Рентгеновская литография требует строжайшего контроля всех параметров и может служить лишь временным решением.

Во-вторых, существует фундаментальная проблема, проистекающая непосредственно из квантовой теории: принцип

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

неопределенности, который утверждает, что нельзя точно знать одновременно положение и скорость атома или частицы. В сегодняшнем процессоре Pentium толщина слоя составляет около 30 атомов. К 2020 г. она может уменьшиться до пяти атомов; при этом электроны, из-за неопределенности своего положения, начнут просачиваться сквозь слои, вызывая короткое замыкание. Таким образом, для размера кремниевых компьютеров существует квантовое ограничение.

Как я уже упоминал, в своем обращении к 3000 лучших инженеров Microsoft в штаб-квартире компании в Сиэтле я сделал акцент на проблеме прекращения действия закона Мура. Лучшие творцы программного обеспечения признались мне, что в настоящее время компания воспринимает эту проблему очень серьезно, и одно из основных предлагаемых решений — параллельная обработка данных. Простейший способ реализовать такую схему — поставить в параллель несколько процессоров и разбивать каждую задачу на части, а затем, в конце, вновь собирать результат.

Параллельная обработка данных — одна из ключевых особенностей работы нашего мозга. Если снять с работающего мозга магнитно-резонансную томограмму, выяснится, что одновременно включается несколько разных участков. Это означает, что мозг разбивает задачу на маленькие кусочки и решает их одновременно. Именно поэтому нейроны (передающие электрические сигналы с крайне низкой скоростью — около 100 метров в секунду) могут работать лучше суперкомпьютера, в котором сигналы бегают почти со скоростью света. Проигрывая в скорости, человеческий мозг берет тем, что проводит миллиарды крошечных операций одновременно, а затем сводит результаты воедино.

Трудность с параллельной обработкой данных состоит в том, что каждую задачу необходимо предварительно разбить на несколько частей. Затем части обрабатываются разными процессорами, а в конце все это вновь собирается воедино.

Координация разбивки и сборки может оказаться чрезвычайно сложным делом, причем эта процедура сильно зависит от конкретной задачи; универсальный алгоритм найти очень трудно. Человеческий мозг делает это без заметных усилий, но мать-природа располагала миллионами лет для решения этой задачи, а наши программисты работают над ней всего около десяти лет.

### Атомные транзисторы

Одна из возможных замен кремниевых чипов — транзисторы, собранные из отдельных атомов. Если кремниевые транзисторы начинают отказывать, поскольку проводники и слои в микросхемах уменьшаются до атомных размеров, то почему бы не начать все заново и не научиться считать на атомах?

В частности, что-то подобное можно реализовать на молекулярных транзисторах. Транзистор — это ключ, позволяющий контролировать ток по проводнику. Вообще говоря, кремниевый транзистор можно заменить одной сложной молекулой или, вернее, двумя механически связанными молекулами, такими, к примеру, как ротаксан и тиофенол. Внешне молекула тиофенола выглядит как длинная гантелевидная трубка с кольцевой «ручкой» посередине. В обычных условиях электричество свободно проходит сквозь трубку, делая ее проводящей. Но если «повернуть ручку», электрический ток будет перекрыт. Таким образом, молекула действует как ключ, контролирующей протекание электрического тока. Если назвать состояние, когда ток проходит через молекулу, «1», а запертое состояние — «0», то получится, что при помощи всего одной составной молекулы можно передавать цифровые сообщения.

Молекулярные транзисторы уже существуют. Несколько крупных корпораций объявило о создании транзисторов на базе отдельных молекул. Однако о коммерческом использовании говорить пока рано; прежде необходимо научиться корректно

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

включать эти устройства в электрическую цепь, а также разработать технологию их массового производства.

Перспективный кандидат на роль молекулярного транзистора имеется в классе веществ, получивших название графенов, которые впервые выделили из графита в 2004 г. Андрей Гейм и Константин Новоселов из Манчестерского университета, удостоенные за свою работу Нобелевской премии. Графен напоминает одиночный слой графита. В отличие от углеродных нанотрубок, которые представляют собой графитовое полотно, скрученное в длинную тонкую трубку, графен — плоское углеродное полотно толщиной всего в один атом. Подобно углеродным нанотрубкам, графен — новое состояние вещества, и сейчас ученые разбираются в его удивительных свойствах, включая и электрическую проводимость. «С точки зрения физики графен — просто золотая жила. Его можно изучать бесконечно», — замечает Новоселов. (Кроме того, графен — самый прочный материал, с которым до сих пор сталкивалась наука. Если поместить слона на карандаш и поставить карандаш на графеновое полотно, оно не порвется.)

Группе Новоселова удалось при помощи стандартной технологии, используемой в производстве компьютеров, вырезать самые маленькие, наверное, известные на сегодняшний день транзисторы. При помощи узкого пучка электронов можно вырезать в графене каналы, создавая таким образом транзисторы толщиной в один атом и десять атомов в поперечнике. (В настоящее время самые маленькие молекулярные транзисторы имеют размер около 30 нм. Самые мелкие транзисторы Новоселова получились еще в тридцать раз меньше.)

Эти графеновые транзисторы настолько малы, что представляют собой абсолютный предел для молекулярных транзисторов вообще. Если сделать транзистор еще меньше, в дело вступит принцип неопределенности и начнется утечка электронов. «Меньше этого, пожалуй, уже не получишь», — говорит Новоселов.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

На роль молекулярного транзистора есть и другие перспективные кандидаты, но настоящая проблема здесь куда более приземленная: как подключать их в цепь и как собирать из них коммерчески жизнеспособный продукт. Дело в том, что мало создать один молекулярный транзистор. Молекулярными транзисторами очень трудно манипулировать, что само по себе достаточно очевидно, — ведь они могут быть в тысячи раз тоньше человеческого волоса. Придумать технологию их массового производства — сложнейшая задача, и в настоящее время такой технологии не существует.

