

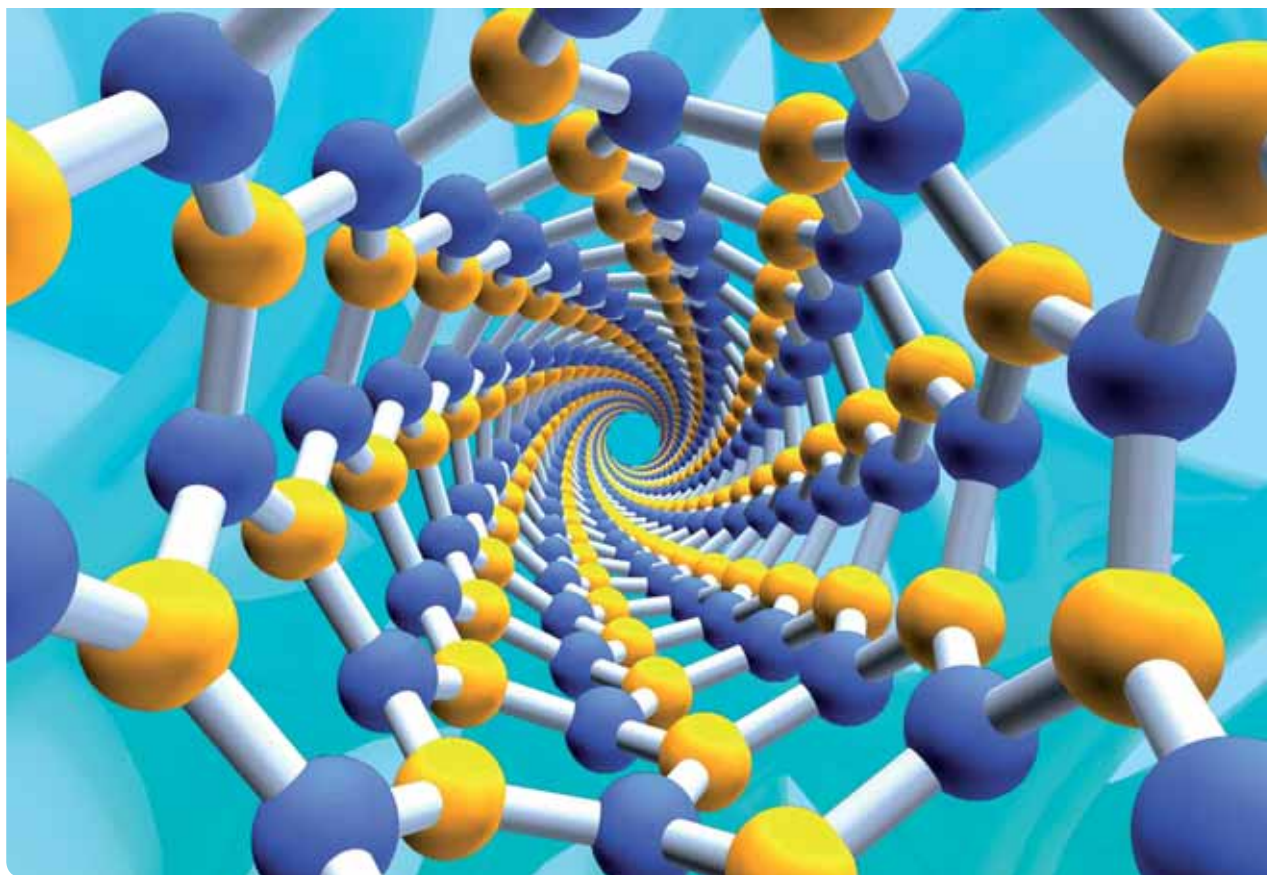
«НАНОТЕХНОЛОГИЯ», «НАНОНАУКА» И «НАНООБЪЕКТЫ»: ЧТО ЗНАЧИТ «НАНО»?

Л.Б. Пиотровский

НИИ экспериментальной медицины СЗО РАМН, Санкт-Петербург
lbp@LP13791.spb.edu

Е.А. Кац

Университет им. Бен-Гуриона в Негеве, Израиль
keugene@bgu.ac.il



Нанобъекты: квантовые плоскости, нити и точки. Наноструктуры углерода

Из всего сказанного в первой части статьи следует, что в конце XX века окончательно стало очевидно существование определенной области размеров частиц вещества — область наноразмеров. Физики, уточняя определение нанобъектов, утвержда-

ют, что верхний предел наночастицы размерной шкалы совпадает, по всей видимости, с размером проявления так называемых низкоразмерных эффектов или эффекта понижения размерности.

Попытаемся сделать обратный перевод последнего утверждения с языка физиков на общечеловеческий язык.

Мы живем в трехмерном мире. Все окружающие нас реальные предметы имеют те или иные

Окончание. Начало см. «ЭиЖ» № 8'2010, с. 7–13.

размеры во всех трех измерениях, или, как говорят физики, обладают размерностью 3.

Проведем следующий мысленный эксперимент. Выберем трехмерный, *объемный*, образец какого-нибудь материала, лучше всего — однородный кристалл. Пусть это будет кубик с длиной ребра в 1 см. Этот образец обладает определенными физическими свойствами, не зависящими от его размеров. Вблизи внешней поверхности нашего образца свойства могут отличаться от таковых в объеме. Однако относительная доля поверхностных атомов мала, и поэтому вкладом поверхностного изменения свойств можно пренебречь (именно это требование означает на языке физиков, что образец *объемный*). Теперь разделим кубик пополам — два его характерных размера останутся прежними, а один, пусть это будет высота d , уменьшится в 2 раза. Что произойдет со свойствами образца? Они не изменятся. Повторим этот эксперимент еще раз и измерим интересующее нас свойство. Мы получим тот же результат. Неоднократно повторяя эксперимент, мы наконец дойдем до некоторого критического размера d^* , ниже которого измеряемое нами свойство начнет зависеть от размера d . Почему? При $d \leq d^*$ доля вклада поверхностных атомов в свойства становится существенной и будет продолжать расти с дальнейшим уменьшением d .

