

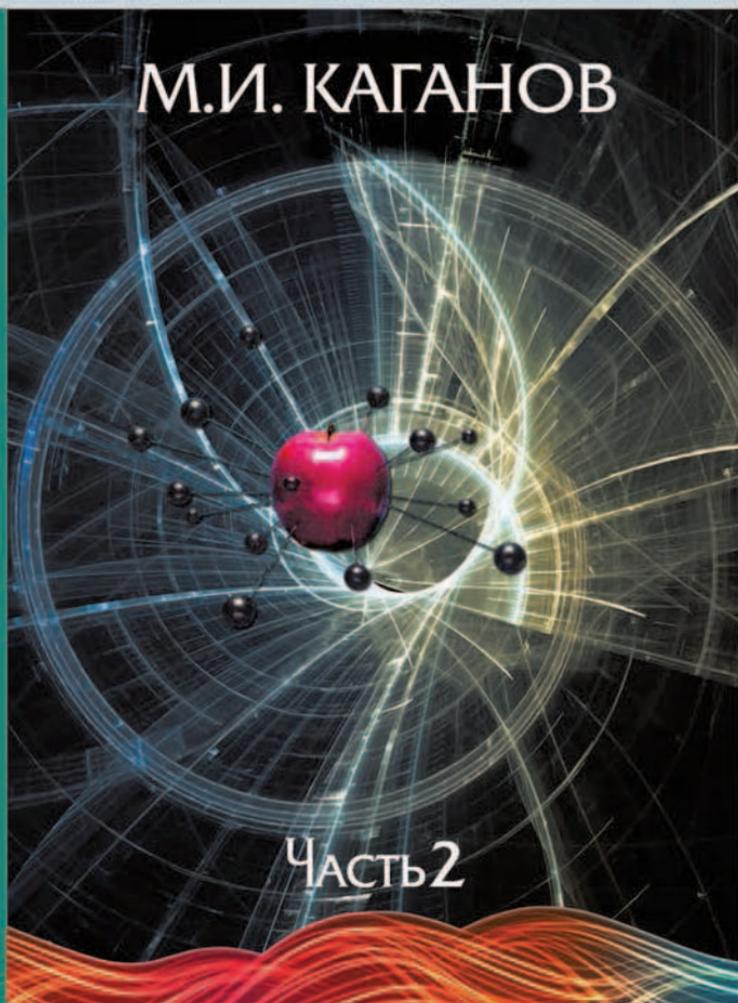
ВЫПУСК

130



Библиотечка КВАНТ

М.И. КАГАНОВ



Часть 2

ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА

Библиотечка «Квант»
Приложение к журналу «Квант» № 2/2014

М. И. Каганов

Физика глазами физика

Часть 2

Электронное издание

Москва
Издательство МЦНМО
2016

УДК 51(091)
ББК 22.3
К93

Каганов М. И.

Физика глазами физика. Часть 2.

Библиотечка «Квант». Вып. 129. Приложение к журналу «Квант» № 2/2014.

Электронное издание.

М.: МЦНМО, 2016.

208 с.

ISBN 978-5-4439-2379-6

Эта книга является продолжением предыдущего выпуска (129) Библиотечки «Квант». В двух книгах собраны вместе все публиковавшиеся в журнале «Квант» статьи одного из самых постоянных и любимых авторов — Моисея Исааковича Каганова, физика-теоретика, специалиста в области квантовой теории твердого тела, одного из ярких представителей школы Ландау.

Статьи в сборниках расположены в хронологическом порядке. Первая статья была напечатана в журнале «Квант» № 12 за 1970 год, последняя статья (опубликованная только в данном выпуске Библиотечки «Квант») поступила в редакцию в октябре 2013 года.

Книга адресована прежде всего тем молодым людям, кто в будущем видит себя физиком. Но, несомненно, она будет интересна и самому широкому кругу читателей.

Подготовлено на основе книги:

Каганов М. И. Физика глазами физика. Часть 2. — М.: МЦНМО, 2014. — 208 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 129. Приложение к журналу «Квант» № 2/2014. — ISBN 978-5-4439-0619-5

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11,
тел. (499)241-08-04.
<http://www.mccme.ru>

ISBN 978-5-4439-2379-6

© Каганов М. И., 2014.

© МЦНМО, 2016.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Сверх... (2)	5
Об абстракции в физике	16
Удивление, понимание, восхищение	36
Как квантовая механика описывает микромир	49
Квантовые чудеса	87
Лев Давидович Ландау	106
«Электроны, фононы, магноны»	108
Две простые, но не вполне тривиальные формулы	113
На берегу океана непознанного: иллюзия простоты	124
Постоянная Планка – символ квантового века	166

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом и предыдущем выпусках Библиотечки «Квант» редакция решила сделать подарок читателям: собрать вместе все публиковавшиеся в «Кванте» статьи одного из самых постоянных и самых любимых авторов – Моисея Исааковича Каганова.

Моисей Исаакович Каганов – физик-теоретик, один из ярких представителей школы Ландау, специалист в области квантовой теории твердого тела. Доктор физико-математических наук, профессор МГУ имени М.В.Ломоносова и почетный доктор Вроцлавского технологического университета. Участник Великой Отечественной войны. В 1949 году окончил физико-математический факультет Харьковского государственного университета, с 1949 по 1970 год работал в Украинском физико-техническом институте, а с 1970 по 1994 год – в Институте физических проблем имени П.Л.Капицы. Одновременно преподавал – сначала в Харьковском университете, потом в Московском. Сейчас живет в США.

По замечательным научным монографиям Моисея Исааковича (с соавторами) воспитывалось несколько поколений молодых физиков, а его удивительные научно-популярные статьи и книги помогли многим школьникам выбрать свой жизненный путь.

В 2011 году Моисею Исааковичу исполнилось 90 лет, однако он продолжает активно работать. Его статья «Постоянная Планка – символ квантового века» написана совсем недавно и впервые публикуется в предлагаемом вашему вниманию сборнике.

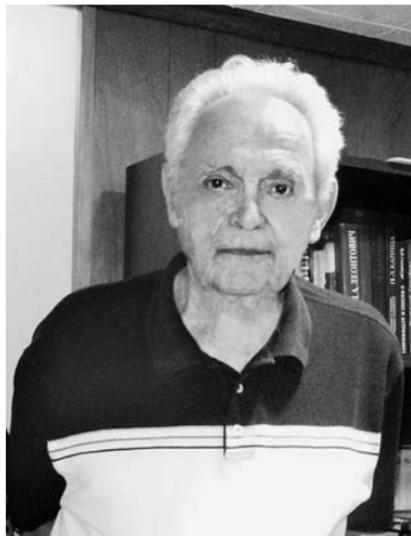
Почему я решил написать статью с таким лапидарным названием, рассказано в предыдущей статье (см. статью «Сверх...» в выпуске 129 Библиотечки «Квант» – *прим. ред.*).

Возможно, имеет смысл добавить несколько фраз. Тот, кто решит вслед за мной перелистать «Физическую энциклопедию» (ФЭ), обратите, пожалуйста, внимание на тот факт, что в 5-м томе есть группа слов, начинающихся с приставки «супер» – от *супергетеродина*¹ до *суперструны*. Приставки «сверх» и «супер» по смыслу очень близки, если не тождественны. Но мне показалось, что они «разделили» между собой области физики: приставкой «супер» чаще начинаются термины атомной физики, физики элементарных частиц, квантовых полей, а приставкой «сверх» – термины физики макроскопических систем. Конечно, есть исключения (супергетеродин – одно из них).

Просматривая статьи, начинающиеся приставкой «супер», обнаружил термин *суперрешетка*, но вместо статьи – отсылка в 4-й том к термину *сверхрешетка*. Вот с этого понятия и начнем эту статью.

Сверхрешетки

Признаюсь, к сверхрешеткам у меня особый интерес. Около 15 лет назад мой коллега В.Н.Луцкий высказал идею, а мы втроем (Виля Наумович, А.Я.Шик и я) сделали и



Моисей Исаакович Каганов
(август 2013 года)

¹ Напомним: если слово напечатано курсивом, значит, в ФЭ есть статья с таким названием.

опубликовали работу, в которой рассмотрели некоторые особенности проводимости сверхрешеток в квантующем магнитном поле (см. «Журнал экспериментальной и теоретической физики», 1987 г., т.92, вып.2, с. 721–729). Мы уверены, что особенности, которые мы обнаружили «на кончике пера», должны наблюдаться, но пока, насколько мне известно, их никто не наблюдал. Может быть, кто-нибудь из вас, мои молодые читатели, через какое-то время вспомнит прочитанную статью из «Кванта» и попытается открыть предсказанное нами явление. (Мне очень приятно отметить, что автор статьи «Сверхрешетка» в 4-м томе ФЭ – А.Я.Шик.)