К примеру, графен — настолько новый материал, что пока не ясно, как можно получить его в больших количествах. Ученые могут изготовить лишь около 0,1 мм чистого графена, что, конечно же, слишком мало для коммерческого применения. Остается надеяться лишь на то, что когда-нибудь будет найден процесс самосборки молекулярных транзисторов. В природе иногда встречаются группы молекул, самоорганизовавшиеся, будто по волшебству, в идеальную структуру. До сих пор никому не удалось надежно воспроизвести подобный процесс.

## Квантовые компьютеры

Самое, пожалуй, амбициозное предложение состоит в том, чтобы использовать квантовые компьютеры, вычисления в которых проводятся на отдельных атомах. Некоторые ученые утверждают, что квантовые компьютеры — идеал и конечная цель, поскольку атом — мельчайшая единица, на которой можно производить вычисления.

Атом похож на крутящийся волчок. В принципе можно хранить цифровую информацию в группе крутящихся волчков, если условно считать волчок, вращающийся по часовой стрелке, цифрой 0, а против часовой стрелки — цифрой 1. Если вы перевернете один из волчков, 0 сменится 1 (или наоборот) и получится, что вы произвели некое действие.

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

Но в странном квантовом мире атом в каком-то смысле вращается одновременно и по часовой стрелке, и против нее. (Мы помним, что в квантовом мире находиться одновременно в нескольких местах считается нормальным.) Поэтому получается, что атом может хранить значительно больше информации, чем просто 0 или 1. Его состояние может описывать произвольную смесь 0 и 1. Так что квантовые компьютеры пользуются не битами, а «кубитами» информации. К примеру, какой-то конкретный атом может крутиться на 25% по и на 75% против часовой стрелки. Понятно, что информации здесь куда больше, чем один бит.

Квантовые компьютеры настолько мощны, что ЦРУ уже думает о потенциальной возможности использовать их для взлома кодов. В сущности, взлом шифра любой страны мира сводится к поиску ключа, а ключи к современным шифрам устроены чрезвычайно хитро. К примеру, ключ может быть основан на разложении некоего большого числа на множители. Конечно, число 21 легко представить как произведение 3 и 7. А теперь представьте, что у вас есть целое число из ста цифр и вам нужно представить его как произведение двух других целых чисел. У цифрового компьютера на такую операцию может уйти лет сто. А вот квантовый компьютер будет настолько мощным, что сможет в принципе легко взломать любой подобный шифр. Вообще, на подобных задачах квантовый компьютер легко обгоняет обычный.

Квантовые компьютеры — не фантастика, они уже существуют. Я своими глазами видел квантовый компьютер, когда был в МТИ в лаборатории Сета Ллойда (Seth Lloyd), одного из пионеров в этой области. Его лаборатория забита компьютерами, вакуумными насосами и датчиками, но самое главное в его эксперименте — это машина, внешне напоминающая стандартный аппарат для МРТ, только в уменьшенном масштабе. Как и в МРТ-аппарате, в устройстве Ллойда имеется две большие катушки, создающие в пространстве между ними однородное

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

магнитное поле, в которое помещается образец. Оси всех атомов в образце параллельны, атомы стоят как вращающиеся волчки. Если атом смотрит вверх, он соответствует 0, если вниз — 1. Ллойд посылает в образец электромагнитный импульс, изменяющий положение атомов. Некоторые из них переворачиваются, т. е. 1 превращается в 0, или наоборот. Таким образом машина произвела некое вычислительное действие.

Так почему на наших столах до сих пор не стоят квантовые компьютеры? Почему не все шифры раскрыты и не все загадки Вселенной разгаданы? Ллойд признался мне: настоящая проблема с квантовыми компьютерами заключается во внешних раздражителях, которые очень легко нарушают хрупкое равновесие атомов и избавиться от которых необычайно сложно.

Когда атомы «когерентны» и колеблются синхронно друг с другом, их равновесие настолько тонко, что от наимельчайших внешних помех синхронность нарушается и они «декогерируют». Даже пролет космической частицы или грузовик под окнами лаборатории может нарушить когерентность атомов и погубить вычисления.

Проблема нарушения когерентности — самый серьезный барьер на пути создания квантовых компьютеров. Всякий, кто сумеет ее решить, не только получит Нобелевскую премию, но и станет богатейшим человеком на свете.

Можно без труда представить, что создание квантовых компьютеров из отдельных когерентных атомов — тяжелый процесс, поскольку атомы быстро декогерируют и сбиваются с ритма. До сих пор самым сложным вычислением, которое удалось провести на квантовом компьютере, является  $3 \times 5 = 15$ . Выглядит, конечно, несолидно, но вспомните: это вычисление произведено на отдельных атомах.

Существует и еще одна странная проблема, берущая начало в квантовой теории и конкретно в принципе неопределенности. Все вычисления, проведенные на квантовых компьютерах, по сути своей обладают некой неопределенностью, так что любое

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

вычисление необходимо проводить множество раз. Дважды плюс два будет четыре... по крайней мере иногда. Если повторить эту операцию много раз, ответ усреднится и вы действительно получите 4. Так что даже арифметика на квантовом компьютере становится какой-то расплывчатой.

Никто не знает, когда будет решена проблема декогерентности. Винтон Серф (Vinton Cerf), один из создателей Интернета, предсказывает: «К 2050 г. мы наверняка найдем способы проводить квантовые расчеты при комнатной температуре».

Необходимо также указать, что ставки в этой игре настолько высоки, что ученые одновременно исследуют несколько разновидностей новых компьютеров. Перечислим некоторые из конкурирующих конструкций.

- **Оптические компьютеры.** Эти компьютеры считают скорее на световых лучах, чем на электронах. Поскольку лучи света способны проходить сквозь друг друга, оптические компьютеры обещают то преимущество, что их можно будет сделать кубическими, без всяких проводов. Кроме того, лазеры можно изготавливать при помощи все той же литографической технологии травления, что и обычные сегодняшние транзисторы, так что теоретически на одну подложку можно впихнуть миллионы лазеров.
- **Компьютеры на квантовой точке.** Из полупроводникового материала, используемого в микросхемах, можно вытравить крохотные точки, настолько маленькие, что содержат, к примеру, всего по 100 атомов. При таком размере точки атомы могут стать когерентными и вибрировать в унисон. В 2009 г. была получена самая маленькая в мире квантовая точка, состоящая из одного атома. Вообще, квантовые точки уже доказали свою полезность в светоизлучающих диодах и компьютерных экранах. В будущем, если мы

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

научимся корректно обращаться с такими точками, из них может получиться даже квантовый компьютер.