Физики говорят что при $d \leq d^*$ в нашем образце наблюдается *квантово-размерный эффект в одном измерении*. Для них наш образец не является больше трехмерным (что для любого обычного человека звучит абсурдно, ведь наше d хоть и мало, но не равно нулю!), его *размерность понижена до двух*. А сам образец называется *квантовой плоскостью*, или *квантовой ямой*, по аналогии с часто употребляемым в физике термином «потенциальная яма».

Если в некоем образце $d \leq d^*$ в двух измерениях, то его называют *одномерным квантовым объектом*, или *квантовой нитью*, или *квантовым проводом*. У *нуль-мерных объектов*, или *квантовых точек*, $d \leq d^*$ во всех трех измерениях.

Естественно, что критический размер d^* не является постоянной величиной для разных материалов и даже для одного материала может существенно варьироваться в зависимости от того, какое из свойств мы измеряли в нашем эксперименте, или, говоря другими словами, какая из критических размерных характеристик физических явлений определяет данное свойство (свободный пробег электронов фононов, длина волны де Брой-

ля, длина диффузии, глубина проникновения внешнего электромагнитного поля или акустических волн и пр.).

Однако оказывается, что при всем многообразии явлений, происходящих в органических и неорганических материалах в живой и неживой природе, величина d^* лежит примерно в интервале 1–100 нм. Таким образом, «нанообъект» («наноструктура», «наночастица») — это просто другой вариант термина «квантово-размерная структура». Это объект, у которого $d \leq d^*$ по крайней мере в одном измерении. Это частицы пониженной размерности, частицы с повышенной долей поверхностных атомов. А значит, классифицировать их логичнее всего по степени снижения размерности: 2D — квантовые плоскости, 1D — квантовые нити, 0D — квантовые точки.

Весь спектр сниженных размерностей можно легко объяснить и главное — экспериментально наблюдать на примере углеродных наночастиц.

Открытие наноструктур углерода явилось очень важной вехой в развитии концепции наночастиц.

Углерод — всего лишь одиннадцатый по распространенности в природе элемент, однако благодаря уникальной способности его атомов соединяться друг с другом и образовывать длинные молекулы, включающие в качестве заместителей и другие элементы, возникло громадное множество органических соединений да и сама Жизнь. Но, даже соединяясь только сам с собой, углерод способен порождать большой набор различных структур с весьма разнообразными свойствами — так называемых аллотропных модификаций.* Алмаз, например, является эталоном прозрачности и твердости, диэлектриком и теплоизолятором. Однако графит — идеальный «поглотитель» света, сверхмягкий материал (в определенном направлении), один из лучших проводников тепла и электричества (в плоскости, перпендикулярной вышеназанному направлению). А ведь оба этих материала состоят только из атомов углерода!

Но все это на макроуровне. А переход на наноразмер открывает новые уникальные свойства углерода. Оказалось, что «любовь» атомов углерода друг к другу настолько велика, что они могут без участия других элементов образовывать целый набор наноструктур, отличающихся друг от друга в том числе и размерностью. В их число входят

* Аллотропия (от греч. allos — иной и tropos — поворот, свойство) — существование одного и того же химического элемента в виде различных по свойствам и строению структур.

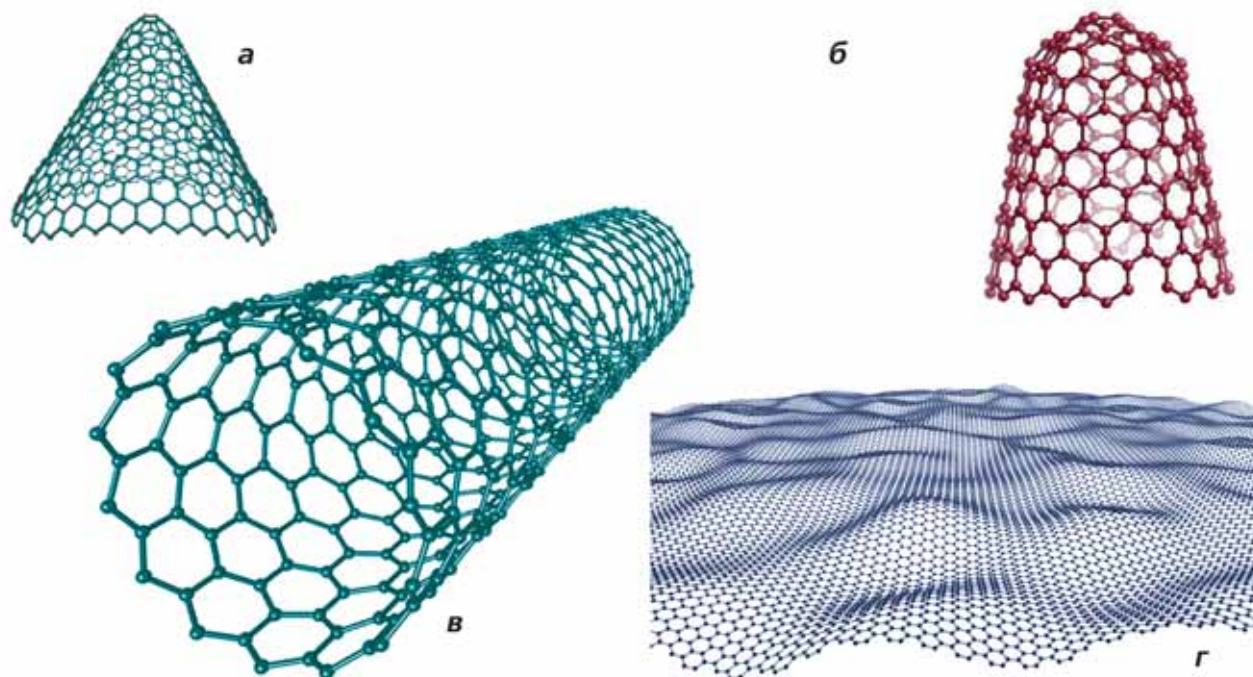


Рис. 5. Некоторые наноструктуры углерода: а – нанокон, б – нанохорн, в – нанотрубка, г – графен

фуллерены, графен, нанотрубки, наноконны и т. п. (рис. 5).

