

Реферативный обзор нанотехнологий

Иван Садовский

Что такое нанотехнологии	2
История нанотехнологий	4
Перспективы развития и возможности нанотехнологий	9
Перспективы в медицине.....	10
Перспективы в промышленности	10
Перспективы в сельском хозяйстве	10
Перспективы в биологии.....	11
Перспективы в экологии	11
Перспективы в освоении космоса	11
Квантовые компьютеры	12
Кубит — квантовый бит [43,44].....	12
Квантовые вычисления.....	13
Квантовые алгоритмы	14
Квантовая телепортация.....	15
Приложения к криптографии	15
Реализация квантовых компьютеров	16
Попытки реализации	16
Самое холодное место во Вселенной	18
Философские проблемы, возникшие с приходом нанотехнологий	19
Онтологические проблемы	19
Эпистемологические проблемы	19
Аксиологические проблемы	20
Опасности нанотехнологий	22

Что такое нанотехнологии

Нанотехнология (нано от греческого «nanos» — карлик, «techne» — мастерство, искусство, «logos» — понятие, учение) — междисциплинарная область фундаментальной, а в большей степени прикладной, науки имеющая дело с анализом и синтезом продуктов с заданной атомарной структурой путем контролируемого манипулирования атомами и молекулами. При этом характерные «рабочие» размеры системы составляют менее 100 нанометров (1 нм = 10^{-9} м).

Следует отметить, что часто употребляемое определение нанотехнологии технологии оперирующей с объектами размером менее 100 нм не совсем точно. Например,

- наночастицы имеют характерные размеры по всем направлениям и подходят под это определение;
- нанотрубки имеют характерный диаметр менее 100 нм, но могут иметь макроскопическую длину (порядка миллиметров);
- нанопленки имеют толщину менее 100 нм, но другие размеры могут быть порядка нескольких сантиметров.

Гораздо правильнее определять объекты, с которыми имеет дело нанотехнология (нанообъекты, наноструктуры) как объекты, в которых имеется масштаб порядка 100 нм (при этом в системе могут присутствовать и макроскопические масштабы).

Однако и это определение не совсем точное, так как, объектами нанотехнологий могут быть и макроскопические объекты, атомарная структура которых контролируемо создается с разрешением на уровне отдельных атомов.

Нанотехнологии качественно отличаются от традиционных дисциплин, поскольку на таких масштабах привычные, макроскопические, технологии обращения с материей часто неприменимы, а квантовые явления, пренебрежимо слабые на привычных масштабах, становятся намного значительнее: свойства и взаимодействия отдельных атомов и молекул или молекулярных соединений, многочастичные квантовые эффекты.

Когда речь идет о развитии нанотехнологий, имеются в виду следующие три направления [1]:

- изготовление электронных схем с активными элементами, размеры которых сравнимы с размерами молекул и атомов;
- разработка и применение на практике нанороботов — механизмов, оперирующих с молекулами размером от 1 до 100 нм;
- непосредственная манипуляция единичными молекулами и сборка из них любых конструкций.

Все эти направления уже начали реализовываться. В 1998 году были получены первые результаты по перемещению единичных атомов и сборки из них определенных конструкций, а также разработаны и изготовлены первые наноэлектронные элементы. По различным оценкам, большинство этих направлений разовьются до стадии практического применения уже через 25—50 лет.

На данный момент нанотехнология находится в начальной стадии развития (примерно как IT индустрия в 60 годы XX столетия). Тем не менее, исследования уже дают практические результаты, а, учитывая уже предсказуемые перспективы и возможность грантовой системы финансирования (над каждым проектом может работать группа ученых всего из нескольких человек), нанотехнологии находятся в более выгодном положении, чем находились многие ныне процветающие дисциплины.

Современная электроника развивается в сторону уменьшения размеров устройств; классические методы производства подходят к своему пределу (технологическому и экономическому). Уже в данный момент электроника нуждается в качественном (а не количественном) изменении в технологиях. При этом нанотехнологии являются одной из грядущих ветвей эволюции электроники, приборостроения и других наукоемких производств.

История нанотехнологий

Ниже перечислены ключевые открытия и этапы развития нанотехнологий.

- В 1931 году немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать нанообъекты [2,3].
- Первое упоминание методов, которые впоследствии будут названы нанотехнологией, многие источники связывают с известным выступлением Ричарда Фейнмана «В том мире полно места» [4], сделанным им в 1959 году в Калифорнийском технологическом институте на ежегодной встрече Американского физического общества. Ричард Фейнман предположил, что возможно механически перемещать одиночные атомы, при помощи манипулятора соответствующего размера, по крайней мере, такой процесс не противоречил бы известным на сегодняшний день физическим законам.