- **Компьютеры на основе ДНК.** Первый компьютер на основе ДНК-молекулы был изготовлен в 1994 г. в Университете Южной Калифорнии. Поскольку нить ДНК кодирует информацию при помощи аминокислот, обозначаемых буквами А, Т, С, G, вместо нулей и единиц, ее можно рассматривать как обычную компьютерную запись, только более емкую. Если обычный компьютер производит операции с большими числами посредством сдвигов и перестановок, то аналоговые операции можно производить физически, смешивая в пробирках жидкости, содержащие молекулы ДНК, которые можно всячески резать и сшивать. Процесс идет медленно, но одновременно работает так много молекул ДНК, что некоторые вычисления таким образом производить выгоднее, чем на цифровом компьютере. Хотя, конечно, цифровой компьютер удобнее: его можно поместить в корпус сотового телефона, а для работы ДНК-компьютера надо смешивать в пробирках ДНК-содержащие жидкости.

## СЕРЕДИНА ВЕКА (2030–2070 гг.)

### Изменение формы

В фильме «Терминатор-2: Судный день» работа в исполнении Арнольда Шварценеггера атакует робот более продвинутой модели из будущего, некий T-1000, изготовленный из жидкого металла. В неоформленном состоянии этот робот напоминает дрожашую массу жидкой ртути; он способен произвольно изменять форму и просачиваться сквозь любые препятствия. Он может проникнуть в крохотную щель и превратить в смертельное оружие собственные руки и ноги, а затем внезапно вернуть себе первоначальную форму и продолжить свой убийственный

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

путь. Кажется, что T-1000 — это идеальная машина для убийства и остановить ее невозможно.

Конечно, все это фантастика. Сегодняшняя технология не позволяет произвольно изменять форму твердого объекта. Тем не менее к середине века технология изменения формы в каком-то виде может войти в наш быт. И это не просто разговоры; достаточно сказать, что среди основных компаний, занятых этой проблемой, такая серьезная фирма, как Intel.

По иронии судьбы к 2050 г. результаты, полученные при помощи нанотехнологий, распространятся повсюду, при этом оставаясь незаметными. Чуть ли не каждый продукт будет модифицирован при помощи молекулярных технологий — он станет сверхпрочным, неуязвимым и гибким. Датчики, созданные на основе нанотехнологий, будут круглые сутки защищать нас и оказывать помощь; они будут всюду, но скрыты из глаз. Внешне все будет выглядеть примерно так же, как сегодня, так что обычные люди даже не узнают, насколько нанотехнологии изменили мир вокруг нас.

Но одно из достижений нанотехнологии всегда будет на виду.

T-1000, робот-убийца из «Терминатора» — это, возможно, самый наглядный пример объекта из области так называемой «программируемой материи», благодаря которой мы однажды получим возможность одним нажатием кнопки изменять форму, цвет и физические свойства объекта. На примитивном уровне даже обычная неоновая реклама — тоже форма программируемого вещества, потому что мы можем в любой момент щелкнуть выключателем — и в наполненной газом трубке возникнет электрический ток. Электричество возбуждает атомы газа, которые затем возвращаются в нормальное состояние и одновременно излучают свет. Более сложный вариант — LCD-дисплей обычного компьютера. В нем содержится жидкий кристалл, который под воздействием слабого электрического тока становится непрозрачным. Регулируя ток, протекающий в жидком кристал-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

ле, можно нажатием кнопки получать на экране изображения и цвета.

Ученые Intel метят гораздо выше и хотят добиться, чтобы программируемая материя на самом деле меняла форму твердого объекта — в точности как в фантастике. Идея проста: создать компьютерный чип в форме крохотной песчинки. Эти умные песчинки должны обладать способностью по команде менять статический электрический заряд на поверхности и вследствие этого притягиваться друг к другу или отталкиваться друг от друга. При одном распределении зарядов эти частицы выстроятся и образуют определенную форму. Но стоит их перепрограммировать — и электрические заряды изменятся, и частицы переместятся таким образом, чтобы сформировать совершенно иной объект. Такие «песчинки» получили название «катомов» (или клейтронных атомов), поскольку из них, как из атомов, можно сформировать множество различных объектов при помощи просто изменения их зарядов. (У программируемой материи много общего с модульными роботами, о которых мы говорили в главе 2. Но если модульные роботы строятся из умных блоков размером около 5 см, которые способны самоорганизоваться в различных формах, то в программируемой материи эти элементарные кирпичики съезживаются до миллиметровых и субмиллиметровых размеров.)

Один из горячих сторонников этой технологии — Джейсон Кэмпбелл (Jason Campbell), старший исследователь фирмы Intel. Он говорит: «Представьте себе мобильное устройство. К примеру, мой сотовый телефон слишком велик, чтобы удобно умещаться в кармане, и слишком мал для удобного набора цифр. Еще хуже, если я пытаюсь смотреть на нем фильмы или разбирать электронную почту. Но будь у меня 200–300 миллилитров катомов, я мог бы заставить их принимать каждый раз форму того устройства, которое нужно мне в данный момент». Так что представьте, что у меня в руках сотовый телефон. В следующий момент он изменяется и превращается во что-то

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

другое. Таким образом, мне не приходится носить с собой так много электронных гаджетов.

Компания Intel в своих лабораториях уже создала систему катомов размером около 2,5 см. Катом по форме напоминает детский кубик с десятками крошечных электродов, равномерно распределенных по каждой стороне. Этот катом уникален, потому что вы можете изменять заряды на каждом из этих электродов, так что в результате катомы связываются друг с другом в разных ориентациях. При одном комплекте управляющих сигналов эти кубики могут собраться в один большой куб. Изменим заряд на каждом электроде — и кубики тут же рассыплются и быстро соберутся вновь уже иначе — скажем, в форме лодки.