Отметим при этом, что наноструктуры углерода можно назвать «истинными» наночастицами, так как в них, как хорошо видно на рис. 5, все составляющие их атомы лежат на поверхности.

Но вернемся к самому графиту. Итак, графит — самая распространенная и термодинамически стабильная модификация элементарного углерода с трехмерной кристаллической структурой, состоящей из параллельных атомных слоев, каждый из которых представляет собой плотную упаковку шестиугольников (рис. 6). В вершинах любого такого шестиугольника расположен атом углерода, а стороны шестиугольников графически отражают прочные ковалентные связи* между атомами углерода, длина которых составляет 0,142 нм. А вот расстояние между слоями достаточно велико (0,334 нм), и поэтому связь между слоями достаточно слабая (в этом случае говорят о ван-дер-ваальсовом взаимодействии**).

Такая кристаллическая структура и объясняет особенности физических свойств графита. Во-

первых, низкую твердость и способность легко расслаиваться на мельчайшие чешуйки. Так, например, пишут грифели карандашей, графитовые чешуйки которых, отслаиваясь, остаются на бумаге. Во-вторых, уже упоминавшуюся ярко выраженную анизотропию физических свойств графита и прежде всего его электрической проводимости и теплопроводности.

Любой из слоев трехмерной структуры графита можно рассматривать как гигантскую плоскостную структуру, имеющую размерность 2D. Такая двумерная структура, построенная только из атомов углерода, получила название «графен». Получить такую структуру «относительно» легко, во всяком случае в мысленном эксперименте. Возьмем графитовый карандашный грифель и начнем писать. Высота грифеля d будет уменьшаться. Если хватит терпения, то в какой-то момент величина d сравняется с d^* , и мы получим квантовую плоскость (2D).

Долгое время проблема стабильности плоских двумерных структур в свободном состоянии (без подложки) в общем и графена в частности, а также электронные свойства графена были предметом только теоретических исследований. Совсем недавно, в 2004 г., группой физиков во главе с А. Геймом и К. Новосёловым были получены первые образцы графена, что произвело революцию в этой области, так как такие двумерные структуры оказались, в частности, способными проявлять по-

* Ковалентной называется химическая связь за счет образования общей для двух соседних атомов пары электронов и кулоновского притяжения между этой парой и ядрами атомов.

** Ван-дер-ваальсово взаимодействие, или ван-дер-ваальсова связь — слабая химическая связь, основанная на силах межмолекулярного взаимодействия с энергией 0,8–8,16 кДж/моль, возникающим при поляризации молекул и образовании диполей. Открыты Я.Д. ван дер Ваальсом в 1869 г.

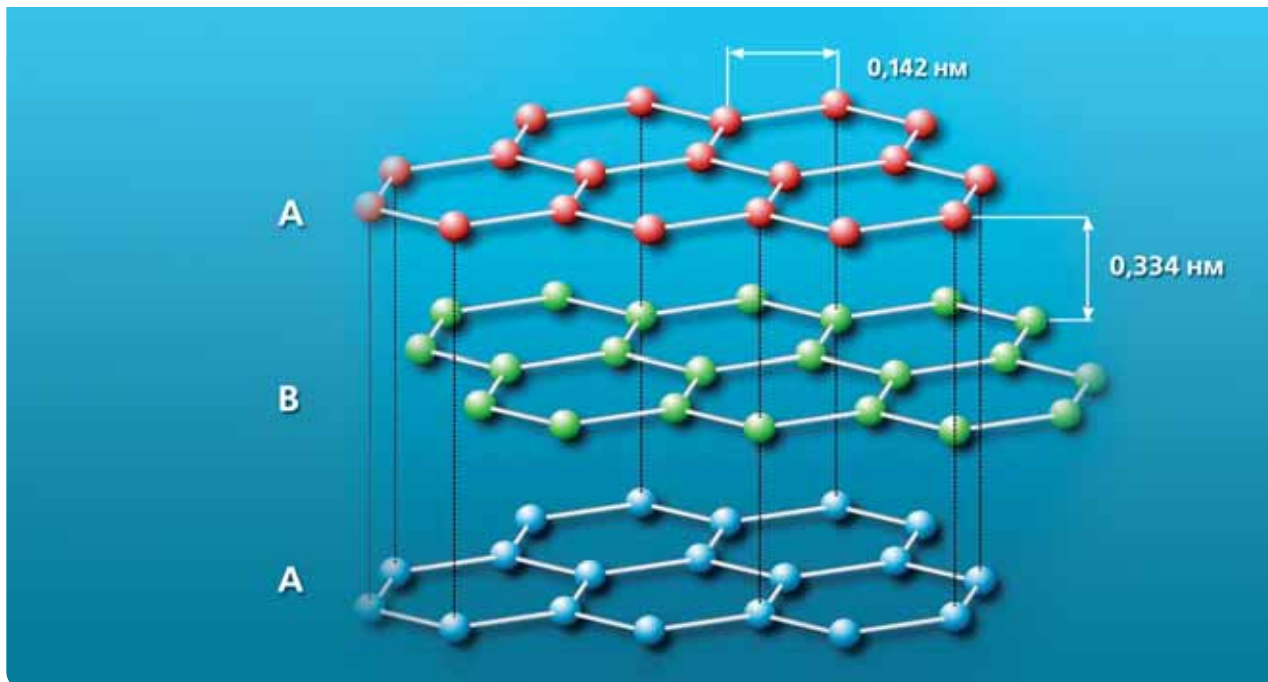


Рис. 6. Кристаллическая структура графита

разительные электронные свойства, качественно отличающиеся от всех прежде наблюдаемых. Поэтому сегодня сотни экспериментальных групп и исследуют электронные свойства графена.