Этот манипулятор он предложил делать следующим способом. Необходимо построить механизм, создававший свою копию, только на порядок меньшую. Созданный меньший механизм должен опять создать свою копию, опять на порядок меньшую и так до тех пор, пока размеры механизма не будут соизмеримы с размерами порядка одного атома. При этом необходимо будет делать изменения в устройстве этого механизма, так как силы гравитации, действующие в макромире, будут оказывать все меньшее влияние, а силы межмолекулярных взаимодействий и Ван-дер-Ваальсовы силы будут все больше влиять на работу механизма. Последний этап — полученный механизм соберет свою копию из отдельных атомов. Принципиально число таких копий неограниченно, можно будет за короткое время создать любое число таких машин. Эти машины смогут таким же способом, поатомной сборкой собирать макровещи. Это позволит сделать вещи на порядок дешевле — таким роботам (нанороботам) нужно будет дать только необходимое количество молекул и энергию, и написать программу для сборки необходимых предметов. До сих пор никто не смог опровергнуть эту возможность, но и никому пока не удалось создать такие механизмы. Существенный недостаток такого робота —

принципиальная невозможность создания механизма из одного атома.

- Впервые термин «нанотехнология» употребил японский физик Норио Танигути в 1974 году. Он назвал этим термином производство изделий из отдельно взятых атомов.
- В 1981 году немецкий и швейцарский физики Герд Бинниг и Генрих Рорер в цюриховской лаборатории IBM создали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), позволяющий строить трехмерную картину расположения атомов на поверхностях проводящих материалов [3,5,6]. СТМ представляет собой систему образец-игла, к которым приложена разность потенциалов. Электроны из образца туннелируют на иглу, создавая, таким образом, туннельный ток. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния образец-игла. Типичные значения составляют 1–1000 пА ($1 \text{ пА} = 10^{-12} \text{ А}$) при расстояниях около 1 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).
- В 1985 году группа исследователей (Роберт Керл, Харолд Крото, Ричард Смолли) исследовали масс-спектры паров графита, полученных при лазерном облучении твердого образца, и обнаружили пики, соответствующие 720 и 840 атомным единицам массы [7]. Они предположили, что данные пики отвечают молекулам C_{60} и C_{70} и выдвинули гипотезу, что молекула C_{60} имеет форму усеченного икосаэдра симметрии I_h , а C_{70} — более вытянутую эллипсоидальную форму симметрии D_{5h} . Полиэдрические кластеры углерода получили название фуллеренов. Эта же группа ученых также впервые сумела измерить объект размером 1 нм.
- 1986 год. Герд Бинниг разработал сканирующий атомно-силовой зондовый микроскоп (АТМ), позволивший, наконец, визуализировать атомы любых материалов (не только проводящих), а также, манипулировать ими.
- В 1986 году термин «нанотехнология» стал известен широкой публике. Американский футуролог Эрик Дрекслер предсказал [8], что нанотехнология в скором времени начнет активно развиваться. В своей книге он выдвинул концепцию универсальных молекулярных роботов, работающих по заданной программе и собирающих что угодно (в том числе и себе подобных) из подручных молекул. Центральное место в его исследованиях играли математические расчеты, с помощью

которых можно было проанализировать работу устройства размерами в несколько нанометров.

- В 1989 году Дональд Эйглер и Эрхард Швецер из Калифорнийского научного центра IBM сумели выложить 35 атомами ксенона на кристалле никеля название своей компании [9]. Для первого в мире целевого переноса отдельных атомов в новое место они использовали СТМ производства IBM.
- 1991 год. Японский профессор Сумио Лиджима, работавший в компании NEC, использовал фуллерены для создания углеродных трубок (или нанотрубок) диаметром 0,8 нм. На их основе в наше время выпускаются материалы в сто раз прочнее стали. Оставалось научиться делать такие трубки как можно более длинными – их размеры оказались напрямую связаны с прочностью изготавливаемых веществ.
- В том же году компьютерщик Уоррен Робинет и химик Стэн Уильямс, сотрудники университета Северной Каролины, изготовили наноманипулятор — робот размером с человека, состыкованный с атомным микроскопом и управляемый через интерфейс виртуальной реальности. Оператор, манипулируя отдельными атомами, с его помощью мог физически ощущать многократно усиленную отдачу от модифицируемого вещества, что значительно ускоряло работу. Пытаться делать прикладные наноустройства без такого комплекса до того времени было немыслимо.
- 1997 год. Эрик Дрекслер объявил, что к 2020 г. станет возможной промышленная сборка наноустройств из отдельных атомов. До этого времени почти все его прогнозы сбывались с опережением.
- В 1998 году Сиз Деккер профессор Технического университета г. Делфта (Голландия) создал транзистор на основе нанотрубок, используя их в качестве молекул. Для этого ему пришлось первым в мире измерить электрическую проводимость такой молекулы.
- 1999 год. Американские ученые профессор физики Марк Рид (Йельский университет) и профессор химии Джеймс Тур (Райсский университет) разработали единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и их цепочкой.