Теперь задача заключается в том, чтобы уменьшить каждый катом до размеров песчинки или еще меньше. Если когда-нибудь технологии травления кремниевых компонент позволят нам создавать катомы размером с живую клетку, мы, вероятно, получим возможность реалистично превращать одну форму в другую одним нажатием кнопки. Джастин Раттнер (Justin Rattner), старший исследователь фирмы Intel, говорит: «В какой-то момент в ближайшие сорок лет эта технология станет обычной». Одними из первых, вероятно, ее начнут применять автомобильные дизайнеры, авиационные инженеры, художники, архитекторы и вообще все, кому приходится изготавливать трехмерные модели своих проектов, а затем модифицировать их до бесконечности. К примеру, можно будет взять модель четырехдверного седана, схватить, потянуть — и превратить его в хэтчбэк. Сожмите модель по вертикали еще немножко — и она превратится в спортивный автомобиль. Это намного удобнее модельной глины, у которой нет ни памяти, ни разума. У программируемой материи есть разум, она может запоминать предыдущие формы, приспосабливаться к новым требованиям и отзываться на желания дизайнера. Как только модель закончена, ее «схему» можно просто разослать по e-mail тысячам других дизайнеров, которые смогут у себя в мастер-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

ской практически мгновенно получить точную копию вашей модели.

Эта технология может самым решительным образом повлиять на множество чисто потребительских продуктов. Игрушки, к примеру, можно будет программировать на новую форму при помощи специальной программы. Так что к Рождеству нужно будет только скачать программу для новой игрушки, установить ее в старую — и появится совершенно новая. Можно представить, что дети на Рождество, вместо того чтобы разворачивать найденные под елкой подарки, будут скачивать программы для любимых игрушек, которые им по электронной почте прислал Дед Мороз. Получится, что самой необходимой вещью станут катомы, из которых построена прошлогодняя игрушка. Это означает, что множество всевозможных потребительских товаров со временем просто исчезнет, вернее, превратится в рассылаемые по Интернету компьютерные программы; вам же не потребуются нанимать грузовик, чтобы доставить домой новую мебель или крупную бытовую технику; достаточно просто скачать из сети программу и «перелицевать» старые вещи. Вообще, с программируемой материей ремонт домов и квартир перестанет быть таким мучительным. Чтобы заменить в кухне плитку, столешницы, оборудование и шкафчики, возможно, достаточно будет нажать кнопку.

Помимо всего прочего эта технология поможет решить проблему отходов. Вместо того чтобы выбрасывать ненужные вещи, их можно будет просто перепрограммировать. Если что-то сломается — обновить программу, и вещь опять станет новой.

Эта технология обещает невероятные перспективы, но и проблем перед ее создателями стоит немало. Одна из них — как организовать и упорядочить движение всех этих миллионов катомов. При загрузке в программируемую материю необходимой информации наверняка возникнет проблема с шириной канала. Но намечаются уже и кое-какие принципиальные решения.

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

К примеру, в фантастических фильмах, как правило, показывают процесс превращения — человек, скажем, внезапно превращается в чудовище. Раньше съемка подобных вещей представляла собой очень сложный и трудоемкий процесс, но сегодня их с легкостью делает компьютер. Для этого сначала надо задать — и для человека, и для чудовища — несколько векторов, отмечающих ключевые точки лица, такие как нос и глаза. Затем компьютер получает задание превратить векторы одного лица в векторы другого крохотными шажками; при этом на экране также происходит постепенный переход одного лица в другое. Возможно, при изменении формы трехмерного объекта удастся воспользоваться примерно таким же принципом ключевых векторов.

Еще одна проблема заключается в том, что статические электрические силы, связывающие катомы, намного слабее межатомных связей, которые обеспечивают целостность большинства твердых объектов. Как мы уже видели, квантовые силы могут быть достаточно мощными, именно они обеспечивают металлу твердость, а пластику эластичность. Сымитировать эти квантовые силы при помощи сил электростатического притяжения и обеспечить стабильность полученных предметов — задача будущего.

Мне довелось своими глазами увидеть замечательные, стремительные успехи ученых в области программируемой материи, когда я вместе со съемочной группой канала Science посетил лабораторию Сета Голдстейна (Seth Goldstein) в Университете Карнеги–Меллон. Там на столах можно увидеть большие пирамиды кубиков разного размера, но непременно с чипами внутри. Я видел, как два таких кубика соединили при помощи электрических сил, и хозяин лаборатории попросил меня попытаться оторвать их друг от друга руками. Как ни странно, я не сумел этого сделать. Я обнаружил, что электрические силы, связывающие два кубика, сильнее меня. К тому же, указывает Голдстейн, при уменьшении кубиков связывающие их силы со-

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

ответственно возрастут. Он отвел меня в другую лабораторию, где показал, насколько мелкими в будущем могут стать катомы. Та же технология, что позволяет вытравить на кремниевой подложке миллионы транзисторов, позволяет и вырезать микроскопические катомы размером меньше миллиметра. На самом деле они были такими мелкими, что мне пришлось рассматривать их в микроскоп. Гольдштейн надеется, что когда-нибудь, научившись контролировать электрические силы этих катомов, он сможет одним нажатием кнопки заставить их соединиться в объект любой формы — почти как волшебник, который мановением руки и заклинанием создает любые вещи.

Я спросил, как можно дать подробные инструкции миллиардам и миллиардам катомов, чтобы, скажем, холодильник мгновенно превратился в кухонную плиту. На первый взгляд такая задача кажется кошмаром программиста. Но он ответил, что не обязательно давать подробные инструкции каждому отдельному катому. Каждый из них должен знать только своих непосредственных соседей, этого достаточно. Таким образом, каждый катом получает задание связаться с небольшой группой соседних катомов — и вся сложнейшая структура волшебным образом преобразуется (примерно так же нейронам мозга младенца для развития достаточно узнать только, как связаться с соседними нейронами).

Если предположить, что проблемы программирования и стабильности решаемы, то существует вероятность, что к концу столетия по нажатию кнопки будут возводиться целые здания и даже города. Достаточно будет задать место расположения домов, выкопать котлованы для фундаментов — и триллионы катомов сами возведут в пустыне или девственном лесу целые города.