Итак, что такое сверхрешетка?

Каждый кристалл в своей основе имеет кристаллическую решетку, в узлах которой расположены атомы или ионы. Размеры ячейки кристаллической решетки у кристаллов разных сортов, конечно, различны, но, как правило, не превышают нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). Сверхрешетка – не создание природы, а рукотворный объект. Для того чтобы ее создать, надо «навязать» кристаллу период, в несколько раз превышающий период кристаллической решетки. Наиболее распространенный способ – «сложить» искусственный кристалл из слоев разных сортов. К сожалению, «складывание» на атомном уровне – весьма непростая задача, доступная только технически оснащенным лабораториям.

Если создавать сверхрешетки трудно, зачем этим заниматься? Конечно – в надежде получить не существующий в природе материал для приборов и приспособлений. Не вдаваясь в детали, перечислим, что предполагали и предполагают осуществить занимающиеся сверхрешетками: фильтры и поляризаторы инфракрасного излучения, нелинейные преобразователи СВЧ-сигналов, генераторы и усилители электромагнитных колебаний, частоты которых можно перестраивать в очень широком диапазоне изменением приложенного электрического поля, и кое-что еще. Что из этого уже осуществлено, признаюсь, не знаю. В статье, которую я цитирую, совершенный вид глагола использован лишь один раз: «Сверхрешеточные гетероструктуры находят применение также в лавинных фотодиодах». Слово «также» обнадеживает...

Несомненно, сверхрешетки создавались в практических целях. Но, кроме того, у физиков появился совершенно новый объект, исследование которого, столь же несомненно, весьма интересно. Стоит подчеркнуть, что в последние годы это не единичный случай. Все чаще исследователей привлекают рукот-

ворные объекты – объекты, не существующие в природе, а созданные руками человека для нужд современной техники. Трудно не упомянуть, что одно из наиболее интересных открытий последних десятилетий в макроскопической физике – квантовый эффект Холла – был обнаружен Клаусом фон Клитцингом в 1980 году на полевом *транзисторе* (Нобелевская премия по физике за 1985 г.).

Чем же интересны сверхрешетки?

Основой наших представлений об электронных свойствах твердых тел служит изучение движения частиц в периодическом поле сил. Один из главных результатов рассмотрения такого движения – понимание того, что разрешенные значения энергии занимают участки (интервалы) конечной ширины. Их называют зонами, а теория, описывающая движение в периодическом поле сил, называется *зонной теорией*.

В твердых телах периодическую силу создают ионы, которые, когда нас интересует движение электронов, можно считать неподвижными, закрепленными в узлах строго периодической кристаллической решетки. Разных кристаллов много, периодические силы, действующие на электроны, тоже различны. Но какие есть, такие есть. Изменять их по своей воле очень непросто. Другое дело – сверхрешетки, т.е. искусственные кристаллы. Изменяя толщину прослоек, химический состав элементов, из которых сверхрешетка построена, можно менять периодическую силу в широчайших пределах. Поэтому создание сверхрешеток называют зонной инженерией, а иногда и Ψ -инженерией, так как появилась возможность диктовать электрону, какую ему иметь волновую (Ψ) функцию.

Конечно, особый интерес представляют такие созданные искусственно образцы, аналогов которых в природе не существует. Например, подобрав последовательность слоев из полупроводника и диэлектрика, можно добиться, чтобы движение электронов полупроводника поперек слоев (вдоль оси z) существенно отличалось от движения вдоль слоев (в плоскости xy). Если диэлектрические прослойки столь толсты, что полностью непрозрачны для электронов, то каждая полупроводниковая прослойка существует независимо от остальных и в каждой электроны движутся только вдоль слоя. Считая, что вдоль слоев движение электрона очень похоже на движение в свободном пространстве, имеем

$$\varepsilon = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m^*}, \quad (1)$$

где ε – энергия, p_x , p_y – компоненты импульса, а m^* –

эффективная масса электрона. Отличие m^* от массы свободного электрона m_e – свидетельство влияния на движение электрона ионов кристалла. Интересно, что m^* может быть и больше и меньше m_e .

Не кажется ли вам удивительным, что m^* может быть меньше m_e ? Масса частицы – мера ее способности двигаться. Скорость частицы массой m с энергией ϵ равна $v = \sqrt{2\epsilon/m}$. Чем больше масса, тем скорость меньше. Неужели частица в периодическом поле сил может быть подвижнее, чем свободная частица? Да! И это не только теоретическое утверждение, основанное на квантово-механическом рассмотрении. Непосредственное измерение эффективных масс электронов полупроводников показывает, что m^* электронов проводимости может быть во много раз меньше m_e . Например, в GaAs $m^*/m_e = 0,07$, а в InSb $m^*/m_e = 0,01$.

Если диэлектрическая прослойка проницаема для электронов (за счет *туннельного эффекта*), то в формулу (1) надо добавить слагаемое, описывающее движение поперек слоев (вдоль оси z). При малой проницаемости барьеров, разделяющих проводящие слои, получим

$$\epsilon = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m^*} + \Delta \left(1 - \cos \frac{p_z d}{h} \right). \quad (2)$$

Здесь d – период сверхрешетки вдоль оси z , h – постоянная Планка, а Δ – величина размерности энергии, пропорциональная электронному коэффициенту прозрачности диэлектрической прослойки. Мы видим, что значения энергии продольного движения заполняют интервал (зону) шириной 2Δ . Энергия движения вдоль слоев тоже периодически зависит от компонентов импульса, а разрешенные значения энергии заполняют зону – зону проводимости полупроводниковой прослойки, но ширина зоны проводимости столь велика по сравнению с величиной 2Δ , что можно ограничиться выражением для энергии поперечного движения вблизи ее дна, что и сделано в формулах (1) и (2).

Энергия электрона в сверхрешетке имеет минимум при $p_x = p_y = p_z = 0$, причем значение энергии в этой точке выбрано равным нулю. Вблизи минимума энергия квадратично зависит от компонентов импульса:

$$\epsilon = \frac{p_x^2}{2m^*} + \frac{p_y^2}{2m^*} + \frac{p_z^2}{2m_z}, \quad (3)$$

где $m_z = h^2/(\Delta d^2)$ – эффективная масса движения электрона вдоль оси z . Как правило, $m_z \gg m^*$ и с уменьшением коэффициента прозрачности m_z растет, так как при этом заметно уменьшается параметр Δ .

Анализируя формулу (2), нетрудно проследить, как меняется с ростом энергии форма (топология) изоэнергетических поверхностей (поверхностей равной энергии). При самых малых значениях энергии, когда справедлива формула (3), изоэнергетические поверхности – эллипсоиды, тем более вытянутые вдоль оси z , чем менее прозрачны диэлектрические прослойки для электронов. С ростом энергии изоэнергетические поверхности в пространстве импульсов превращаются в открытые поверхности (в гофрированные цилиндры). Характерный не только для искусственных, но и для естественных кристаллов топологический переход от замкнутых к открытым изоэнергетическим поверхностям может быть изучен с помощью исследования свойств сверхрешеток.

В работе, о которой говорилось в начале статьи, авторы обратили внимание на то, что сверхрешетки должны обладать интересными свойствами, если их поместить в магнитное поле, перпендикулярное слоям. Прежде всего, каждый слой будет демонстрировать квантовый эффект Холла, который состоит в следующем. При некоторых значениях магнитного поля B_N сопротивление и, одновременно, диссипативная часть проводимости обратятся в ноль, а холловское сопротивление R_x с поразительной точностью будет выражаться через комбинацию фундаментальных констант:

$$R_x = \frac{2\pi\hbar}{Ne^2}, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Кроме того, при тех же значениях магнитного поля (при $B = B_N$) исчезнет проводимость вдоль оси z – образец вовсе перестанет быть проводником, он превратится в диэлектрик. Правда, в весьма своеобразный диэлектрик: в нем должен иметь место квантовый эффект Холла, а ведь привычно эффект Холла – свойство электронного проводника. Даже термин специальный «изобрели» – холловский диэлектрик.

Сверхсильные магнитные поля

Это – следующая интересная тема нашего сегодняшнего разговора.