- 2000 год. Немецкий физик Франц Гиссибл разглядел в кремнии субатомные частицы. Его коллега Роберт Магерле предложил технологию нанотомографии — создания трехмерной картины внутреннего строения вещества с разрешением 100 нм.
- 2002 год. Сиз Деккер соединил углеродную трубку с ДНК, получив единый наномеханизм. С помощью этого механизма стало возможно собирать различные наномеханизмы с зацепами и шестеренками из нанотрубок.
- 2003 год. Профессор Фенг Лью из университета Юты, используя наработки Франца Гиссибла, с помощью атомного микроскопа построил образы орбит электронов путем анализа их возмущения при движении вокруг ядра.
- В 2004 году ученые во главе с Алексом Зеттлом из Беркли и Национальной лаборатории им. Лоуренса создали действующую механическую систему, позволяющую вращать прямоугольную металлическую пластинку, насаженную на нанотрубку (так называемый наномотор) [10].
- В 2004 году разработчиками немецкой компании Infineon был создан полевой транзистор на основе углеродной нанотрубки [15]. Немного ранее они показали, что, помимо использования углеродных нанотрубок в полупроводниковом состоянии в транзисторе, возможно, их использование в металлическом состоянии как проводящих элементов в микрочипе [16].
- В тот же год в Стенфордском университете удалось создать транзистор из одностенных углеродных нанотрубок и некоторых органических материалов. Нанотрубки играли роль электродов, а помещенный между ними органический материал — полупроводника. Это устройство имело размеры 3×2 нм.
- В 2005 году команда Роберта Волкова создала прототип полевого транзистора на одной молекуле [13,14]. Они показали, что единичная молекула может, контролируемо заряжаться и, при этом, окружающие молекулы будут оставаться электронейтральными. А, следовательно, эту молекулу можно использовать как затвор транзистора.

- В октябре 2004 года в Манчестерском университете при участии сотрудников из ИФТТ РАН (г. Черноголовка) было создано небольшое количество материала, названного графен [17]. Уже в 2006 и 2007 годах внимание научного сообщества было приковано к этому материалу. Основная причина состоит в том, что он обладает необычно высокой электропроводностью, обусловленной специфической электронной структурой. Было доказано существование двумерного кристалла графена и изучены его свойства. Весьма вероятно, что в будущем углеродные материалы придут на смену кремниевой электронике. Они будут гораздо миниатюрнее, быстрее и экономичнее. Также, возможно, графен можно будет использовать как подложку для создания алмазных механосинтетических устройств.
- В 2007 году американскими учеными разработан прототип преобразователя механической вибрации в электрическую энергию [11]. Наногенераторы может стать удобным и эффективным источником энергии для устройств и механизмов наномасштаба. В генераторе использованы полупроводниковые и пьезоэлектрические свойства наноструктуры из оксида цинка.
- В декабре 2007 года компания Intel преодолела 45 нм барьер (размер транзистора в микрочипе) [12]. Это стало значительным событием в компьютерной индустрии. На это было потрачено около 3 миллиардов американских долларов и несколько лет работы около 600 специалистов. Для сравнения на преодоление 65 нм барьера потребовалось в два раза меньше усилий. Следующим этапом будет размер в 32 нм.

За 2007 год в научных сообществах было опубликовано в два раза больше работ, касающихся нанотехнологий, чем за десятилетие с 1990 по 2000 год.

На данный момент многие ученые считают, что не смотря на заметный прогресс, пока рано выделять нанофизику в отдельную науку. Физики, химики, биологи, медики утверждают, что подход к изучению нанофизики должен быть сугубо междисциплинарным.

Перспективы развития и возможности нанотехнологий

Нанотехнологический контроль изделий и материалов, буквально на уровне атомов, в некоторых областях промышленности стал обыденным делом. Реальный пример — DVD-диски, производство которых было бы невозможно без нанотехнологического контроля матриц.

Существующие способы осаждения примесей в полупроводниках (эпитаксии) по литографическим шаблонам уже практически приблизились к своему пределу не только в смысле размеров, но и топологически. Дело в том, что нынешние технологии фотолитографии позволяют изготавливать только планарные структуры — когда все элементы и проводники расположены в одной плоскости. А это накладывает существенные ограничения на схемотехнику: наиболее прогрессивные схемные решения не могут быть осуществлены по такой технологии.

В частности, таким образом невозможно воспроизвести нейронные схемы, на которые возлагаются большие надежды. В то же время, сейчас активно развиваются нанотехнологические методы, позволяющие создавать активные элементы (транзисторы, диоды) размером с молекулу и формировать из них многослойные трехмерные схемы. По-видимому, именно микроэлектроника будет первой отраслью, где «атомная сборка» будет осуществлена в промышленных масштабах.

Хотя сейчас в нашем распоряжении и имеются средства для манипуляций отдельными атомами, вряд ли их можно «напрямую» применять для того, чтобы собрать что-либо практически необходимое: уже хотя бы только из-за количества атомов, которые придется «монтировать».

Однако возможностей существующих технологий уже достаточно, чтобы соорудить из нескольких молекул некие простейшие механизмы, которые, руководствуясь управляющими сигналами извне (акустическими, электромагнитными и пр.), смогут манипулировать другими молекулами и создавать себе подобные устройства или более сложные механизмы.