Надо сказать, инженеры Intel предвидят и такой день, когда катомы смогут принять человеческую форму. «Почему нет? Об этом интересно порассуждать», — говорит Раттнер. (Тогда, возможно, и робот T-1000 может стать реальностью.)

### ДАЛЕКОЕ БУДУЩЕЕ (2070–2100 гг.)

#### Священный Грааль: репликатор

К 2100 г. самые смелые сторонники нанотехнологий предсказывают появление еще более мощной машины: речь идет о молекулярном сборщике, или «репликаторе», способном сотворить любую вещь. Это будет машина размером, скажем, со стиральную. В нее надо будет заложить сырье и нажать на кнопку. Многие триллионы наноботов тут же набросятся на сырье и разберут его на молекулы, а затем соберут из этих молекул совершенно новый объект. Репликатор сможет изготовить любую вещь; он станет высшим достижением науки и инженерной мысли, достойным завершением усилий, начатых в доисторические времена, когда человек поднял с земли палку и впервые использовал ее как орудие труда.

Одна из проблем создания репликатора — громадное число атомов, которые надо будет расставить по местам, чтобы скопировать даже небольшой объект. В человеческом теле, к примеру, более 50 трлн клеток и более  $10^{26}$  атомов. Это колоссальное число, даже для простого хранения информации о местоположении всех этих атомов потребуется огромный объем памяти.

Эту проблему могло бы решить создание специального нанобота — гипотетического на данный момент молекулярного робота, обладающего несколькими ключевыми свойствами. Во-первых, он должен быть способен воспроизводить себя. Если робот может воспроизвести себя один раз, он в принципе может и создать неограниченное число собственных копий. Так что главное — создать первого наноробота. Во-вторых, этот робот должен уметь распознавать молекулы и разрезать их в нужных местах. В-третьих, он должен уметь собирать из атомов новые молекулы по заданной схеме. Таким образом, задача реорганизации  $10^{26}$  атомов сводится к изготовлению такого же количества наноботов, запрограммированных на работу с отдельным атомом. Если это удастся сделать, огромное число атомов в теле

или объекте уже не будет непреодолимым препятствием. Настоящая проблема — создать всего одного мифического нанобота с перечисленными свойствами и позволить ему размножиться самостоятельно.

Однако научное сообщество пока не пришло к единому выводу относительно физической реализуемости этой великолепной мечты — нанофабрикатора. Немногие, такие как Эрик Дрекслер (Eric Drexler), пионер нанотехнологий и автор книги «Двигатели созидания», считают, что в будущем все вещи будут производиться на молекулярном уровне. Практически нужные вещи, даже те, о которых сегодня мы можем только мечтать, будут сыпаться как из рога изобилия. Создание машины, способной сделать все что угодно, перевернет устои общества с ног на голову. Однако другие ученые настроены более скептически.

К примеру, нобелевский лауреат Ричард Смолли, ныне покойный, в статье в журнале *Scientific American* в 2001 г. поднял вопрос о «липких» и «толстых» пальцах. Ключевой вопрос здесь такой: можно ли построить молекулярный нанобот, достаточно ловкий, чтобы произвольно переставлять молекулы? По мнению Смолли, ответ на этот вопрос должен быть отрицательным.

Дебаты на данную тему выплеснулись наружу и стали публичными, а их отголоски слышны и сегодня. Смолли обменялся с Дрекслером серией писем, которые в 2003 и 2004 гг. были перепечатаны на страницах журнала *Chemical and Engineering News*. Позиция Смолли состояла в том, что «пальцы» молекулярной машины не смогут выполнять требуемые тонкие операции по двум причинам.

Во-первых, на «пальцы» будут действовать слабые силы притяжения, из-за которых инструмент будет прилипать к молекулам. Вообще, атомы липнут друг к другу, в частности, из-за слабых электрических сил, таких как сила Ван-дер-Ваальса, существующая между их электронами. Представьте себе процедуру починки наручных часов при помощи пинцета, смазанного медом. Собрать подобным инструментом такую тонкую

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

вещь, как механизм часов, попросту невозможно. А теперь представьте процедуру сборки еще более сложной и тонкой вещи, такой как молекула, из «деталей», которые постоянно липнут к инструменту.

Во-вторых, «пальцы» нанобота могут оказаться слишком «толстыми» для манипуляций с атомами. Представьте себе ремонт все тех же часов в толстых рабочих перчатках строителя. «Пальцы» нанобота, как и объекты, которыми предполагается манипулировать, сделаны из отдельных атомов, и инструмент может оказаться слишком толстым и грубым для проведения необходимых тонких операций.

Смолли завершил свои аргументы так: «Примерно так же, как нельзя заставить юношу и девушку полюбить друг друга, просто сведя их вместе, невозможно заставить тонкий химический процесс между двумя молекулярными объектами протекать желаемым образом при помощи простого механического действия... Химия, как и любовь, дело тонкое».

Этот спор затрагивает самую суть вопроса о том, станет ли когда-нибудь репликатор революционной вехой в истории общества либо останется любопытной диковинкой и отправится рано или поздно на свалку нереализуемых технических идей. Как мы уже видели, физические законы нашего мира не так-то просто перевести на язык физики наномира. Эффекты, которыми мы с легкостью пренебрегаем, такие как сила Ван-дер-Ваальса, поверхностное натяжение жидкости, принцип неопределенности Гейзенберга и т. д., в наномире становятся главными.

Чтобы представить себе масштабы проблемы, вообразите атомы размером с шарик для детской игры и бассейн, полный таких шариков-атомов. Погружение в подобный бассейн будет совсем не похоже на погружение в воду. «Шарики» станут непрерывно вибрировать и биться о ваше тело со всех сторон — результат броуновского движения. Плавать в таком бассейне будет почти невозможно, все равно что плавать в паутине. При попытке схватить один из шариков он, из-за сложной

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

комбинации различных сил, либо ускользнет от ваших пальцев, либо прочно прилипнет к ним.

В конце концов ученые согласились остаться каждый при своем мнении. Смолли не удалось отправить идею молекулярного репликатора в нокаут, но после этой научной схватки, когда пыль немного улеглась, кое-что все же прояснилось. Во-первых, стороны согласились, что наивная идея о наноботе, разрезающем и склеивающем молекулы при помощи молекулярного пинцета, нуждается в переработке. На атомном уровне главенство переходит к новым квантовым силам.