«Сверхсильные магнитные поля – поля с индукцией $B \geq 1$ МГс (граница условная)», – так начинается статья в ФЭ.² Следующая фраза разъясняет: «Классификацию магнит-

² На самом деле в ФЭ говорится не об индукции B магнитного поля, а о его напряженности H , но эта физическая величина совсем не фигурирует в школьном курсе физики.

ного поля обычно связывают со способами получения полей». О способах получения сильных и сверхсильных магнитных полей поговорим ниже и очень кратко. Задача этой части статьи – не разъяснение устройства источников сильных магнитных полей, а попытка научить «чувствовать» величину магнитного поля, сделать магнитное поле «осязаемым». Это – непростая задача, так как человек не обладает органом чувств, позволяющим ему ощущать магнитное поле непосредственно.

Очевидно, что $1 \text{ МГс} = 10^6 \text{ Гс}$, а гаусс – единица индукции магнитного поля в системе СГС (сантиметр – грамм – секунда), называемой также гауссовой системой единиц.³ Единица названа в честь немецкого физика Карла Фридриха Гаусса (1777–1855). По-видимому, гаусс – маленькая единица, если, для того чтобы магнитное поле было сверхсильным, нужно поле индукцией в миллион гауссов. В Международной системе единиц (СИ) пользуются более крупной единицей для измерения магнитного поля – тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$. Эта единица получила название в честь Никола Тесла (1856–1943) – сербского ученого в области электро- и радиотехники.

Слово «сильный», а тем более «сверхсильный», имеет эмоциональную окраску. Словосочетание «сильное магнитное поле» вызывает в моей памяти рисунок из какой-то скорее всего научно-популярной книжки: магнитный подъемный кран поднимает автомобиль. Особенно большое впечатление на меня производил рисунок после того, как я понял, что магнетизм – квантовое свойство.⁴ «Квант», «квантовый» – эти термины воспринимались как нечто, относящееся к атому, к субатомной частице, а тут – магнит, да еще поднимает автомобиль! Однако оказывается, что магнит, способный удержать тонну металла, должен создать отнюдь не сверхсильное магнитное поле: достаточно всего 10^4 Гс !

Теперь от магнитного подъемного крана перейдем к микроскопическим магнетикам – к электронам, протонам, нейтронам. Каждый из них создает вокруг себя свое магнитное поле. Мерой

³ В этой статье автор использует гауссову систему единиц, незнакомую большинству наших читателей. Эта система отличается от привычной СИ не только наименованиями и значениями единиц измерения физических величин, но и написанием многих формул. Однако мы решили в виде исключения сохранить привычную для автора и вообще для физиков-теоретиков систему единиц, чтобы читатель получил более глубокое представление о «кухне» теоретической физики. (*Прим. ред.*)

⁴ См. книгу М.И.Каганова и В.М.Цукерника «Природа магнетизма» (Библиотечка «Квант», выпуск 16).

способности электрона создавать магнитное поле служит магнетон Бора, или *магнитный момент* электрона,

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 0,9 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс}$$

(отметим, что в единицах СИ в формуле отсутствует c), а магнитные моменты протона и нейтрона удобно оценивать с помощью ядерного магнетона

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/Гс},$$

где m_p – масса протона. Ясно видно, что из-за сравнительно большой массы нуклона магнитные моменты протона и нейтрона во много раз меньше магнитного момента электрона. Есть интересные и важные явления, обязанные магнетизму нуклонов, но наиболее существенную роль в физике магнитных явлений играют электроны. Такие явления, как ферро- и антиферромагнетизм, – электронного происхождения.

Как известно, при удалении от магнитного диполя созданное им магнитное поле убывает обратно пропорционально кубу расстояния от диполя. Правда, кроме того, магнитное поле зависит от направления по отношению к диполю (не надо забывать, что магнитный диполь – вектор, который характеризуется не только величиной, но и направлением). Выбрав направление таким, чтобы магнитное поле было максимальным, можно оценить величину магнитного поля на атомном расстоянии от электрона. Мерой атомного расстояния служит радиус Бора (см. *Бора радиус*)

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см},$$

тогда магнитное поле на расстоянии a от электрона будет

$$B \sim \frac{\mu_e}{a_0^3} \sim 10^4 \text{ Гс}.$$

Скажем откровенно, эта величина мало что характеризует: магнитные поля, создаваемые отдельными микрочастицами, имеют, как правило, совершенно случайные направления; складываясь, они либо компенсируют друг друга, либо усиливают. Результат – какое магнитное поле создает тело и создает ли оно его на макроскопических расстояниях – зависит от строения тела, в состав которого входят микрочастицы.

Наличие у микрочастиц заряда e и магнитного момента μ делает их чувствительными (восприимчивыми) к магнитному полю. В магнитном поле \vec{B} на всякую заряженную движущуюся

со скоростью \vec{v} частицу действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = \frac{e}{c} [\vec{v} \vec{B}].$$

(Заметим, что в СИ формула для силы Лоренца имеет другой вид: $\vec{F}_L = e[\vec{v} \vec{B}]$.) Под действием этой силы частица (для определенности, электрон) вращается в плоскости, перпендикулярной \vec{B} . Каждый вращающийся электрон обладает магнитным моментом, направленным против магнитного поля. Энергия движения электрона в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, квантуется. Разность энергий соседних уровней есть $e\hbar B/(m^*c)$. Но, кроме того, как мы уже говорили, электрон обладает собственным магнитным моментом. Собственный магнитный момент электрона μ_e ориентируется либо по магнитному полю, либо против. Разность энергий двух ориентаций равна $2\mu_e B = e\hbar B/(m_e c)$. Если m^* и m_e не слишком отличаются друг от друга, то величина $e\hbar B/(m_e c)$ может служить энергетической мерой воздействия магнитного поля на любую атомную систему. Если же $m^* \ll m_e$ (как мы говорили, такое бывает в некоторых полупроводниках и полуметаллах), то роль магнитного поля больше, чем можно было бы думать, руководствуясь оценкой, получаемой при использовании массы свободного электрона.

Основные силы, действующие между электронами и ядрами в атомах, — это силы электростатического притяжения и отталкивания. Им соответствует энергия порядка e^2/a . Каково должно быть магнитное поле, чтобы соответствующая ему энергия превышала электростатическую? Сравним $2\mu_e B$ и e^2/a , подставив значение боровского радиуса:

$$2\mu_e B > \frac{e^2}{a_0},$$

если

$$B > B_{\text{ат}} = \frac{m_e^2 e^3 c}{\hbar^3} = 2,35 \cdot 10^9 \text{ Гс (!)}.$$

Таким образом, сверхсильное магнитное поле должно существенно сказываться на структуре атомов, молекул, твердых тел.

Сделаем еще один шаг — в сторону больших магнитных полей. Запишем электростатическую энергию $e^2/a_0 = e^4 m_e / \hbar^2$ несколько иначе. Умножим числитель и знаменатель правой

части последнего равенства на c^2 . Тогда получим

$$\frac{e^2}{a_0} = m_e c^2 \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^2 \cong m_e c^2 \left(\frac{1}{137} \right)^2.$$

Безразмерную комбинацию из мировых констант $e^2/(\hbar c) = 1/137$ принято считать безразмерным зарядом электрона. Многие черты Мира, в котором мы живем, связаны с тем, что безразмерный заряд электрона мал. К сожалению, нет возможности остановиться на этом факте сколько-нибудь подробно, но, думаю, имеет смысл его запомнить ...

Если магнитное поле в $(137)^2$ раз больше $B_{ат}$, т.е. если $B \geq B_{кэ} = m_e^2 c^3 / (e \hbar)$, то $2\mu_e B$ превышает энергию покоя электрона $m_e c^2$ (индекс «кэ» обозначает словосочетание «квантовая электродинамика»). В области пространства, где магнитное поле столь велико, изменяется электродинамическое поведение элементарных частиц; электродинамика в этом случае требует использования не только релятивистских, но и квантовых законов.

Встречаются ли столь большие магнитные поля в природе? В цитируемой статье приведено несколько примеров. Мы воспользуемся часто применяемым приемом – поражать, так поражать: поля $10^{10} - 10^{13}$ Гс зарегистрированы у рентгеновских пульсаров, т.е. в двойных звездных системах. Для сравнения: среднее значение магнитного поля у земной поверхности равно 0,5 Гс.

Пришло время выполнить обещание и хотя бы в нескольких словах рассказать о получении сильных и сверхсильных магнитных полей в земных условиях. Прежде всего отметим, что получение сильных магнитных полей – сложная техническая задача, для решения которой необходим инженерный опыт, специальные материалы и ... прекрасное знание физики. В истории создания источников сильного магнитного поля большую роль сыграли такие выдающиеся физики, как П.Л.Капица и А.Д.Сахаров. Их имена связаны с созданием импульсных магнитных полей – полей, существующих доли секунды.