Те, в свою очередь, смогут изготовить еще более сложные устройства и т.д. В конце концов, этот экспоненциальный процесс приведет к созданию

молекулярных роботов — механизмов, сравнимых по размерам с крупной молекулой и обладающих собственным встроенным компьютером.

Перспективы в медицине

Создание молекулярных роботов-врачей, которые, находясь внутри человеческого организма, устраняли бы все возникающие повреждения, или предотвращали таковые.

Например, лечение онкологических заболеваний можно будет реализовывать посредством доставки атомарного кислорода непосредственно к раковым клеткам с целью их последующего уничтожения.

Перспективы в промышленности

Замена традиционных методов производства сборкой молекулярными роботами предметов потребления непосредственно из атомов и молекул. Вплоть до персональных синтезаторов и копирующих устройств, позволяющих изготовить любой предмет.

Произойдет переход от существующих планарных структур к объемным микросхемам, размеры активных элементов уменьшаться до нескольких нанометров. Будут разработаны так называемые нейроноподобные схемы.

Перспективы в сельском хозяйстве

Смена источников пищевых ресурсов. Замена пищевых растений и животных их искусственными аналогами — комплексами из молекулярных роботов, которые будут воспроизводить те же химические процессы, что происходят в живых организмах, однако более коротким и эффективным путем. Это позволит решить некоторые экологические и продовольственные проблемы.

Перспективы в биологии

Манипулирование клетками в живом организме. Обсуждаются возможности восстановления вымерших видов, либо создания новых живых существ.

Перспективы в экологии

Создание роботов-санитаров экосферы превращающих отходы жизнедеятельности человека в исходное сырье. Перевод промышленности и сельского хозяйства на безотходные методы.

Перспективы в освоении космоса

Создание экосферы на безжизненных планетах, подготовка для заселения их людьми. Создание стационарных космических станция из имеющихся на месте материалов.

Квантовые компьютеры

На наноразмерном уровне естественно возникают квантовые эффекты. Зачастую они препятствуют реализации традиционных схем общепринятых в микроэлектронике. При этом, однако, возникают совершенно новые возможности, связанные с чисто квантовым поведением наносистем [42].

Особенно впечатляет возможность создания так называемых квантовых компьютеров. В этой главе мы обсудим квантовые компьютеры и квантовые вычисления.

Кубит — квантовый бит [43,44]

Идея квантовых вычислений, впервые высказанная Ю. Маниным, Р. Фейнманом и Д. Дойчем, состоит в том, что квантовая система из L двухуровневых квантовых элементов (кубитов) имеет 2^L линейно независимых состояний, а значит, вследствие принципа квантовой суперпозиции, 2^L -мерное гильбертово пространство состояний. Операция в квантовых вычислениях соответствует повороту в этом пространстве. Таким образом, квантовое вычислительное устройство размером L кубит может выполнять параллельно 2^L операций.

Предположим, что имеется один кубит. В таком случае после измерения, в так называемой классической форме, результат будет 0 или 1. В действительности кубит — квантовый объект и поэтому, представляет собой квантовую суперпозицию состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$ (базовые состояния, составляющие ортонормированный базис). В общем случае квантовое состояние кубита записывается, в виде

$$c_1|0\rangle + c_2|1\rangle,$$

где $|c_1|^2$ и $|c_2|^2$ — вероятности измерить 0 или 1 соответственно, $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$. Более того, сразу после измерения кубит переходит в базовое квантовое состояние, аналогичное классическому результату.

Перейдем к системе из двух кубитов. Измерение каждого из них может дать 0 или 1. Поэтому у системы 4 классических состояния: 00, 01, 10 и 11. Аналогичные им базовые квантовые состояния: $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ и $|11\rangle$. И,

наконец, общее квантовое состояние системы имеет вид

$$c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle.$$

Теперь $|c_{00}|^2$ — вероятность измерить 00 и т. д. Отметим, что сумма квадратов коэффициентов равна единице

$$|c_{00}| + |c_{01}| + |c_{10}| + |c_{11}| = 1$$

как полная вероятность.

В общем случае, система из L кубитов имеет 2^L классических состояний, каждое из которых может быть измерено с вероятностями от 0 до 1. В этом случае мы имеем 2^L коэффициентов, характеризующих состояние этой системы.

Одна операция над группой кубитов может затрагивать значения всех 2^L коэффициентов, в отличие от классической системы, где при единичной операции изменяется значение одного единственного бита. Это и обеспечивает беспрецедентный параллелизм вычислений.

Так, например, состоянию из трех классических битов

$$b_1, b_2, b_3$$

соответствует набор из восьми коэффициентов для квантового состояния

$$c_{000}, c_{001}, c_{010}, c_{011}, \\ c_{101}, c_{101}, c_{110}, c_{111}.$$

Экспериментально кубиты были реализованы, например, на основе джозефсоновских контактов [45-48] и ядерных спинов [49].