Если свернуть графеновый слой, моноатомный по толщине, в цилиндр таким образом, чтобы гексагональная сетка атомов углерода замкнулась без швов, то мы «сконструируем» *одностенную углеродную нанотрубку*. Экспериментально можно получать одностенные нанотрубки диаметром от 0,43 до 5 нм. Характерными особенностями геометрии нанотрубок являются рекордные значения удельной поверхности (в среднем $\sim 1600 \text{ м}^2/\text{г}$ для одностенных трубок) и отношения длины к диаметру (100 000 и выше). Таким образом, нанотрубки представляют собой 1D нанообъект — квантовые нити.

В экспериментах наблюдались также и многостенные углеродные нанотрубки (рис. 7). Они состоят из коаксиальных цилиндров, вставленных один в другой, стенки которых находятся на расстоянии (около $3,5 \text{ \AA}$), близком к межплоскостному расстоянию в графите ($0,334 \text{ нм}$). Количество стенок может варьироваться от 2 до 50.

Если же поместить кусок графита в атмосферу инертного газа (гелия или аргона) и затем осветить лучом мощного импульсного лазера или концентрированного солнечного света, то можно испарить материал нашей графитовой мишени (заметим, что для этого температура поверхности мише-

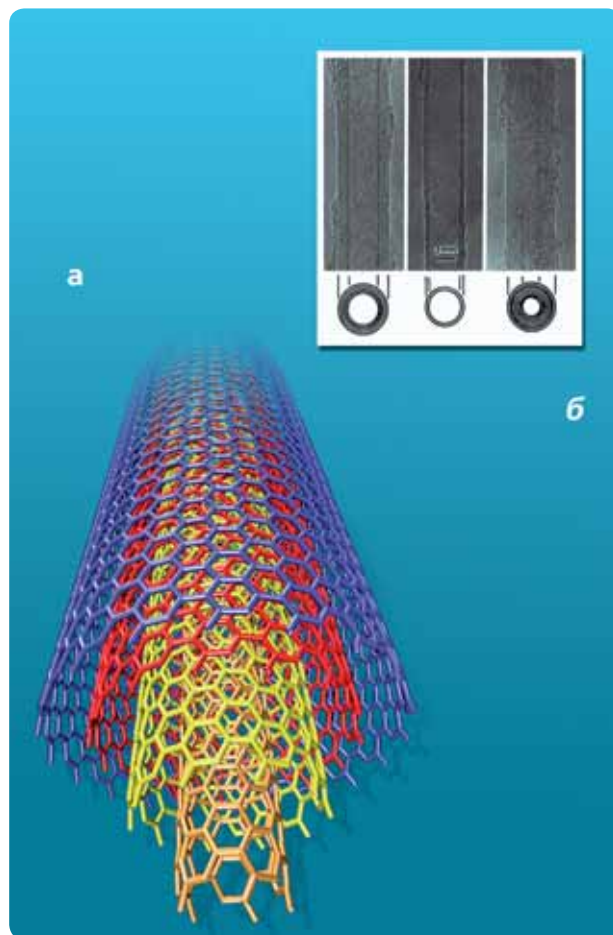
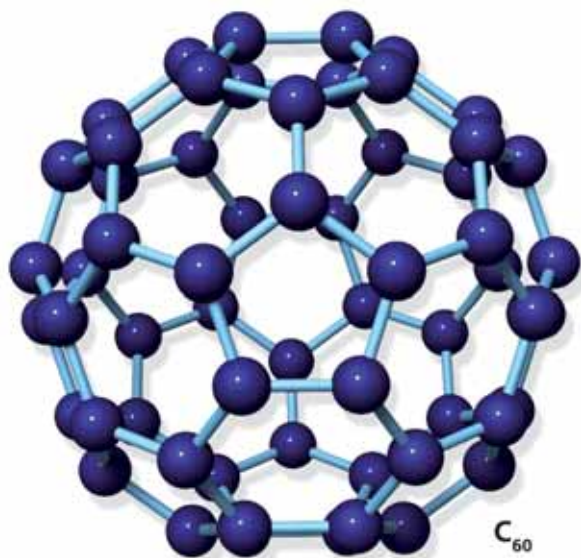


Рис. 7. Многостенные углеродные нанотрубки: а — схема многостенных углеродных нанотрубок; б — электронно-микроскопические изображения многостенных углеродных нанотрубок



ни должна быть как минимум 2700 °С). В таких условиях над поверхностью мишени образуется плазма, состоящая из индивидуальных атомов углерода, которые увлекаются потоком холодного газа, что приводит к охлаждению плазмы и образованию кластеров углерода. Так вот, оказывается, что при определенных условиях кластеризации атомы углерода замыкаются с образованием каркасной сферической молекулы C_{60} размерностью 0D (т. е. квантовая точка), уже показанной на рис. 1.