Во-вторых, хотя репликатор, или универсальный производитель, на сегодняшний день остается фантастикой, в реальности-то он существует! К примеру, мать-природа умеет превратить съеденные гамбургеры и овощи в младенца всего за девять месяцев. Занимаются этим ДНК-молекулы (в которых хранится «чертеж» младенца); они управляют действиями рибосом (которые, собственно, режут и склеивают молекулы в заданном порядке) и используют в качестве строительного материала белки и аминокислоты, поступающие с пищей.

И в-третьих, молекулярный сборщик мог бы, в принципе, работать, но в более сложном варианте. К примеру, Смолли указывал, что сблизить два атома не означает добиться реакции между ними. Природа для решения этой проблемы часто привлекает третью силу — водный раствор фермента, способного стимулировать нужную химическую реакцию. Смолли указывал также, что многие химические вещества, используемые в компьютерах и электронной промышленности, не растворяются в воде. Но Дрекслер в ответ возражал, что не для всех химических реакций нужны ферменты или вода.

К примеру, один из возможных вариантов получил название самосборки; в робототехнике он соответствует подходу «снизу вверх». Человек с глубокой древности использовал в строительстве противоположный подход — «сверху вниз». Он брал инструменты, такие как молоток или пила, и начинал

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

заготавливать дерево: рубить, пилить, тесать; затем из заготовленных материалов собирал по плану более крупные структуры, такие как дом. Этот процесс требует тщательного контроля на каждом этапе.

При подходе «снизу вверх» объекты собираются сами по себе. В природе, к примеру, чудесные снежинки кристаллизуются сами во время снегопада или метели. Многие триллионы атомов сами организуются в новые формы. Никто не придумывает узоры для снежинок. То же нередко происходит и в биологических системах. Так, бактериальные рибосомы — сложные молекулярные системы, содержащие по крайней мере 55 различных белковых молекул и несколько молекул РНК, — способны спонтанно образоваться в лабораторной пробирке.

Самосборка применяется и в полупроводниковой промышленности. Используемые в транзисторах компоненты иногда собираются воедино сами по себе. Применяя различные сложные технологии и процессы в определенной строгой последовательности (такие, как быстрое охлаждение, кристаллизация, полимеризация, осаждение из паровой фазы, отверждение и т. п.), можно получить достаточно широкий спектр готовых компьютерных компонент. Как мы уже видели, таким способом можно получить определенные типы наночастиц, используемые против раковых клеток.

Однако в большинстве своем предметы не спешат возникать из ничего сами по себе. В целом можно сказать, что лишь крохотная часть наноматериалов показала способность к корректной самосборке. Посредством самосборки невозможно получить наномашину на заказ, выбрав по каталогу. Так что прогресс в производстве наномашин таким образом будет, вероятно, стабильным, но медленным.

Суммируем сказанное. Судя по всему, молекулярные сборщики не нарушают никаких законов природы, но создать их будет чрезвычайно трудно. Пока наноботов не существует, и в ближайшее время они не появятся, но как только (и если) первый

нанобот будет успешно изготовлен, человеческое общество, вполне возможно, изменится до неузнаваемости.

### Создать репликатор

На что может быть похож репликатор? Как он может выглядеть? Никто точно этого не знает, поскольку до его создания остается еще не одно десятилетие, а может быть, и столетие. Мне, однако, довелось увидеть, как может выглядеть работа репликатора. Дело в том, что для научно-популярной передачи канала Science мою голову отсканировали (совершенно буквально) лазерным лучом, после чего изготовили реалистичную трехмерную пластиковую копию моего лица. При сканировании лазерный луч горизонтально двигался по моему лицу и отражался от кожи; отражение регистрировалось специальным датчиком и вводилось в компьютер. После этого луч направлялся на следующий проход, чуть ниже. Постепенно сканированию подверглось все мое лицо, и на экране появилось его трехмерное изображение с точностью, скажем, до десятой доли миллиметра, состоящее из тонких горизонтальных ломтиков.

Затем всю собранную информацию «скармили» большой установке размером примерно с холодильник — устройству, способному отлить пластиковое трехмерное изображение почти чего угодно. Это устройство снабжено тонким носиком, который движется горизонтально и совершает множество проходов. На каждом проходе он разбрызгивает тонким слоем расплавленный пластик, дублируя таким образом первоначальное лазерное изображение объекта — в данном случае моего лица. Примерно через десять минут и множество проходов машина выдала готовую пластиковую отливку, до боли напоминающую мое лицо.

Коммерческие перспективы применения этой технологии громадны, ведь вы можете всего за несколько минут создать реалистичную копию любого трехмерного объекта, такого, напри-

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

мер, как сложная деталь машины. Однако нетрудно вообразить, как через несколько десятков или сотен лет подобная же машина будет выдавать трехмерные копии реальных объектов, абсолютно точные даже на клеточном и атомном уровнях.

На следующем уровне можно будет создавать при помощи такого трехмерного сканера не просто объекты, а живые органы человеческого тела. В Университете Уэйк Форест ученые предложили новый оригинальный способ создания живой сердечной ткани... при помощи струйного принтера. Для начала им пришлось написать аккуратную компьютерную программу, которая послойно, с каждым проходом каретки, разбрызгивает живые мышечные клетки. Они использовали для этой процедуры обычный струйный принтер, но заменили на нем картридж с чернилами на специальную емкость, куда поместили смесь различных жидкостей, содержащую живые клетки сердечной ткани. Таким образом ученые могут управлять размещением в пространстве каждой клетки. За множество проходов каретки им удалось реально получить слои сердечной ткани.

Есть и еще один инструмент, который когда-нибудь, возможно, позволит нам зарегистрировать точное местоположение каждого атома в человеческом теле. Это МРТ, магнитно-резонансный томограф. Как мы уже говорили, точность МРТ-сканирования составляет примерно десятую долю миллиметра. Это означает, что каждый пиксел даже чувствительного МРТ-скана соответствует тысячам клеток. Но если посмотреть на физические принципы, лежащие в основе метода МРТ, выяснится, что точность изображения определяется степенью однородности магнитного поля внутри машины. Поэтому, добиваясь, чтобы магнитное поле становилось все более однородным, можно заметно улучшить разрешение МРТ-аппарата.