Квантовые вычисления

Упрощенная схема вычисления на квантовом компьютере выглядит так: берется система кубитов, на которой записывается начальное состояние. Затем состояние системы или ее подсистем изменяется посредством базовых квантовых операций. В конце производится измерение системы кубитов в заданном базисе, и это результат работы компьютера.

Квантовая система дает результат, только с некоторой вероятностью являющийся правильным. Но за счет небольшого увеличения операций в алгоритме можно сколь угодно приблизить вероятность получения правильного результата к единице.

Оказывается, что для построения любого вычисления достаточно двух базовых операций. С помощью этих базовых квантовых операций можно симулировать работу обычных логических элементов, из которых сделаны обычные компьютеры. Поэтому любую задачу, которая решена сейчас, квантовый компьютер решит, и почти за такое же время. Следовательно, новая схема вычислений будет не слабее нынешней.

Чем же квантовый компьютер лучше классического? Большая часть современных ЭВМ работают по такой же схеме: n бит памяти хранят состояние и каждый такт времени изменяются процессором. В квантовом случае система из n кубитов находится в состоянии, являющимся суперпозицией всех базовых состояний, поэтому изменение системы касается всех 2^n базовых состояний одновременно. Теоретически новая схема может работать намного (в экспоненциальное число раз) быстрее классической. Практически (квантовый) алгоритм Гровера поиска в базе данных показывает квадратичный прирост мощности против классических алгоритмов. Но пока в природе их не существует.

Квантовые алгоритмы

Ниже перечислены наиболее известные алгоритмы для квантовых компьютеров.

- Алгоритм Гровера [18] позволяет найти решение уравнения $f(x)=1$, где $0 < x < N$ за время $O(\sqrt{N/M})$.
- Алгоритм Шора [19,20] позволяет разложить натуральное число n на простые множители за полиномиальное от $\log(n)$ время. Было предложено несколько реализаций этого алгоритма [21-24].
- Алгоритм Дойча-Джоза [25] позволяет «за одно вычисление» определить, является ли функция двоичной переменной постоянной (принимает либо значение 0, либо 1 при любых аргументах) или сбалансированной (для половины области определения принимает значение 0, для другой половины 1).

Стоит отметить, что не для всякого алгоритма возможно «квантовое

ускорение».

Квантовая телепортация

Алгоритм телепортации [26-29] реализует точный перенос состояния одного кубита (или системы) на другой. В простейшей схеме используются 4 кубита: источник, приемник и два вспомогательных. Отметим, что в результате работы алгоритма первоначальное состояние источника разрушится — это пример действия общего принципа невозможности клонирования — невозможно создать точную копию квантового состояния, не разрушив оригинал. На самом деле, довольно легко создать одинаковые состояния на кубитах. К примеру, измерив 3 кубита, мы переведем каждый из них в базовые состояния (0 или 1) и хотя бы на двух из них они совпадут. Не получится скопировать произвольное состояние, и телепортация — замена этой операции.

Телепортация позволяет передавать квантовое состояние системы с помощью обычных классических каналов связи. Таким образом, можно, в частности, получить запутанное состояние системы, состоящей из подсистем, удаленных на большое расстояние.

Экспериментально телепортация была реализована с помощью фотонов [30-33] и атомов [34,35].

Приложения к криптографии

Благодаря огромной скорости разложения на простые множители, квантовый компьютер позволит расшифровывать сообщения, закодированные при помощи многих популярных криптографических алгоритмов, таких как RSA¹. До сих пор этот алгоритм считается сравнительно надежным, так как эффективный способ разложения чисел на простые множители для классического компьютера в настоящее время неизвестен. Для того, например, чтобы получить доступ к кредитной карте, нужно разложить на

¹ Алгоритм шифрования открытым ключом, представленный тремя авторами (Ron Rivest, Adi Shamir, and Leonard Adleman) в 1977 году в MIT [36].

два простых множителя число длиной в сотни цифр. Даже для самых быстрых современных компьютеров выполнение этой задачи заняло больше бы времени, чем возраст Вселенной, в сотни раз. При помощи алгоритма Шора эта задача делается вполне осуществимой, если квантовый компьютер будет построен.

Применение идей квантовой механики уже открыли новую эпоху в области криптографии, так как методы квантовой криптографии открывают новые возможности в области передачи сообщений. Прототипы систем подобного рода находятся на стадии разработки.

Реализация квантовых компьютеров

Основные проблемы, связанные с созданием квантовых компьютеров, таковы [42].

- Необходимо обеспечить высокую точность измерений.
- Внешние воздействия могут разрушить квантовую систему или вносить в нее искажения. Для реализации квантового алгоритма исправления ошибок необходимо чтобы время одного «такта» было меньше сбоя фазы как минимум в 10^4 раз.
- Необходима масштабируемость набора кубитов.

На данный момент не существует экспериментов, где эти проблемы были бы устранены в достаточной степени. Создание квантового компьютера специалисты прогнозируют в 2030—2040 годах.