До сих пор в центральном зале Института физических проблем имени П.Л.Капицы стоит генератор, с помощью которого Петр Леонидович еще в 20-е годы начал исследование влияния магнитного поля на электропроводность металлов, впервые используя для этой цели магнитное поле порядка 300 кГс. Для создания такого магнитного поля Капица применил разряд батареи конденсаторов через токовое кольцо. Один из томов Научных трудов П.Л.Капицы назван «Сильные магнитные

поля» (М.: Наука, 1988). В нескольких статьях подробно рассказано и о конструкции генератора поля, и о различных опытах, проведенных в магнитном поле в сотни килогауссов. Использование рекордного (в то время) магнитного поля естественно привело к открытиям. Одно из них даже получило в физической литературе имя закона Капицы (см. *Капицы закон*). Оказалось, что в сильном магнитном поле сопротивление большинства металлов линейно растет с магнитным полем. Это открытие послужило толчком к активному исследованию гальваномангнитных явлений в металлах.

Метод, идея которого принадлежит А.Д.Сахарову (1951 г.), назван методом сжатия магнитного потока (или магнитной кумуляцией). На первый взгляд идея весьма проста: внутри проводящей цилиндрической оболочки радиусом $R_{\text{нач}}$ надо создать продольное магнитное поле $B_{\text{нач}}$ и затем симметрично и достаточно быстро сжать цилиндр так, чтобы его радиус уменьшился во много раз. Если поток магнитного поля $\Phi = \pi R_{\text{нач}}^2 B_{\text{нач}}$ не успеет измениться за время сжатия, то магнитное поле возрастет до величины $B_{\text{кон}} = B_{\text{нач}} (R_{\text{нач}}^2 / R_{\text{кон}}^2)$. Чтобы понять, насколько простота кумуляционного метода иллюзорна, надо иметь в виду, что необходимая скорость сжатия достигается с помощью взрывов. В частности, это означает, что каждое устройство работает один раз. Но результаты впечатляют: в таких системах получены поля до 3,2 МГс. Еще более поразительны планы: при использовании сравнительно небольшого ядерного взрыва надеются получить магнитное поле до 10^3 МГс. Вот так! Оказывается, пугающие всех ядерные взрывы могут приносить пользу науке. В Научных трудах А.Д.Сахарова (М.: Центрком, 1995) получению сильных магнитных полей с помощью взрывов посвящены две большие статьи с современными комментариями. По ним можно не только ознакомиться со многими физическими и техническими подробностями, но и почувствовать ту обстановку, в которой работал А.Д.Сахаров.

Сверхсветовые скорости в астрофизике

С таким названием в ФЭ есть сравнительно большая статья. К сожалению, она слишком специальна для сколь угодно подробного ее изложения на страницах журнала «Квант». Речь в статье идет о наблюдении радиоизлучения центральных областей галактик, которые привели к парадоксальному выводу, что излучающие частицы движутся со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Анализ всей совокупности наблюда-

тельных данных помог ликвидировать парадокс. Если некоторое излучающее физическое образование (сгусток плазмы) перемещается к наблюдателю со скоростью $v_{\text{п}}$ под углом φ к лучу зрения, то проекция его скорости на небесную сферу равна $v_{\text{п}} \sin \varphi$. Наблюдая за движением изображения сгустка по небесной сфере, ученые пришли к выводу, что $v_{\text{п}} > c$. Ошибка связана с тем, что не принято во внимание приближение излучающего сгустка к наблюдателю. Чем ближе сгусток придвигается, тем меньше времени требуется излученному свету, чтобы достигнуть наблюдателя. Из-за этого скорость перемещения пятна по небесной сфере (в картинной плоскости) равна

$$v_{\text{наб}} = \frac{v_{\text{п}} \sin \varphi}{1 - (v_{\text{п}} \cos \varphi)/c}.$$

При релятивистских скоростях источника $v_{\text{п}}$ и небольших углах φ наблюдаемая скорость $v_{\text{наб}}$ может превышать скорость света в вакууме.

Должен признаться, что последний раздел внесен в статью с сугубо педагогическими целями. Во-первых, чтобы продемонстрировать единство законов природы, действующих во всей необозримой Вселенной. Во-вторых, чтобы предупредить – к словам надо относиться с осторожностью. Встретив термин «сверхсветовые скорости в астрофизике», доверчивый читатель – именно потому, что относится термин к астрофизике, – может подумать, что правы писатели-фантасты и скорость света не есть предел для будущих астронавтов. Как видите, это не так.

ОБ АБСТРАКЦИИ В ФИЗИКЕ

Понятие плоской волны, подобно многим физическим понятиям, есть не больше как абстракция, которую мы можем осуществить лишь с известной степенью точности. Тем не менее, это – полезное понятие.

А.Эйнштейн, Л.Инфельд. Эволюция физики

Введение

Достижения современной физики огромны. Они дают возможность непротиворечиво описать свойства элементарных частиц и твердых тел, плазмы и нейтронных звезд, сверхпроводников и солнечного вещества. Появилась надежда построить сценарий развития Вселенной от Большого взрыва до наших дней. Хотя познанное пространство огромно, нас не покидает ощущение, что и теперь мы стоим на берегу океана незнания. Или, в лучшем случае, чуть переступили через береговую черту, если сравнивать наше время с теми далекими временами, когда Ньютон использовал этот образ. Впереди – новые неожиданные открытия. То что движение от незнания к знанию, похоже, бесконечно, не приводит в уныние, а воодушевляет. Этому способствует преемственность: новое знание не отменяет старое. Новые открытия не требуют зачеркнуть созданную картину Мира, а расширяют ее и совершенствуют.

Можно представить себе огромное строительство. Вырастают новые этажи. Одновременно на всех этажах строящегося здания

идет работа. Улучшают отдельные детали, иногда перестраивают этаж-другой. Тех, кто внимательно следит за строительством, особенно интересует, что происходит на уровне фундамента. Они испытывают волнение, когда выясняется, что фундамент требует усовершенствования. Особенно остро воспринимается необходимость строительства нового, более глубокого



этажа. Проходит некоторое время, у фундамента появляется новый этаж, волновавшиеся привыкают. На верхних этажах продолжается совершенствование постройки. Многие строители попросту не заметили изменений, происшедших с фундаментом. Конструкция такова, что строительство одного этажа почти не зависит от происходящего на других. Никто не может предсказать, какой этаж потребует в ближайшее время концентрации усилий. Строительство идет, повинувшись скрытому от строителей плану. Вспоминают прошедшие этапы строительства, и возникает впечатление, что удалось уловить черты плана – плана, по которому веками осуществлялось строительство. Но попытка руководствоваться старым планом для продолжения строительства, как правило, ни к чему хорошему не приводит.

В сравнении истории физики со строительством есть некое лукавство. Собственно говоря, что строят физики? Мир, который изучают физики, существует вне зависимости от того, изучают его или нет. Мы в этом уверены. Но... Давайте мир, который мы непосредственно ощущаем, которым часто любимся или который мысленно проклинаем, когда он оборачивается своей неприглядной стороной, сравним с тем миром, который различается за строгими законами, формулируемыми на страницах учебника физики, который описывается изящными уравнениями, допускающими не менее изящные решения. Думаю, возникал у вас крамольный вопрос: «Какое отношение к реальному миру имеет мир физики, а впрочем, и любой другой науки?»

Строгость, порядок, красоту привнесли в Мир художники и ученые-естествоиспытатели. Правда, «привнесли» – неточное слово. Обнаружили, обратили внимание, подчеркнули, показали. И именно тем привнесли.

Превращение беспорядочного, неорганизованного, чувственного мира в гармоничный мир, упорядоченный пониманием, – заслуга науки. Среди средств, используемых для гармонизации, важное место занимает абстракция. Хочется верить, что нам удастся показать это на нескольких примерах из разных областей физики.

Элементарные частицы

Научное и бытовое словоупотребления часто не совпадают. «Словарь русского языка» под редакцией С.И.Ожегова (М.: Русский язык, 1975) предлагает пять разных смысловых значений для прилагательного «элементарный». Строго говоря, ни одно из них не соответствует тому значению, которое

несет на себе слово «элементарные» в заглавии раздела. Для контраста сравните два выражения: элементарная математика и элементарные частицы. Между прочим, в физике элементарных частиц используется весьма сложная, современная, отнюдь не-элементарная математика.