Ученые уже говорят о создании машины по типу МРТ с разрешением около размеров клетки и даже меньше — такой, чтобы можно было с ее помощью различить при сканировании отдельные молекулы и атомы.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

Подведем итоги. Репликатор как таковой не нарушает никаких законов природы, но создать его на принципах самосборки будет очень непросто. К концу этого столетия, когда человек овладеет наконец такой технологией, можно будет подумать о коммерческом применении репликаторов.

### Серая слизь?

Некоторые люди, в том числе и основатель Sun Microsystems Билл Джой (Bill Joy), не раз выражали сомнения в перспективности нанотехнологий. Джой писал, что техника непременно выйдет из-под контроля человека, что это лишь вопрос времени. Взбесившиеся нанороботы сожрут все минералы на Земле и оставят после себя одну только бесполезную серую слизь. Даже наследник британского престола принц Чарльз выступал против нанотехнологий и сценария с серой слизью.

Опасность кроется в основном свойстве наноботов: способности к самовоспроизведению. Наноботов, выпущенных в окружающую среду, невозможно отозвать обратно. Со временем они действительно могут начать размножаться бесконтрольно и с жуткой скоростью, и тогда возникнет реальная опасность захвата окружающей среды и уничтожения жизни на Земле.

Лично я считаю, что до создания репликатора пройдет еще немало десятков, а то и сотен лет, так что беспокоиться о серой слизи пока рано. Технология эта пока только делает первые шаги. А по мере ее развития будет достаточно времени для разработки средств защиты от бешеных наноботов. К примеру, можно придумать такую систему страховки, что при нажатии тревожной кнопки все выпущенные наноботы просто «выключатся». Или можно изобрести «ботов-убийц», единственным назначением которых будет розыск и уничтожение вышедших из-под контроля наноботов.

Еще один способ справиться с этой проблемой — поучиться у природы, у которой опыт миллиардов лет эволюции. Наш мир

просто кишит самовоспроизводящимися молекулярными формами жизни, известными как вирусы и бактерии, способными бесконтрольно размножаться и мутировать. Однако человеческое тело создало и собственных «наноботов» — антитела и белые кровяные тельца (лейкоциты), которые разыскивают и уничтожают чуждые формы жизни. Система, разумеется, не совершенна, но может все же служить примером решения проблемы взбесившихся наноботов.

### Социальные последствия репликаторов

В научно-популярной передаче канала BBC/Discovery, которую я однажды вел, Джоэл Гарро (Joel Garreau), автор книги «Радикальная эволюция», сказал: «Если самосборка когда-нибудь станет возможной, это будет один из величайших моментов в истории. Это будет означать, что мы действительно говорим о резких переменах в мире, о его превращении во что-то такое, чего мы прежде не могли даже вообразить».

Существует известная поговорка: будь осторожен в своих желаниях, они могут сбыться. Молекулярный сборщик, или репликатор, — это священный грааль нанотехнологий, и все исследователи в этой области мечтают его создать. Но если такой прибор действительно будет изобретен, он, вполне возможно, потрясет человеческое общество до самого основания. Если разобраться, все философии и социальные системы в конечном итоге основаны на дефиците и бедности. На протяжении всей истории человечества именно эта тема была в обществе доминирующей, именно она сформировала нашу культуру, философию и религию. В некоторых религиях достаток рассматривается как божественное вознаграждение, а бедность — как справедливое наказание. В основе же буддизма лежит универсальная природа страдания и то, как человек с этим страданием справляется. В христианстве в Новом Завете

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

те сказано: «Легче верблюду пройти сквозь игольное ушко, чем богатому войти в Царствие Небесное».

Кроме того, распределение богатства определяет и структуру общества. Феодализм основан на богатстве немногих аристократов в противовес бедности крестьянства. В основе капитализма лежит идея о том, что энергичные, продуктивные люди вознаграждаются за свои труды тем, что основывают компании и богатеют. Но если ленивые и непродуктивные люди смогут получить все что угодно почти даром, просто нажав на кнопку, то капитализм перестанет работать. Репликатор разрушит пирамиду, перевернет человеческие отношения с ног на голову. Если исчезнет разница между имущими и неимущими, вместе с ней исчезнут и представления о статусе и политической силе.

Этот парадокс исследовали создатели фильма «Звездный путь: второе поколение» в одной из серий, где астронавты находят плавающую в открытом космосе капсулу из XX в. В капсуле находятся замороженные тела людей, которые страдали от неизлечимых болезней этого примитивного времени и надеялись на исцеление в будущем. Врачи «Энтерпрайза» быстро излечивают всех этих людей и оживляют их. Счастливчики удивлены тем, что их отчаянная попытка принесла успех, но среди них оказывается и один успешный бизнесмен. Первым делом он задает главный вопрос: «Какой нынче век?» Выяснив, что теперь он живет в XXIV в., он быстро понимает, что его прежние инвестиции должны были за это время принести громадную прибыль. Он тотчас же требует связи со своим банкиром на Земле. Но экипаж «Энтерпрайза» в недоумении. Деньги? Вклады? Все это давно не существует. В XXIV в. достаточно попросить — и получишь нужную тебе вещь.

Все это заставляет вспомнить о поисках идеального общественного устройства, или утопии; слово это, давно ставшее нарицательным, первым использовал Томас Мор в своем романе «Утопия», написанном в 1516 г. Видя вокруг ужасные страдания

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

и нищету, Мор представил себе идеальное общество и поместил его на выдуманном острове в Атлантическом океане. В XIX в. в Европе существовало множество общественных движений, занимавшихся поисками различных форм утопии; многие из них нашли выход в эмиграции в США, где и сегодня заметны следы подобных общин.

С одной стороны, репликатор мог бы создать для нас ту самую утопию, которую вообразили мечтатели XIX в. Все эксперименты в этом направлении потерпели неудачу из-за материальной нужды, которая порождает неравенство, затем конфликты и в конце концов крах. Но если репликатор решит материальные проблемы людей, то и утопия может оказаться не за горами. Расцветут искусство, музыка и поэзия, у человека появится свободное время на самые заветные мечты.