Попытки реализации

В 2007 году канадская компания D-Wave [37] заявила о создании образца квантового компьютера, состоящего из 16 кубит (устройство получило название Orion) [38]. Однако информация об этом устройстве не отвечала строгим требованиям точного научного сообщения и новость не получила широкого признания. Более того, дальнейшие планы компании (создать уже

в ближайшем будущем 1024-кубитный компьютер) вызвали скепсис у членов экспертного сообщества [39].

В ноябре 2007 года компания D-Wave продемонстрировала работу образца 28-кубитного компьютера онлайн на конференции посвященной суперкомпьютерам [37].

Самое холодное место во Вселенной

Обсудим теперь еще одну характерную особенность наносистем, интересную с философской точки зрения.

Квантовая когерентность в наносистемах сильно портится термодинамическими флуктуациями. Ввиду этого большинство экспериментов с такими системами проводят при очень низких температурах (порядка нескольких Кельвин).

Давайте посмотрим, какие объекты в природе обладают наиболее низкими температурами, и сравним их с температурами в криогенных лабораториях.

Самая низкая температура на Земле (21 июля 1983, станция Восток, Антарктика) составляет $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$ (184 К). Средняя температура на поверхности карликовой планеты Плутон около 44 К. Предположительно, самая низкая «натуральная» температура — это температура реликтового излучения, составляющая 2.725 К.

Температуры кипения азота и гелия широко применяющихся в криогенных установках составляют соответственно 77.4 К и 4.216 К. В 1904 году Kamerlingh Onnes получил температуру около 1 К в лаборатории. В настоящее время типичный эксперимент по сверхпроводимости проводится при 0.1–2 К [40]. Рекордно низкая температура 450 pK (4.5×10^{-10} К) получена в конденсате Бозе-Эйнштейна профессором Wolfgang Ketterle и его коллегами в MIT [41] в 2003 году.

Отсюда следует любопытный вывод: самое холодное место в мире находится в лаборатории и создано человеком. В этом аспекте человек уподобляется творцу, создавшему нечто новое, не существующее в природе до сих пор.

Заметим, что этого нельзя сказать о самой высокой температуре (считается, что самой высокой была температура большого взрыва, которая составила около 10^{32} К).

Философские проблемы, возникшие с приходом нанотехнологий

Онтологические проблемы

Проблемы познаваемого. Нанотехнологии стоят на перепутье многих естественных наук, так как для ее описания используются различные подходы, а одновременно с этим, прикладные аспекты нанотехнологий нужны для дальнейшего развития этих наук. Специалисты в области нанотехнологий осваивают междисциплинарные подходы. Вырабатываются новые подходы, которые уже сложно отнести к какой-то определенной «классической» науке. Вместе с этим изменяются представления о реальности.

В то время как традиционное естествознание изучало объекты, которые легко можно было представить, которые имели аналоги в повседневной жизни и легко поддавались интерпретации. Физика на наномасштабах часто не находит простой интерпретации, а иногда противоречит повседневным представлениям.

Нанотехнология разрушает границу между естественным и искусственным. Например, созданные человеком наночастицы на органической основе (для медицинских нужд). Если брать вещество, то по этому критерию они должны быть признаны живыми. А если рассматривать источник их происхождения, то это объект искусственный. Такой объект уже нельзя однозначно классифицировать.

Эпистемологические проблемы

Проблема познающего. Классически изначально человек сначала изучал некий физический закон, а уже потом решал применить или нет полученное знание на практике. Специфика нанотехнологий заключается в том, что познание и изготовление познаваемого предмета происходят одновременно. Меняется статус познающего субъекта, человек уподобляется Богу в

познании², создании и это может повлечь за собой изменение представления о месте человека.

Теперь посмотрим с другой стороны на то, что нанофизика не дает наглядного представления о происходящих в ней процессах. Ведь чтобы сказать, что мы нечто знаем, мы должны это себе представить на «обыденном уровне».

Парадокс науки нашего времени состоит в том, что мы научились понимать на формальном уровне, творить, но не можем наглядно интерпретировать сделанное.

Аксиологические проблемы

Далее можно говорить о проблемах ценностных. Это проблемы, связанные с тем, как человек оценивает собственную деятельность, ее результаты, здесь тоже требуется специальное осмысление последствий использования нанотехнологий. Эта тема только начинает обсуждаться.

В понятие «человек» мы включаем целостное представление, в том числе и представление о человеческой телесности. Возможно, в перспективе, нанотехнологии дадут нам возможность индивидуального воздействия на человека на внутриклеточном и геномном уровнях. Это являет собой некую дополнительную надстройку над человеческим телом, его индивидуализацию, но совершенно не обязано разрушать целостность человека. Ведь нельзя сказать что чужое — это всегда чуждое. Конечно вмешательство в человеческое тело на столь низком, можно даже сказать фундаментальном уровне, потребует вмешательства других людей (специалистов) и доступа к базе знаний (например, о болезнях). И это может лишить человека возможности самостоятельно принимать решения. Пока непонятно как оградить человека от нежелательного вмешательства и установить границы применения такого рода воздействий.