Такое самопроизвольное образование молекулы C_{60} в углеродной плазме было обнаружено в совместном эксперименте Г. Крото, Р. Кёрла и Р. Смоли, проведенном в течение десяти дней в сентябре 1985 г. Отошлем любознательного читателя к книге Е.А. Каца «Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей», подробно описывающей увлекательную историю этого открытия и события, ему предшествующие (с краткими экскурсами в историю науки вплоть до эпохи Возрождения и даже Античности), а также объясняющей мотивацию странного на первый взгляд (и только на первый взгляд) названия новой молекулы — *бакминстерфуллерен* — в честь архитектора Р. Бакминстера Фуллера (см. также книгу [Пиотровский, Киселев, 2006]).

Впоследствии было обнаружено, что существует целое семейство углеродных молекул — *фуллеренов* — в форме выпуклых многогранников, состоящих только из шестиугольных и пятиугольных граней (рис. 8).

Именно открытие фуллеренов явилось своеобразным волшебным «золотым ключиком» в новый

мир нанометровых структур из чистого углерода, вызвало взрыв работ в этой области. К настоящему времени обнаружено большое количество различных углеродных кластеров с фантастическим (в прямом смысле этого слова!) разнообразием структуры и свойств.

Но вернемся к наноматериалам.

Наноматериалами называются материалы, структурными единицами которых являются нанообъекты (наночастицы). Образно говоря, здание наноматериала сложено из кирпичей-нанообъектов. Поэтому классифицировать наноматериалы продуктивнее всего по размерности как самого образца наноматериала (внешних размеров матрицы), так и по размерности составляющих его нанообъектов. Наиболее подробная классификация такого рода приведена в работе [Pokropivny, Skorokhod, 2008]. Представленные в этой работе 36 классов наноструктур описывают все многообразие наноматериалов, некоторые из которых (как указанные выше фуллерены или углеродный наногорх) уже успешно синтезированы, а некоторые все еще ждут своей экспериментальной реализации.

Почему все не так просто

Итак, мы можем строго определить интересующие нас понятия «нанонаука», «нанотехнология» и «наноматериалы» только в том случае, если понимаем, что такое «нанообъект».

«Нанообъект» же, в свою очередь, имеет два определения. Первое, более простое (технологическое): это объекты (частицы) с характерным размером *приблизительно* в 1–100 нанометров хотя бы по одному измерению. Второе определение, более научное, физическое: объект с пониженной размерностью (у которого $d \leq d^*$ по крайней мере в одном измерении).

Других определений, насколько нам известно, не имеется.

Не может не бросаться в глаза, однако, тот факт, что и научное определение обладает серьезным недостатком. А именно: в нем, в отличие от технологического, определяется только верхний предел наноразмеров. Должен ли существовать нижний предел? По нашему мнению, конечно, должен. Первая причина существования нижнего предела непосредственно вытекает из физической сущности научного определения нанообъекта, так как большинство обсуждавшихся выше эффектов понижения размерности являются эффектами квантового ограничения, или явлениями резонансной

природы. Иными словами, они наблюдаются при совпадении характерных длин эффекта и размеров объекта, т. е. не только для $d \leq d^*$, что уже обсуждалось, но в то же время только если размер d превышает некий нижний предел d^{**} ($d^{**} \leq d \leq d^*$). При этом очевидно, что величина d^{**} может варьироваться для разных явлений, но должна превышать размеры атомов.

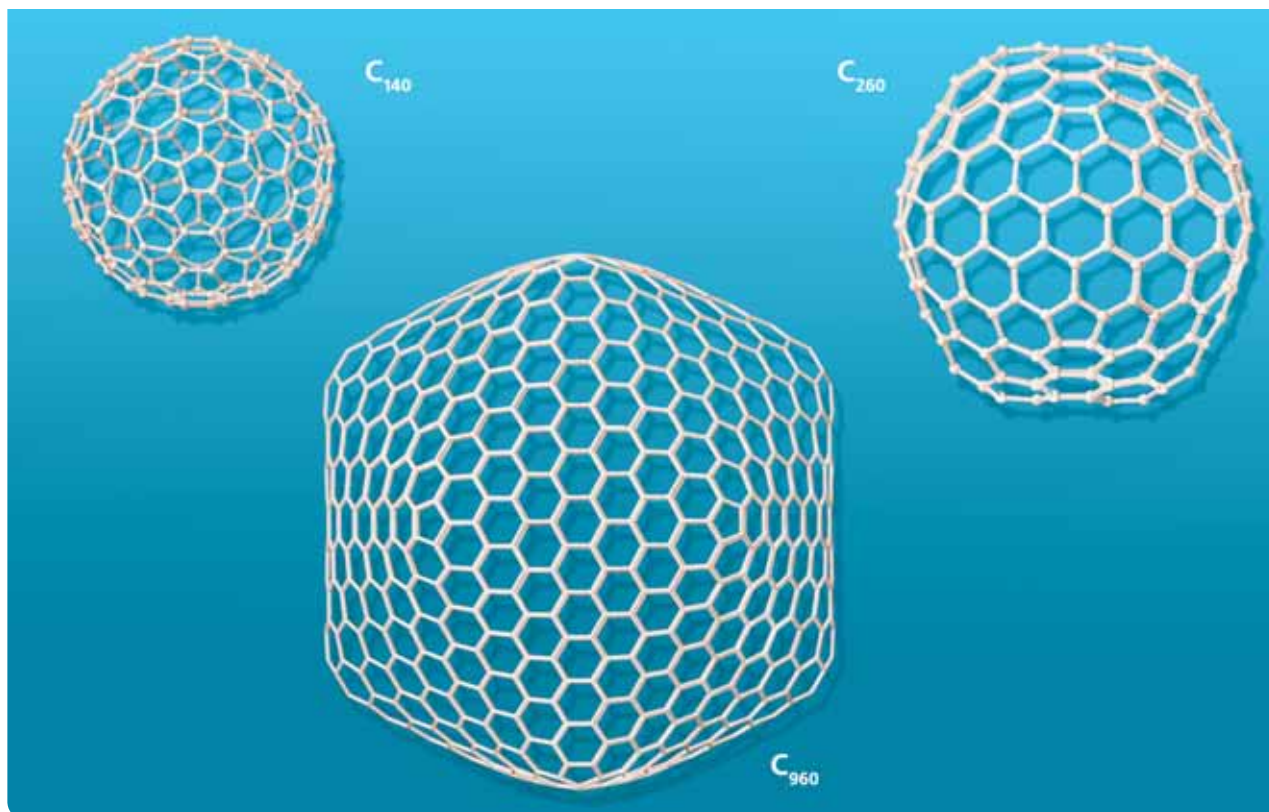
Проиллюстрируем сказанное на примере соединений углерода. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) типа нафталина, бензпирена, хризена и т. п. являются формально аналогами графена. Более того, самый большой из известных ПАУ имеет общую формулу $C_{222}H_{44}$ и содержит 10 бензольных колец по диагонали. Однако они не обладают теми удивительными свойствами, которыми обладает графен, и их нельзя рассматривать как наночастицы. То же самое относится и к nanoалмазам: до $\sim 4\text{--}5$ нм это nanoалмазы, но близко к этим границам, и даже заходя за них, подходят высшие диамандоиды (аналоги адамантана, имеющие конденсированные алмазные ячейки в качестве основы структуры).