С другой стороны, без бедности и денег как мотивирующих факторов все это может привести к жизни без цели, к потаканию собственным желаниям, даже самым низменным. Вполне возможно, что общество дегенерирует и опустится. Лишь крохотная горстка самых артистических натур будет еще стремиться к чему-то, писать стихи или музыку. Остальные, по утверждению критиков, превратятся в никчемных лодырей и лоботрясов.

Сомнению подвергаются даже определения, которые использовали творцы утопий. Вспомним, к примеру, мантры социализма и коммунизма. Вот основной принцип социализма: «От каждого по способностям, каждому по труду». А вот основной принцип коммунизма, высшей стадии социализма: «От каждого по способностям, каждому по потребностям».

Но если появляется репликатор, от этих лозунгов остается лишь одно: «Каждому по желаниям».

Правда, существует и третий взгляд на проблему. Согласно Принципу пещерного человека, фундаментальная основа личности человека за последние 100 000 лет практически не изменилась. Тогда, в далеком прошлом, не существовало понятия «работа». Антропологи говорят, что примитивное общество —

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

это всегда в значительной степени коммуна, члены которой делят радости и трудности поровну. Ритм жизни в древности определялся не работой и не зарплатой, поскольку ни того ни другого не было.

И все же древний человек не превращался в лентяя и бездельника, и тому есть несколько причин. Во-первых, лентяй умер бы от голода. Тех, кто не выполнял свою часть работы, просто изгоняли из племени, и они вскоре погибали. Во-вторых, люди гордились делом рук своих и даже находили в работе смысл жизни. В-третьих, существовало сильнейшее социальное давление, заставлявшее человека становиться и оставаться продуктивным членом общества. Такой человек мог вступить в брак и передать свои гены потомкам, тогда как гены лентяев и бездельников, как правило, умирали вместе с ними.

Итак, есть ли причины, по которым люди будут вести продуктивную жизнь даже после изобретения репликатора, который сможет дать каждому все желаемое? С одной стороны — и это, наверное, главное, — репликатор гарантирует, что никто на Земле не будет голодать. Но с другой стороны, люди в большинстве своем, скорее всего, будут продолжать трудиться, потому что гордятся своими умениями и видят в работе смысл. А вот третью причину, социальное давление, сложнее поддерживать, не нарушая ничьей личной свободы. Вместо социального давления, вероятно, потребуются серьезный сдвиг в системе воспитания и образования детей. Чтобы репликатор не использовался во зло, необходимо будет изменить отношение людей к работе.

К счастью, прогресс, скорее всего, будет очень медленным, да и репликатор появится вряд ли раньше чем через столетие... У общества будет достаточно времени, чтобы обсудить со всех сторон преимущества и недостатки этой технологии и, приспособившись к новой реальности, не допустить распада.

Можно не сомневаться, что первые репликаторы будут дорогим удовольствием. Как говорит уже знакомый нам

## ФИЗИКА БУДУЩЕГО

специалист по робототехнике из MIT Родни Брукс, «нанотехнология расцветет, скорее всего, примерно как расцвела фотолитография, — в очень дорогостоящих контролируемых условиях, а не как общедоступная рыночная технология». Так что проблема бесплатности и доступности любых благ не будет такой уж проблемой. Учитывая сложность подобных машин, с момента их изобретения до выхода на реальный рынок и падения цен пройдет, наверное, не одно десятилетие.

У меня однажды состоялся интересный разговор с Жамэ Кассио (Jamais Cascio), известным футуристом, давно пытающимся разглядеть контуры будущего. Во-первых, он сказал мне, что сомневается в теории сингулярности, упомянутой в главе 2; человеческая природа и социальная динамика слишком сложны, запутанны и непредсказуемы, чтобы укладываться в простую аккуратную теорию. Однако он признал, что развитие нанотехнологий со временем может породить общество, где всего будет в избытке, особенно если появятся репликаторы и полноценные роботы. Поэтому я спросил: «Как поведет себя общество, если все блага станут почти бесплатными, а необходимость работать исчезнет?»

Он сказал, что произойдет две вещи. Во-первых, богатое общество обеспечит каждому, даже тем, кто не захочет работать, достойный минимальный доход. Так что некоторая доля населения, вероятно, превратится в пресловутых лентяев и бездельников. Кассио предвидит появление некоей страховочной сетки для общества — явление, возможно, не слишком желательное, но неизбежное, особенно если все материальные потребности человека будут обеспечивать роботы и репликаторы. Во-вторых, он считает, что все это компенсируется невероятным расцветом предпринимательского духа, свободного теперь от страха перед разорением и нищетой. Деятельные люди будут проявлять инициативу и брать на себя дополнительные риски, создавая новые отрасли и новые возможности для других. По мнению футуриста, творческое начало, освобожденное от страха перед

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

банкротством, поднимет общество на новую высоту и породит новый ренессанс.

Я прекрасно знаю, что в моей собственной области, в физике, большинство ученых занимается наукой не из-за денег, а ради чистого удовольствия от новых открытий и изобретений. Мы нередко отказываемся от более прибыльной работы в других областях, потому что хотим гоняться за мечтой, а не за долларом. Знакомые мне люди искусства и интеллектуалы думают так же — их цель не увеличить, насколько возможно, свой банковский счет, а заниматься творчеством и облагораживать человеческий дух.

Лично я считаю, что, если к 2100 г. общество разбогатеет настолько, что все люди окажутся в обстановке материального изобилия, общество может отреагировать точно так же. Какая-то доля населения образует постоянный класс людей, которые просто откажутся работать. Другие, освободившись от сдерживающего влияния бедности, займутся творческой деятельностью, наукой или искусством. Для них счастье творчества и созидания окажется важнее материальных благ. Большинство же продолжит работать и приносить пользу просто потому, что это заложено у нас в генах. Это тоже Принцип пещерного человека.

Но существует одна проблема, которую не сможет решить даже репликатор, и это проблема энергии. Чудесные технологии будущего будут нуждаться в громадном количестве энергии. Откуда же будет браться эта энергия?