То, что демонстрируют нанотехнологии, показывает, что мы умеем подчинять их служению собственным целям. А вот какие это цели, всегда ли

² Есть мнение, что с XX века творчество Высшего Начала осуществляется руками человека.

знание полезно, все ли нужно знать — это вопросы, на которые сама наука ответить не может. Впервые в XX веке наука столкнулась с такой проблемой, что она лишается автономии в определении того, что она дает. Детально описан процесс умирания, а с утратой какой функции связывают утрату статуса человека? И до какой степени мы можем углубляться в объект, но это периодически возникающая ситуация. Например, у Гете: «Кто хочет что-нибудь живое изучить, всегда его сперва он убивает, потом его на части разбирает, но связи жизненной, увы, там не открыть». Поэтому когда наука углубляется в изучаемый объект, выделяя отдельные элементы, части, потом наступает период, когда надо собрать все вместе и осмыслить отношения субъекта, к тому, что реально познано. Вот нанотехнологии могут породить такого рода кризис. И такого рода проблемы нуждаются в обсуждении специалистами из разных областей, и это уже не чисто научные проблемы.

Опасности нанотехнологий

Внедрение нанотехнологий в различных отраслях человеческой деятельности неизбежно ставит и проблему воздействия наноматериалов на среду обитания человека.

Нанотехнологии сейчас используются в косметологии, компьютерной отрасли и промышленности, а в перспективе, как ожидается, найдут широкое применение в медицине, аэрокосмической сфере и так далее.

Важнейшим объектом внимания при оценке риска для здоровья, связанного с наноматериалами, является использование нанотехнологий при производстве электронной техники, строительных материалов, пищевых продуктов, парфюмерно-косметической продукции как при непосредственном их использовании или употреблении, так и при воздействии поступления наночастиц и наноматериалов в окружающую среду в процессе их производства.

Наиболее изученными являются неблагоприятные эффекты ингаляционного поступления наноматериалов в организм человека. Широко обсуждаются вероятные системные эффекты при данном пути поступления наноматериалов.

Возможные биологические эффекты поступления наноматериалов в организм через желудочно-кишечный тракт изучены пока недостаточно, однако имеются данные, свидетельствующие о том, что различные вещества и материалы при переводе их в форму наночастиц могут значительно изменять свои физико-химические свойства, что может отразиться на их физиологических эффектах в процессе всасывания в пищеварительном тракте и усвоении в организме.

Ряд экспертов считают, что исследователи по всему миру недооценивают риски, которые могут быть сопряжены с нанотехнологиями. Многие из них высказываются о необходимости разработки специальных методик, которые позволят оценить токсичность наноматериалов и их влияние на экологию уже в течение ближайших трех-пяти лет.

Литература

- [1] А. Шаповалов, А. Корнышева, А. Козенко, Н. Гриб, *Нанотехнологии зарядили энергией*, Газета «Коммерсантъ» **163**, 3739 (2007).
- [2] E. Ruska, *The development of the electron microscope and of electron microscopy*, Rev. Mod. Phys. **59**, 627 (1987).
- [3] *The Nobel Prize in Physics 1986 for the fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope*,
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/index.html.
- [4] R.P. Feynman, *Plenty of Room at the Bottom*, a talk at an American Physical Society, <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html> (1959).
- [5] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, *Tunneling through a Controllable Vacuum Gap*, Appl. Phys. Lett. **40**, 178 (1982).
- [6] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, *Surface studies by scanning tunneling microscopy*, Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).
- [7] H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, et al., *C60: Buckminsterfullerene*, Nature **318**, 162 (1985).
- [8] E. Drexler, *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, (Knopf Publishing Group, 1987).
- [9] *STM Image Gallery at IBM Almaden Research Center*,
<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>.
- [10] A. Fennimore, Th. Yuzvinsky, and A. Zettl, *Rotational NEMS using multi-walled carbon nanotubes*,
<http://flux.aps.org/meetings/YR04/MAR04/baps/abs/S4140004.html>.
- [11] X. Wang, J. Song, J. Liu, Z.L. and Wang, *Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves*, Science **316**, 102 (2007).
- [12] *Intel rolls out 16 45-nm processors for laptops, desktops, servers*,

<http://www.semiconductor.net/article/CA6517719.html>.

[13] *Single molecule transistor could revolutionize electronic miniaturization*, <http://www.expressnews.ualberta.ca/article.cfm?id=6681>.

[14] J. Zikovsky, M. Rezeq, S. Dogel, W.A. Hofer, and R.A. Wolkow, *Field regulation of single-molecule conductivity by a charged surface atom*, *Nature* **435**, 658 (2005).

[15] *Infineon Demonstrates Carbon Nanotube Transistors for Power Applications*, <http://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=543>.

[16] *Infineon forges ahead with nanotube applications*, <http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/16562>.