Итак: если в пределе размер объекта по всем трем измерениям будет равен размеру атома, то, например, кристалл, сложенный из таких 0-мер-

ных объектов будет не наноматериалом, а обычным атомарным кристаллом. Это очевидно. Как очевиден и тот факт, что количество атомов в нанобъекте должно все-таки превосходить единицу. Если у нанобъекта все три значения d меньше, чем d^{**} , он перестает им быть. Такой объект надо описывать на языке описания индивидуальных атомов.

А если не все три размера, а только один, например? Остается ли такой объект нанобъектом? Конечно, да. Таким объектом является, например, уже не раз упоминавшийся графен. То, что характерный размер графена в одном измерении равен диаметру атома углерода, не лишает его свойств наноматериала. И свойства эти абсолютно уникальны. Были измерены проводимость, эффект Шубникова — де Гааза, квантовый эффект Холла в графеновых пленках атомарной толщины. Эксперименты подтвердили, что графен — полупроводник с нулевой шириной запрещенной зоны, при этом в точках соприкосновения валентной зоны и зоны проводимости энергетический спектр электронов и дырок линеен как функция волнового вектора. Такого рода спектром обладают частицы с нулевой эффективной массой, в частности фотоны, нейтрино, релятивистские частицы. От-

Рис. 8. Примеры гигантских фуллеренов с икосаэдральной симметрией: C_{140} , C_{260} , C_{960}



личие фотонов и безмассовых носителей в графене состоит в том, что последние являются фермионами, и они заряжены. В настоящее время аналогов для этих безмассовых заряженных фермионов Дирака среди известных элементарных частиц нет. Сегодня графен представляет огромный интерес как для проверки множества теоретических предположений из областей квантовой электродинамики и теории относительности, так и для создания новых устройств наноэлектроники, в частности баллистического и одноэлектронного транзисторов.

Для нашей дискуссии весьма важно, что наиболее близким к понятию нанобъекта является размерный участок, на котором реализуются так называемые мезоскопические явления. Это минимальный размерный участок, для которого резонно говорить не о свойствах индивидуальных атомов или молекул, а о свойствах материала в целом (например, при определении температуры, плотности или проводимости материала). Мезоскопические размеры как раз попадают в интервал 1–100 нм. (Приставка «мезо-» происходит от греческого слова «средний», промежуточный — между атомарными и макроскопическими размерами.)

Всем известно, что психология занимается поведением индивидуумов, а социология — поведением больших групп людей. Так вот, отношения в группе из 3–4 человек можно по аналогии охарактеризовать как мезоявления. Точно так же, как уже упоминалось выше, маленькая кучка атомов — это что-то не похожее ни на «кучу» атомов, ни на отдельный атом.

Тут следует отметить еще одну важную особенность свойств нанобъектов. Несмотря на то, что в отличие от графена углеродные нанотрубки и фуллерены являются формально 1- и 0-мерными объектами соответственно, по существу это не совсем так. Вернее, так и не так одновременно. Дело в том, что нанотрубка — это тот же графеновый 2D одноатомный слой, свернутый в цилиндр.* А фуллерен — это углеродный 2D слой одноатомной толщины, замкнутый по поверхности сферы. То есть свойства нанобъектов существенно зависят не только от их размеров, но и от топологических характеристик — попросту говоря, от их формы.

* Экспериментальной иллюстрацией этого утверждения является недавно опубликованная разработка технологических приемов получения графеновых листов путем «химического разрезания» и «разворачивания» углеродных нанотрубок.

Итак, правильное научное определение нанобъекта должно быть следующим:

это объект, у которого хотя бы один из размеров $\leq d^$, при этом хотя бы один из размеров превышает d^{**} . Иными словами, объект достаточно велик, чтобы обладать макросвойствами вещества, но в то же время характеризуется пониженной размерностью, т. е. хотя бы по одному из измерений достаточно мал, чтобы значения этих свойств сильно отличались от соответствующих свойств макрообъектов из этого же вещества, существенно зависели от размеров и формы объекта. При этом точные значения размеров d^* и d^{**} могут варьироваться не только от вещества к веществу, но и для разных свойств одного и того же вещества.*

То, что эти соображения отнюдь не являются схоластическими (типа «со скольких песчинок начинается куча?»), а имеют глубокий смысл для понимания единства науки и непрерывности окружающего нас мира, становится очевидным, если мы обратим свой взор на нанобъекты органического происхождения.