Частицы, из которых состоит все, что нас окружает: весь вещный мир, все предметы, биологические объекты, а также другие планеты Солнечной системы и далекие звезды, – это молекулы, атомы, электроны, протоны, нейтроны... Многозначие здесь не для красоты, а для того, чтобы подчеркнуть – мы перечислили отнюдь не все, что имеет право претендовать на звание структурной единицы материи. Например, нами не упомянуты кварки.

Обилие «кирпичей мироздания» несколькостораживает. Возникает естественный вопрос: «Как считать, из чего состоит Мир? Из чего состоим мы сами?» Химия отвечает: из молекул и атомов. Физика идет глубже: из протонов, нейтронов и электронов. А современная физика элементарных частиц выяснила, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Значит, химия и «вчерашняя» физика неправы? А физика элементарных частиц, отменив устаревшие ответы, дает новый, единственно правильный ответ? Нет, конечно, нет! В каком-то смысле все правы.

В политике один из руководящих принципов: «Разделяй и властвуй!» В науке на всем ее пути развития важную роль играл принцип, лишь частично совпадающий с принципом политиков: «Разделяй и познавай!» Такой подход можно назвать методом осколков. Разделил на составные части, исследовал то, на что разделил, и узнал, из чего состоит... Но все прекрасно понимают, что характер осколков существенно зависит от приложенных усилий. Интересно, что кому вспомнится: разбитая посуда или конструктор? Таким образом, понятие «составная часть», в какой-то мере совпадающее с понятием «элементарная частица» (но ему не тождественное!), зависит от нас, от того, сколько усилий мы готовы потратить на разборку.

Вещества при испарении самостоятельно, под воздействием температуры, разлагаются на молекулы. Химия знает множество способов разлагать молекулы на атомы. Наименование «атом» (от греч. *átomos* – неделимый) зафиксировало античное неумение разлагать атомы на составные части. Атомная физика позволила исследовать структуру атома. Выяснилось, что атом – сложная система: масса сосредоточена в ядре, вокруг которого вращаются электроны. Ядерная физика не только установила, что и ядра – сложные системы, состоящие из протонов и нейтронов, но и

научилась расщеплять атомные ядра. Осуществилась мечта алхимиков о превращении одного элемента в другой.

Расщеплять атомные ядра – непростая задача. Ее решение потребовало строительства гигантских ускорителей, хотя некоторые ядра разделяются сравнительно легко: например, под действием медленных нейтронов. Такая реакция энергетически выгодна, она легла в основу действия атомной бомбы и атомного реактора.

Проникновение в глубь нуклонов (протона, нейтрона) – совсем сложная задача. Она была решена лишь во второй половине XX века. Изучая структуру нуклонов, физики натолкнулись на загадочную, не имеющую прецедентов ситуацию: нуклон структуру имеет, а не делится. Кварки, из которых состоят нуклоны, не наблюдаются в свободном состоянии. Похоже, сегодня нет общей точки зрения, причислять кварки к элементарным частицам или нет.

Последние два абзаца могут привести к мысли, что выбор структурных единиц и элементарных частиц целиком определяется научным сообществом. Большая доля истины в этом есть. Но, как всегда, введение термина фиксирует объективные свойства того, что мы изучаем, в данном случае – свойства микроскопических частиц и их конгломератов.

Важно понять, что термины «структурная единица» и «элементарная частица» не совпадают.

Последнее издание «Физической энциклопедии» фиксирует несколько сот частиц, которым присвоен титул «элементарная». Это электроны, позитроны, нейтрино, мезоны, нуклоны и многие другие частицы. Там же детально описана кварковая структура многих из них, что, казалось бы, противоречит понятию элементарности.

Еще полвека назад элементарных частиц было гораздо меньше. Обилие элементарных частиц породило потребность попытаться проникнуть в глубь элементарных частиц. Именно таким образом были открыты кварки. Бесконечный это процесс или в конце концов будут открыты истинно элементарные частицы, думаю, никто сказать не может. Признаться, мне хочется верить, что процесс дробления имеет естественный предел. Возможно, невывлет кварков – первое свидетельство того, что предел существует.

Ответ на вопрос: «Из чего состоит данное тело?» определяется выбором структурной единицы макроскопической системы. Выбор в большой мере зависит от того, какую задачу ставит перед собой исследователь.

Для исследователя естественно желание объяснить наблюдаемое явление. Но в разное время под объяснением понимали разное. Сейчас, если речь идет об объяснении (понимании) какого-либо свойства макроскопического тела, объяснение строится обычно следующим образом: прежде всего выясняют, из каких микроскопических частиц состоит тело, как движутся частицы, из которых тело состоит, и наконец устанавливают, какое конкретное движение частиц соответствует интересующему нас свойству. Не должно вызывать удивления, что для объяснения разных свойств тел приходится по-разному углубляться в строение вещества. Свойство диктует необходимую глубину проникновения и тем самым определяет, какие частицы могут быть приняты за структурные единицы тела. Этим определяется выбор тех частиц, которые называют в ответ на вопрос, из чего состоит данное тело.

Из сказанного очевидно, что одну и ту же частицу иногда следует считать структурной единицей, иногда – нет.

Приведем один пример. Исследуется поликристалл. Для выяснения многих его свойств (прочности, пластичности, электро- и теплопроводности) достаточно знать, что он состоит из кристаллитов, знать, как они расположены друг относительно друга (есть текстура или ее нет) и что из себя представляют кристаллические прослойки. Кристаллит при таком подходе – структурная единица поликристалла.

Вопрос: «Какова природа наблюдаемой электропроводности?» требует понимания, из чего состоит кристаллит – из нейтральных атомов (тогда, скорее всего, это полупроводник) или из ионов и электронов (металл). Выяснив, скажем, что кристаллит – металл, как правило, мы не должны углубляться в структуру ионов. Можно просто считать, что атом потерял свои Z валентных электронов, а ион с зарядом $+Ze$ служит для электронов источником поля сил, в котором электроны движутся. Этого достаточно, чтобы произвести расчет зонной структуры, а разрешив ионам колебаться, мы сможем вычислить электро- и теплопроводность. Итак, в данном случае структурные единицы – ионы с зарядом $+Ze$ и электроны, покинувшие атомы.

Способность металла отражать электромагнитные волны – результат наличия в металле свободных электронов. Но если мы хотим исследовать поглощение света металлом (или фотоэффект), то нам придется задуматься о строении ионов, о том, в каких состояниях находятся электроны в составе иона. Роль структурных единиц начинают играть все электроны, а не только валентные, и ядра атомов.

Наконец, есть ядерные эффекты, специфические для твердых тел. Например, эффект Мёссбауэра – резонансное излучение и поглощение γ -квантов без отдачи ядра – или распад ядра урана на осколки, которые, разлетаясь, взаимодействуют с электронами и ионами. Рассматривая такие эффекты, нельзя считать ядра структурными единицами. В таких явлениях структурные единицы – это нуклоны.

В этом небольшом разделе мы ни разу не употребили слова «абстракция». Это потому, что он целиком абстрактен. Конкретизация, в той мере, в которой она есть, – только в виде примеров.

Тождественность и неразличимость

Когда речь идет о макроскопических предметах или даже таких небольших совокупностях атомов, как кристаллит в поликристалле, то каждый из них обладает своей особой неповторимостью. Как бы ни старались, к примеру, сделать все пули одинаковыми, опытный следователь сможет определить, какой из них был произведен смертельный выстрел. А вот элементарные частицы тождественны. Ни один электрон ничем не отличается от другого, то же можно сказать о протоне и нейтроне. Сложнее дело обстоит с атомами и молекулами. Молекулы и атомы обладают определенной структурой. Жесткой структурой. Заэкранированные от воздействия, они не будут изменяться. Если бы кто-то решил заменить «хранящуюся» молекулу на какую-то другую того же сорта (молекулу, скажем, воды на другую молекулу воды), мы не сумели бы определить, сделал ли он замену или не сделал. То же самое с атомами. Ни один атом не отличим от своего собрата. Любый атом, например, азота невозможно отличить от любого другого атома азота.

Правда (и именно поэтому дело обстоит несколько сложнее), и атом, и молекулу можно пометить. Например, возбудить электронную оболочку того сложного образования, которое в зависимости от состава именуется атомом или молекулой. Тем самым можно выделить какой-либо атом, какую-либо молекулу. Но не нужно думать, что метка (возбуждение) накрепко прикреплена к атому или к молекуле, как царапина на пуле, позволяющая ее идентифицировать. Если волею судьбы неподалеку от возбужденного атома окажется невозбужденный, а потом их траектории разойдутся, то мы принципиально не сможем сказать, остался ли возбужденным тот же атом, или возбуждение «перебралось» на другой.