[17] Novoselov K.S. *et al.*, *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, *Science* **306**, 666 (2004).

[18] Гровер Л.К., *Квантовая механика помогает найти иголку в стоге сена*, в сб. «КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР И КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ», вып. 2., стр. 101-109 (Ижевск, 1999).

[19] P.W. Shor, *Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer*, [arXiv:quant-ph/9508027v2](http://arxiv.org/abs/quant-ph/9508027v2).

[20] M.A. Nielsen and I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000).

[21] L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta *et al.*, *Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance*, *Nature* **414**, 883 (2001).

[22] J.J. Vartiainen, A.O. Niskanen, M. Nakahara, and M.M. Salomaa, *Implementing Shor's algorithm on Josephson Charge Qubits*, [arXiv:quant-ph/0308171v3](http://arxiv.org/abs/quant-ph/0308171v3).

[23] A.G. Fowler, S.J. Devitt, and L.C.L. Hollenberg, *Implementation of Shor's Algorithm on a Linear Nearest Neighbour Qubit Array*, *Quant. Info. Comput.* **4**, 237 (2004).

[24] D. McAnally, *A Refinement of Shor's Algorithm*, [arXiv:quant-ph/0112055v4](http://arxiv.org/abs/quant-ph/0112055v4).

- [25] D. Deutsch and R. Jozsa, *Rapid solutions of problems by quantum computation*, Proc. of the Royal Society of London A **439**, 553 (1992).
- [26] C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W.K. Wootters, *Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels*, Phys. Rev. Lett. **70**, 1895 (1993).
- [27] L. Vaidman, *Teleportation of Quantum States*, Phys. Rev. A **49**, 1473 (1994).
- [28] G. Brassard, S. Braunstein, and R. Cleve, *Teleportation as a Quantum Computation*, Physica D **120**, 43 (1998).
- [29] G. Rigolin, *Quantum Teleportation of an Arbitrary Two Qubit State and its Relation to Multipartite Entanglement*, Phys. Rev. A **71**, 032303 (2005).
- [30] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, and H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Experimental Quantum Teleportation*, Nature **390**, 575 (1997).
- [31] D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, and S. Popescu, *Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels*, Phys. Rev. Lett. **80**, 1121 (1998)
- [32] I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, and N. Gisin, *Long-Distance Teleportation of Qubits at Telecommunication Wavelengths*, Nature **421**, 509 (2003).
- [33] R. Ursin *et.al.*, *Quantum Teleportation Link across the Danube*, Nature **430**, 849 (2004).
- [34] M. Riebe, H. Häffner, C.F. Roos *et.al.*, *Deterministic Quantum Teleportation with Atoms*, Nature **429**, 734 (2004).
- [35] M.D. Barrett, J. Chiaverini, T. Schaetz *et.al.*, *Deterministic Quantum Teleportation of Atomic Qubits*, Nature **429**, 737 (2004).
- [36] S. Robinson, *Still Guarding Secrets after Years of Attacks, RSA Earns Accolades for its Founders*, SIAM News **36**, Number 5 (June 2003).
- [37] Компания D-Wave, <http://www.dwavesys.com/>.

- [38] *Quantum Computing Demo Announcement*, <http://dwave.wordpress.com/2007/01/19/quantum-computing-demo-announcement/> (2007).
- [39] Л. Левкович-Маслюк, *D-Wave: кубитное шоу с моралью: D-Wave восхитила журналистов и возмутила ученых*, Компьютерра №9 (2007).
- [40] *Temperature of the Coldest Laboratory Experiment*, <http://hypertextbook.com/facts/2001/NehemieCange.shtml>.
- [41] A.E. Leanhardt, T.A. Pasquini, M. Saba *et al.*, *Cooling Bose-Einstein Condensates Below 500 Picokelvin*, *Science* **301**, 1513 (2003).
- [42] Г.Б. Лесовик, М.В. Фейгельман, *Идейный фундамент*, Компьютерра №37 (414) (2001).
- [43] V. Schumacher, *Quantum coding*, *Phys. Rev. A* **51**, 2738 (1995).
- [44] Г.Б. Лесовик, М.В. Фейгельман, *Из чего ж это сделаны кубиты?*, Компьютерра №37 (414) (2001).
- [45] W.J. Elion *et al.*, *Direct demonstration of Heisenberg's uncertainty principle in a superconductor*, *Nature* **371**, 594 (1994)
- [46] Y. Nakamura, Y. Pashkin, and J. Tsai, *Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box*, *Nature* **398**, 786 (1999).
- [47] V. Bouchiat, D. Vion, P. Joyez, D. Esteve, and M.H. Devoret, *Quantum coherence with a single Cooper pair*, *Phys. Scr.* **T76** 165 (1998).
- [48] K.W. Lehnert, B.A. Turek, K. Bladh, *et al*, *Measurement of the excited-state lifetime of a microelectronic circuit*, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 027002 (2003).
- [49] L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, *et al*, *Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance*, *Nature* **414**, 883 (2001).