Нанобъекты органической природы — супрамолекулярные структуры

Выше мы рассматривали только неорганические относительно однородные материалы, и уже там все было не так просто. Но на Земле есть колоссальное количество материи, которую не просто трудно, а нельзя назвать однородной. Речь идет о биологических структурах и вообще о Живой материи.

В «Национальной нанотехнологической инициативе» в качестве одной из причин особого интереса к области наноразмеров указывается:

так как системная организация материи на наноуровне является ключевой особенностью биологических систем, наноуника и технология дадут возможность включать в клетки искусственные компоненты и ансамбли, создавая тем самым новые структурно организованные материалы на основе подражания методам самосборки в природе.

Попробуем теперь разобраться, какой смысл имеет понятие «наноразмер» в приложении к биологии, памятуя о том, что при переходе к этому размерному интервалу должны принципиально или резко изменяться свойства. Но сначала вспомним, что к нанобласти можно подойти двумя путями: «сверху вниз» (дробление) или «снизу вверх»

(синтез). Так вот, движение «снизу вверх» для биологии представляет собой не что иное, как образование из отдельных молекул биологически активных комплексов.

Рассмотрим коротко химические связи, которые определяют строение и форму молекулы. Первой и самой сильной является ковалентная связь, характеризующаяся строгой направленностью (только от одного атома к другому) и определенной длиной, которая зависит от типа связи (одинарная, двойная, тройная и т. п.). Именно ковалентные связи между атомами определяют «первичную структуру» любой молекулы, т. е. какие атомы и в каком порядке связаны друг с другом.

Но существуют и другие типы связей, определяющие то, что называется вторичной структурой молекулы, ее форму. Это прежде всего водородная связь — связь между полярным атомом и атомом водорода. Она ближе всего к ковалентной связи, так как также характеризуется определенной длиной и направленностью. Однако эта связь слабая, ее энергия на порядок ниже энергии ковалентной связи. Остальные типы взаимодействий являются ненаправленными и характеризуются не длиной образуемых связей, а скоростью убывания энергии связи с увеличением расстояния между взаимодействующими атомами (дальнодействием). Ионная связь является дальнодействующим взаимодействием, ван-дер-ваальсовы взаимодействия являются короткодействующими. Так, если расстояние между двумя частицами увеличивается в r раз, то в случае ионной связи притяжение снизится до $1/r^2$ от начального значения, в случае уже не раз упоминавшегося ван-дер-ваальсового взаимодействия — до $1/r^3$ и более (до $1/r^{12}$). Все эти взаимодействия в общем случае можно определить как межмолекулярные взаимодействия.

Рассмотрим теперь такое понятие, как «биологически активная молекула». Следует признать, что молекула вещества сама по себе представляет интерес только для химиков и физиков. Их интересует ее строение («первичная структура»), ее форма («вторичная структура»), такие макроскопические показатели, как, например, агрегатное состояние, растворимость, температуры плавления и кипения и т. п., и микроскопические* (электронные эффекты и взаимное влияние ато-

мов в данной молекуле, спектральные свойства как проявление этих взаимодействий). Другими словами, речь идет об изучении свойств, проявляемых в принципе одной молекулой. Напомним, что по определению молекула — это наименьшая частица вещества, несущая его химические свойства.

С точки же зрения биологии «изолированная» молекула (в данном случае не важно, одна это молекула или какое-то количество одинаковых молекул) не способна проявлять никаких биологических свойств. Этот тезис звучит достаточно парадоксально, но попробуем его обосновать.

Рассмотрим это на примере ферментов — белковых молекул, представляющих собой биохимические катализаторы. Например, фермент гемоглобин, обеспечивающий перенос кислорода в ткани, состоит из четырех белковых молекул (субъединиц) и одной так называемой простетической группы — гемма, содержащего атом железа, нековалентно связанного с белковыми субъединицами гемоглобина.

Основной, а точнее определяющий вклад во взаимодействие белковых субъединиц и гемма, взаимодействие, приводящее к образованию и устойчивости надмолекулярного комплекса, который и называется гемоглобином, вносят силы, именуемые иногда гидрофобными взаимодействиями, но представляющие собой силы межмолекулярного взаимодействия. Связи, образуемые этими силами, значительно слабее ковалентных. Но при комплементарном взаимодействии, когда две поверхности очень близко подходят друг к другу, число этих слабых связей велико, и поэтому общая энергия взаимодействия молекул достаточно высока и образующийся комплекс достаточно устойчив. Но пока не образовались эти связи между четырьмя субъединицами, пока не присоединилась (опять-таки за счет нековалентных связей) простетическая группа (гемм), ни при каких условиях отдельные части гемоглобина связывать кислород не могут и тем более не могут никуда его переносить. И, следовательно, данной биологической активностью не обладают. (Эти же самые рассуждения можно распространить и на все ферменты в целом.)

При этом сам процесс катализа подразумевает образование в ходе реакции комплекса из как минимум двух компонентов — самого катализатора и молекулы (молекул), называемых субстратом(ами), претерпевающей(их) какие-то химические превращения под действием катализатора. Другими сло-

* Слово «микроскопические» употреблено здесь лишь потому, что так эти свойства назывались ранее, хотя речь в данном случае идет о свойствах, проявляемых молекулами и атомами, т. е. о пикоразмерном интервале.

вами, должен образоваться комплекс как минимум из двух молекул, т. е. супрамолекулярный (надмолекулярный) комплекс.