Пометить атом или молекулу можно и более вычурным способом. Многие ядра существуют в разных модификациях, именуемых изотопами. Они отличаются друг от друга числом нейтронов при том же числе протонов. Число протонов задает число электронов в электронной оболочке атома и, тем самым, большинство его химических (атомных) свойств. Переместиться нейтрону из ядра в ядро непросто. Нейтроны устойчиво метят атом. Это позволяет с помощью изотопов следить за перемещением отдельных атомов и молекул. Так и говорят – метод меченых атомов. Он широко применяется в разных сферах – от материаловедения до медицины.

Среди микрочастиц особенно важное и почетное место занимает электрон – необходимая составная часть любого атома. Электрон – первая открытая (Дж.Дж.Томсон, 1897) и наиболее изученная элементарная частица. В этом разделе мы будем говорить об электронах, хотя многое, о чем будет рассказано, отнесется и к другим частицам.

Как и другие элементарные частицы, все электроны тождественны. Тождественность как бы специально предназначена для создания понятия «электрон». Используя это понятие, мы не должны задумываться, идет ли речь о конкретном электроне или об электроне вообще, об электроне как абстрактном понятии. Это одно и то же. Нет таких черт у электрона, которые можно отбросить, не превратив его в нечто иное.

Остановимся чуть подробнее на тождественности электронов. Сначала – с позиции классической физики. Вне зависимости от того, как мы описываем электроны – с помощью формул классической физики или квантовой, электроны не теряют своей тождественности. Электроны, прилетевшие из космического пространства в составе космических лучей, и электроны в лучевой трубке телевизора не отличаются друг от друга. Тождественность электронов и вообще элементарных частиц редко подчеркивается в классической физике. Не потому, что это – неважный факт, а потому, что воспринимается он как самоочевидный.

Ситуации, когда тождественность частиц необходимо учитывать, встречаются в классической физике нередко. Особенно в статистической физике. При построении теории идеальных газов¹ необходимо уметь подсчитывать физически отличающиеся

¹ Идеальный газ – типичный пример абстракции. Это газ, при описании свойств которого можно абстрагироваться от взаимодействия частиц газа друг с другом.

состояния совокупности частиц газа. Вот цитата из пятого тома курса Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица «Статистическая физика»: «...получим всего [столько-то] возможных распределений, среди которых, однако, есть тождественные, отличающиеся лишь перестановкой частиц (частицы все одинаковы). Число перестановок N частиц есть $N!$...» и т.д. Упоминание об одинаковости частиц, как бы для подчеркивания очевидности сказанного, помещено авторами в скобки.

Великий Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879, Боже, как мало он прожил!) знаменит главным образом формулировкой уравнений, носящих его имя. Уравнения Максвелла создали современную электродинамику, объединили электричество, магнетизм и оптику. Но, кроме того, Максвелл был одним из создателей кинетической теории газов. Естественно, он столкнулся с необходимостью учитывать тождественность частиц газа. И задолго до открытия структуры атома задумался: «Собственно говоря, почему все атомы одного элемента тождественны?» Действительно, все окружающие нас предметы хоть незначительно, но отличаются друг от друга, а атомы почему-то тождественны. Я вычитал его рассуждения на эту тему в опубликованных лет 30 назад переводах его лекций для сравнительно широкой аудитории (к сожалению, у меня нет их под рукой, когда я пишу этот текст). Меня поразила пронизательность Максвелла. Он понял, что причина неразличимости атомов – существование структуры. Атомы тождественны потому, что построены одинаково, по какому-то неизвестному в то время закону. А ведь, вспомните, атом в то время был последней структурной единицей вещества. Само слово «атом» означает неделимый.

Хочу поделиться мыслью, которая, правду сказать, не имеет прямого отношения к теме рассказа. Наверное, Максвелл был верующим человеком. В те времена неверующих было немного. Казалось бы, ему было естественно подумать: Бог создал все атомы водорода или кислорода одинаковыми. И все... Но нет. Такой ответ его не устраивает. Факт тождественности, как любое явление, требует объяснения. Рассуждал Максвелл, наверное, примерно так: всякое созидание начинается с выработки плана постройки. Совокупность планов составляют законы природы. Поняв их, мы сможем постичь, как устроен и функционирует окружающий нас мир. В частности, ответить на вопрос, почему атомы одного элемента одинаковы.

Боюсь, я навязываю Максвеллу свои мысли. Все же хочется подчеркнуть, что квантовая механика объяснила, почему все

атомы одинаковы. Правда, почему тождественны электроны, протоны, нейтроны, мне представляется, остается необъясненным фактом – одним из тех фактов, которые составляют основу наших попыток (весьма успешных, подчеркнем) объяснить устройство окружающего нас Мира.

Вернемся к классическим частицам. После довольно подробных разговоров об их тождественности, наверное, несколько странно прозвучит утверждение, что классические частицы не следует считать принципиально неразличимыми. Более того, тождественность и неразличимость следует различать. Поясним.

Классическая частица движется по определенной траектории. Зафиксировав частицу в какой-то момент времени, мы можем непрерывно следить за ее судьбой. Из-за этого нельзя наблюдаемую классическую частицу спутать с какой-нибудь другой частицей, а уж тем более заменить одну частицу другой. Классические частицы именно поэтому не следует считать принципиально неразличимыми, хотя они тождественны.

А вот квантовые частицы принципиально неразличимы. Их неразличимость – следствие отсутствия траектории, наличия у квантовой частицы волновых свойств, существования принципа неопределенности. Неразличимость – типично квантовое свойство.

С принципиальных позиций микромир, мир элементарных частиц, атомов и молекул, проще окружающего нас мира вещей. Хотя бы тем, что мир вещей построен из элементов микромира. Кроме того, все микрочастицы одинаковы, тождественны. Ранее мы поняли, что создание любого понятия, даже самого простого, как стол, например, требует выделения общих для всех столов свойств и пренебрежение менее существенными. Это выделение и пренебрежение – один из типов абстрагирования. Создавая понятие «электрон», нам не пришлось опускать какие-либо свойства, имеющиеся у электронов, чтобы всех их объединить одним понятием. Оно включает в себя все свойства электрона. Каждый электрон несет на себе свойства всех электронов. Это рассуждение, конечно, не означает, что понятие «электрон» является простым или самоочевидным. Само понятие простоты достаточно сложно. Нас серьезно обучали, что «электрон так же неисчерпаем, как атом». Что это точно означает, думаю, не знает никто. И думаю, что атом сложнее электрона. А любая элементарная частица проще, чем макроскопическая конструкция из элементарных частиц. Как мы уже сказали, и тем, что любая элементарная частица принципиально неотличима от себе подобных.

Может показаться, что неразличимость элементарных частиц (в частности, электронов) несет лишь философскую нагрузку. Это не так. Неразличимость следует учитывать при расчетах разных величин, необходимых при описании физических свойств реально существующих объектов и результатов экспериментов над ними.

Рассмотрим несколько явлений, в которых принимает участие более чем один электрон.

Начнем с рассеяния электрона на атоме. В атоме есть свои электроны. При расчете вероятности процесса рассеяния необходимо учесть факт возможности обмена местами между рассеиваемым электроном и электронами атома. Такие процессы называют процессами обмена. Важно подчеркнуть, что отделить процесс рассеяния с обменом от рассеяния без обмена нет возможности принципиально. Существует единый процесс рассеяния. Зафиксировав рассеянный электрон, нельзя выяснить, тот это электрон, который столкнулся с атомом, или один из электронов атома. Вопрос, какой это электрон, столь же лишен смысла, как вопрос, какова координата электрона, если известен его импульс. Казалось бы, и при принципиальной различимости электронов процессы обмена надо было бы учитывать. Правильно!

Для того чтобы почувствовать, в чем различие, рассмотрим другой процесс рассеяния, напоминающий рассеяние электрона на атоме, – рассеяние мюона на атоме. Мюон очень похож на электрон, у него такой же заряд, как у электрона, но масса его приблизительно в 207 раз больше массы электрона. При рассеянии мюона на атоме отлична от нуля вероятность того, что атом захватит мюон, отдав один из своих электронов. Произойдет обмен электрона на мюон. В отличие от предыдущего случая, это реальный процесс, который можно отличить от рассеяния мюона без его захвата атомом. Более того, можно выделить те атомы, у которых один из электронов заменен мюоном, и исследовать их свойства.²

Неразличимость электронов проявляется не только в процессах рассеяния. Во всех процессах, в которых участвуют два или более электронов, проявляется их неразличимость. При взаимодействии атомов друг с другом процессы обмена электронами

² Атом водорода, в котором электрон заменен мюоном, получил специальное название – мюоний. Исследование свойств мюония – интересная область физики, принадлежащая как физике твердого тела, так и ядерной физике, а также физике элементарных частиц.

приводят к существованию дополнительной энергии взаимодействия между атомами – обменной энергии, не имеющей классического аналога.

Без учета неразличимости и следствий из нее (в частности, обменной энергии) нельзя объяснить существование ферромагнетизма, антиферромагнетизма и других более сложных магнитных явлений. Их так и называют – обменными.

Хотя формально (в уме, на бумаге) электроны менять места можно, как бы далеко атомы ни были расположены друг от друга, нельзя забывать, что обменная энергия очень быстро спадает с расстоянием между атомами. Достаточно разнести атомы на расстояние, превышающее размеры атома в два-три раза, и обменная энергия практически обращается в ноль. Значительно быстрее, чем, например, энергия электростатического притяжения или отталкивания между ионами. А это означает, что, вычисляя энергию взаимодействия между далеко разнесенными ионами, неразличимостью электронов попросту можно пренебречь.

Неразличимость, как было сказано, – не специфическое свойство электронов. Все элементарные частицы (и протоны, и нейтроны, и мюоны, и все мезоны, и кварки), каждая в своем классе, неразличимы: протоны неотличимы друг от друга, один нейтрон нельзя отличить от другого и т.д. А это значит, что введение понятий «протон», «нейтрон» и т.п., как и введение понятия «электрон», не требует разделения свойств каждой отдельной элементарной частицы на те, которые учитываем, вводя понятие, и на те, которыми пренебрегаем, чтобы не вступать в противоречие с вводимым понятием. Каждый протон имеет свойства всех протонов, каждый нейтрон имеет свойства всех нейтронов и т.д.

При этом в физике элементарных частиц, как и в любой области физики, примеры использования абстракции при введении новых понятий подобрать совсем нетрудно. Вот один простой пример. Протоны и нейтроны обладают многими общими свойствами. Свойства эти не зависят от того, имеет частица заряд или нет. Абстрагируясь от наличия заряда у протона и от отсутствия заряда у нейтрона, вводят понятие «нуклон», объединяющее эти две частицы.

Пожалуй, никогда в обыденной жизненной практике, объединяя предметы новым понятием, мы не знаем столь точно, какими свойствами мы жертвуем, как в случае введения понятия «нуклон». А жертва отнюдь не мала – электрический заряд. Жертва ли это? В каком-то смысле, да. Конечно, протон не лишается

способности притягивать электрон. Но приходится изъясняться так: «В одном из состояний нуклон обладает положительным зарядом и, следовательно, притягивает электрон».

Понятие «нуклон» не всегда полезно.

Вот пример для уточнения слова «полезно». Число нуклонов в ядре определяет атомную массу, а число протонов – атомный номер. Обе характеристики очень важны: атомная масса – в ядерной физике, а атомный номер – в химии.

Термину (понятию) «элементарные частицы» мы посвятили небольшой, но, как нам кажется, важный предыдущий раздел. Термин «элементарные частицы» – хороший пример абстракции. Когда частицу называют элементарной, то, как правило, тем самым подчеркивают нежелание (скорее, отсутствие необходимости в настоящий момент) заниматься ее внутренней структурой. Мы знаем, что нуклоны состоят из кварков, но в подавляющем большинстве случаев об этом можно не думать и считать нуклоны элементарными частицами.

Этим примером хочется еще раз подчеркнуть: процесс выработки понятий, сопровождаемый абстрагированием, – творческий процесс.

Вывод: абстрагирование – часто вполне осознанный прием, который используется при решении определенных задач.

А вот следующее, несколько шокирующее утверждение приведено, только чтобы заинтересовать тех, кто впервые сталкивается с описываемыми понятиями: неразличимость бывает разная.

Спин. Фермионы и бозоны

Как и принципиальная неразличимость, отличие неразличимостей не имеет аналога в классической физике. Отличие неразличимостей тесно связано со спином.

Что прежде всего приходит в голову, когда произносится слово «частица»? Не знаю, как вам, а мне – маленький шарик, нечто маленькое и твердое. Знаю, что это неправильно. Квантовая частица имеет и корпускулярные и волновые черты, частице нельзя приписать определенный размер. Если же реальную частицу наделять свойствами классических частиц, то, скорее, надо было бы представлять частицу в виде материальной точки. Точки... Не укладывается в голове: частица вещества – точка? Нечто вовсе не имеющее размеров? Нет, скорее уж, шарик!

Как движется шарик? Кроме поступательного движения, шарик может вращаться, как волчок. С вращением связан определенный момент количества движения (момент импульса).

Величина момента количества движения имеет размерность $г \cdot см^2/с$. Для многих, наверное, будет неожиданностью, что такую же размерность имеет знаменитая постоянная Планка, без участия которой не обходится, как мы знаем, ни одна формула квантовой физики.

Обязанный вращению момент количества движения классического твердого тела, естественно, может быть любым и куда угодно направленным. Момент количества движения, или просто момент, – вектор. Вращающийся шарик имеет момент, направленный по оси вращения. Направление оси вращения может быть любым. Классический шарик может вращаться вокруг любой оси – той, вокруг которой ему придали вращение. Если шарик не вращается, то момент его равен нулю.

Вернемся к электрону. Выяснилось, что электрон, протон и нейтрон имеют собственный момент количества движения. Здесь очень важное слово «собственный». Оно означает, что вращение присуще электронам и другим элементарным частицам как их внутреннее неотъемлемое свойство. Вращение электронов нельзя прекратить, как нельзя отобрать у электрона или у протона их заряды. И величину собственного момента количества движения частицы изменить нельзя. Собственный момент количества движения частицы принято называть ее спином.

Повторим: спин – одна из неотъемлемых характеристик частицы. Составляя визитные карточки элементарных частиц (электрона, протона, нейтрона, мезонов, нейтрино и т.д.), перечисляя их характеристики, мы должны назвать не только массу, заряд, но и спин.

Прежде чем привести значения спина электрона, протона, нейтрона и других элементарных частиц, скажем немного о необычном свойстве любого квантового момента количества движения. Так же как квантовая частица не может одновременно иметь определенные значения скорости и координаты, ее момент количества движения не может иметь определенные значения всех своих трех проекции. Это еще одно проявление принципа неопределенности. Квантовая механика допускает, чтобы у момента количества движения были определенными модуль момента, т.е. его длина, и одна из проекций на какую-либо произвольно направленную ось.

Не знаю, как происходило знакомство с квантовой механикой у других, меня поразило очень многое. Пожалуй, больше всего – удивительная логичность и непротиворечивость квантовой механики, казалось бы, нарушающей привычную логику. С интересом читал статьи, посвященные дискуссии между Эйнш-

тейном и Бором. Из конкретных квантовых неожиданностей сильное впечатление на меня произвело пространственное квантование, о котором предстоит рассказать.³

Чтобы рассказать о пространственном квантовании, совершим небольшое тактическое отступление: представим себе, что хотим изобразить классический вектор момента количества движения. Как изобразить вектор? Сложность, пожалуй, в том, что способов много. Поступим так: из точки, выбранной для начала координат (эта точка соответствует нулевому вектору), проведем сферу, радиус которой равен величине момента. Вектор момента, проведенный из начала координат, естественно, упирается в сферу. Чтобы зафиксировать направление вектора момента, сферы недостаточно: надо выбрать оси координат. Удобно взять три взаимно ортогональных орта и к ним привязать оси x , y и z . Куда направлять оси координат, безразлично. Это наше дело. Когда выбраны оси координат, направление вектора момента можно задать двумя углами. А можно, конечно, просто задать проекции вектора момента на оси. Сумма их квадратов равна квадрату величины момента.

К каким изменениям приведет квантовая механика? Перечислим по порядку. Как мы уже говорили, одновременно определенные значения имеют длина вектора момента и одна из его проекций, для определенности z -я. Кроме того, длина вектора момента и его проекция могут принимать отнюдь не все значения, а только дискретные.

Проекция момента на ось z принимает следующие значения:

$$-s\hbar, -(s-1)\hbar, \dots, (s-1)\hbar, s\hbar$$

– всего $2s + 1$ значений. Чтобы $2s + 1$ было целым числом, s должно быть либо целым числом, либо полуцелым. В первом случае число проекций нечетно, а во втором – четно.