Идея комплементарного взаимодействия впервые была предложена Э. Фишером для объяснения взаимодействия лекарственных веществ с их мишенью в организме и названа взаимодействием «ключ к замку». Хотя лекарственные (и иные биологические вещества) далеко не во всех случаях представляют собой ферменты, но и они способны вызвать какой-либо биологический эффект только после взаимодействия с соответствующей биологической мишенью. А такое взаимодействие опять-таки есть не что иное, как образование супрамолекулярного комплекса.

Следовательно, проявление «обычными» молекулами принципиально новых свойств (в рассматриваемом случае — биологической активности) связано с образованием ими надмолекулярных (супрамолекулярных) комплексов с другими молекулами за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Именно так устроено большинство ферментов и систем в организме (рецепторы, мембраны и т. п.), в том числе такие сложные структуры, которые иногда называются биологическими «машинами» (рибосомы, АТФаза и др.). Причем происходит это именно на уровне *нанометровых размеров* — от одного до нескольких десятков нанометров.

При дальнейшем усложнении и увеличении размеров (более 100 нм), т. е. при переходе на другой размерный уровень (микроуровень), возникают значительно более сложные системы, способные не только к самостоятельному существованию и взаимодействию (в частности, к обмену энергией) с окружающей их средой, но и к самовоспроизведению. То есть опять происходит изменение свойств всей системы — она становится настолько сложной, что уже способна к самовоспроизведению, возникает то, что мы называем живыми структурами.

Многие мыслители неоднократно пытались дать определение Жизни. Не вдаваясь в философские дискуссии, отметим, что, на наш взгляд, жизнь есть существование самовоспроизводящихся структур, а начинаются живые структуры с отдельной клетки. Жизнь есть микро- и макроскопический феномен, а вот основные процессы, обеспечивающие функционирование живых систем, протекают на уровне наноразмеров.

Функционирование живой клетки как интегрированного саморегулирующегося устройства с ярко выраженной структурной иерархией обес-

печивается миниатюризацией на наноразмерном уровне. Очевидно, что миниатюризация на уровне наноразмеров является принципиальным атрибутом биохимии, а следовательно, эволюция жизни состоит из появления и интеграции различных форм наноструктурированных объектов.* Именно наноразмерный участок структурной иерархии, ограниченный по размерам как сверху, так и снизу (!), является критичным для появления и способности к существованию клеток. То есть именно уровень наноразмеров представляет собой переход от уровня молекулярного к уровню Живого.

Однако из-за того что миниатюризация на уровне наноразмеров является принципиальным атрибутом биохимии, нельзя все-таки рассматривать любые биохимические манипуляции как нанотехнологические — нанотехнологии предполагают все-таки конструирование, а не банальное применение молекул и частиц.

Заключение

В начале статьи мы уже пытались как-то классифицировать объекты различных естественных наук по принципу характерных размеров исследуемых ими объектов. Вернемся к этому снова и, применив эту классификацию, получим, что атомная физика, изучающая взаимодействия внутри атома, — это субангстремные (фемто- и пико-) размеры.

«Обычные» неорганическая и органическая химия — это ангстремные размеры, уровень отдельных молекул или связей внутри кристаллов неорганических веществ. А вот биохимия — это уровень наноразмеров, уровень существования и функционирования супрамолекулярных структур, стабилизированных нековалентными межмолекулярными силами.

Но биохимические структуры еще относительно просты, и функционировать они могут относительно независимо (*in vitro*, если угодно). Дальнейшее усложнение, образование супрамолекулярными структурами сложных ансамблей — это есть переход к самовоспроизводящимся структурам, переход к Живому. И здесь уже на уровне клеток это микро-размеры, а на уровне организмов — макро-размеры. Это уже биология и физиология.

Наноуровень представляет собой переходную область от уровня молекулярного, образующего

* Что, в частности, привело к возникновению точки зрения, что жизнь есть феномен нанометровых размеров [Mann, 2008], что, на наш взгляд, не совсем верно.



Рис. 9. Усложнение структуры в биологическом мире

базис существования всего живого, состоящего из молекул, к уровню Живого, уровню существования самовоспроизводящихся структур, а наночастицы, представляющие собой супрамолекулярные структуры, стабилизированные силами межмолекулярного взаимодействия, представляют собой переходную форму от отдельных молекул к сложным функциональным системам. Это можно отразить схемой, подчеркивающей, в частности, и непрерывность Природы (рис. 9). В схеме мир наноразмеров расположен между атомно-молекулярным миром и миром Живого, состоящего из тех же атомов и молекул, но организованных в сложные самовоспроизводящиеся структуры, а переход из одного мира в другой определяется не только (и не столько) размерами структур, сколько их сложностью. Природа давно придумала и использует в живых системах супрамолекулярные структуры. Мы же далеко не всегда можем понять, а тем более повторить то, что Природа делает легко и непринужденно. Но нельзя ждать от нее милостей, надо у нее учиться.

Литература

- Вуль А.Я., Соколов В.И. Исследования нанотрубок в России: от фуллеренов к нанотрубкам и нанополупроводникам/ Российские нанотехнологии, 2007. Т. 3 (3–4).
- Кац Е.А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: родословная форм и идей. — М.: ЛКИ, 2008.
- Оствальд В. Мир обойденных величин. — М.: Изд-во товарищества «Мир», 1923.
- Пиотровский Л.Б., Киселев О.И. Фуллерены в биологии. — Ростов, СПб, 2006.
- Ткачук В.А. Нанотехнологии и медицина/ Российские нанотехнологии, 2009. Т. 4 (7–8).
- Хобза П., Заградник Р. Межмолекулярные комплексы. — М.: Мир, 1989.
- Mann S. Life as a nanoscale phenomenon. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008, 47, 5306–5320.
- Pokropivny V.V., Skorokhod V.V. New dimensionality classifications of nanostructures/ *Physica E*, 2008, v. 40, p. 2521–2525.