Перечисленные утверждения относятся к моменту количества движения любой природы. Когда речь идет об орбитальном моменте, то часто букву s заменяют буквой l .

Главным образом нас будут интересовать собственные моменты количества движения – спины. Прежде всего, спин электрона.

Величиной спина принято считать s , т.е. величину максимальной проекции спина в единицах \hbar . Про частицу, у которой

³ Когда я более или менее серьезно изучал квантовую механику, о туннельном эффекте я был наслышан. Поэтому этот наиболее поразительный квантовый феномен не произвел того впечатления, которого заслуживает.

максимальная проекция на избранную ось равна $s\hbar$, говорят, что у частицы спин равен s .

Если классический вектор имеет максимально возможную проекцию на какую-либо ось, значит, вектор направлен вдоль этой оси. Его длина, естественно, равна этой проекции. С квантовым спином сложнее. Когда максимальная проекция равна $s\hbar$, квадрат длины вектора спина равен $s(s+1)\hbar^2$. Он больше квадрата максимальной проекции. Причину этого понять легко. Ведь у спина, кроме максимальной, есть две другие проекции. Так как все три не могут иметь определенные значения, то, хотя проекция на избранную ось максимальна, остальные две проекции не равны нулю – они вообще не имеют определенного значения.

Хорошее наглядное представление: спин – вектор, стрелочка. Он крутится вокруг оси. Квантовая механика запрещает спину совпасть с осью. У квантового спина всегда есть отличный от нуля угол отклонения от любой избранной оси (его минимальное значение определяется выписанными выше формулами). Проекция спина вдоль избранной оси имеет определенное значение, а проекция на плоскость всегда «крутится».

Подчеркнем: если изотропия ничем не нарушена, выбор направления оси (ее называют осью квантования) совершенно произволен. А вот если частицу поместить в магнитное поле, то за ось квантования естественно выбрать именно направление вдоль магнитного поля.

Частицы с полуцелым спином называют фермионами – в честь великого итало-американского физика Энрико Ферми. Частицы с нулевым или целым спином называют бозонами – в честь индийского физика Шатъендраната Бозе.

Электроны, протоны и нейтроны – фермионы. У каждой из этих частиц спин равен $1/2$ ($s = 1/2$). Это означает, что спин и электрона, и любого из нуклонов относительно произвольной оси может ориентироваться лишь двумя способами: либо по оси (проекция равна $\hbar/2$), либо против (проекция равна $-\hbar/2$).

У фотона спин равен 1 ($s = 1$). Фотон – бозон. Некоторые мезоны тоже бозоны. Есть среди них частицы с нулевым спином.

Список того, что сейчас принято называть элементарными частицами, включает около 350 наименований. Среди них есть и фермионы, и бозоны. Спины элементарных частиц в большинстве случаев не очень велики. Но все же, просматривая список элементарных частиц (см. 5-й том «Физической энциклопедии»), среди фермионов я обнаружил две группы частиц со

спином $11/2$, а среди бозонов – группы частиц со спином 4. Все кварки – фермионы со спином $1/2$.

Момент количества движения, обязанный движению в пространстве, называют орбитальным, хотя, как мы знаем, квантовая механика не допускает движения по орбите. Орбитальный момент имеет всегда целочисленное значение. Величину максимальной проекции орбитального момента обозначают, как мы говорили, буквой l , а иногда L .

Чем больше момент количества движения, тем он ближе к классическому моменту: с ростом s и $l(L)$ растет число возможных проекций на ось квантования, а длина момента приближается к величине максимальной проекции. Это – проявление общего принципа соответствия, согласно которому формулы и выводы квантовой механики переходят в формулы и выводы классической ньютоновской механики, если характеристики движения соответствуют условиям применимости классической механики. В условия применимости классической механики должна обязательно входить постоянная Планка. Условие того, что момент количества движения можно описывать формулами классической механики, выглядит особенно просто: величина момента должна во много раз превосходить \hbar .

Познакомившись с понятием спина, узнав, что электроны – фермионы, продолжим выяснение того, как проявляет себя неразличимость.

Проще и естественнее всего неразличимость изучать на примере двух частиц. Для определенности – на примере двух электронов. Чтобы электроны не разлетелись кто куда, поместим их в поле ядра, имеющего положительный заряд, равный по величине заряду двух электронов. Легко видеть, что получился атом гелия. Так как ядро атома в тысячи раз тяжелее электронов, мы можем считать его неподвижным. Заметьте: неподвижное ядро – абстракция типа идеализации. Но это такой простой случай, что неприлично привлекать к нему внимание. Не учитывая движения ядра, можно получить приближенные, но достаточно точные формулы, описывающие движение электронов (как при классическом описании, так и при квантовом). Правда, аналитически точно решить задачу о движении двух электронов в поле ядра непросто. Но, решив, нетрудно учесть движение ядра и вычислить поправки, обязанные движению ядра. Поправки малы, что подтверждает пригодность приближения.

При классическом описании состояние системы двух электронов определяется траекториями, по которым электроны движутся. При квантовом – волновой функцией (пси-функцией), задан-

ной в конфигурационном пространстве (если состояние стационарно, как движение по определенной замкнутой траектории, то зависимость пси-функции от времени можно исключить).

От какого числа переменных зависит пси-функция двух электронов в стационарном состоянии? Каждый электрон обладает тремя степенями свободы. К трем пространственным координатам каждого электрона надо добавить значение проекции его спина. С учетом спина, у каждого электрона не 3, а 4 степени свободы! А $2 \times 4 = 8$. Волновая функция двух электронов, следовательно, зависит от 8 переменных.⁴

Вернемся к неразличимости. Переставим мысленно местами два электрона. Формально это означает, что в волновой функции, зависящей от восьми переменных, четыре переменных, относящихся к одному электрону, надо поменять местами с четырьмя переменными, относящимися ко второму электрону. Что произойдет при такой операции с волновой функцией двух электронов? Оказывается, волновая функция двух электронов при этом изменит знак. Смена знака есть следствие того, что электроны – фермионы. Все частицы с полуцелым спином ведут себя аналогично. А вот если бы мы переставляли бозоны (частицы с целым или нулевым спином), волновая функция вовсе не изменилась бы.

Естественен вопрос: «Что это за неразличимость, если при перестановке частиц местами волновая функция меняет знак?» Оказывается, процедура вычислений с помощью волновой функции физических величин, описывающих результаты экспериментов, устроена так, что смена знака у волновой функции не влияет на результат. Следовательно, смена знака у пси-функции не противоречит неразличимости.

Сказанное должно пояснить утверждение о различии неразличимостей. Фермионы и бозоны обладают разными неразличимостями и, когда речь идет не об одной частице, разительно не похожи друг на друга. Фермионы – индивидуалисты. А бозоны – коллективисты. Сейчас поясним, что это значит.

Фермионы названы индивидуалистами потому, что смена знака у пси-функции при перестановке двух частиц приводит к принципу запрета, согласно которому в каждом состоянии может находиться лишь один фермион. Бозоны – коллективисты, так как в любом состоянии может скапливаться любое число бозонов.

⁴ Вас не должно смущать, что одна переменная (проекция спина) принимает только два значения: $+1/2$ и $-1/2$.

Принцип запрета, которому подчиняются фермионы, – один из важнейших принципов квантовой физики. По имени сформулировавшего его в 1924–25 годах физика В.Паули принцип запрета называют принципом Паули.

Принцип Паули лежит в основе объяснения структуры атомов и периодического закона Менделеева. Действительно, представьте себе, что ничто не мешает любому числу электронов находиться в одном состоянии. В любом атоме все электроны оказались бы на самом нижнем энергетическом уровне. Атом, который имеет сложную структуру именно потому, что электроны занимают разные состояния, оказался бы бесформенным сгустком электронов, прижатых к ядру (нижний энергетический уровень расположен вблизи ядра). Если бы таково было устройство атома, не могло бы быть никакой надежды объяснить химические свойства различных атомов. А ведь они замечательно объясняются, если при заполнении уровней учитывать требования принципа Паули. Без принципа Паули добавление протона к ядру, означающее переход в соседнюю клеточку таблицы Менделеева, почти ничего не изменит в строении атома. А мы знаем, как разительно могут отличаться атомы из соседних клеточек.

Различие свойств атомов с отличающимся числом электронов находит объяснение в положении электронов в атоме. Для понимания свойств атомов надо выяснить, во-первых, что из себя представляют состояния электрона, движущегося в поле, создаваемом ядром и совокупным действием всех электронов, а во-вторых, надо знать, как заполняют электроны атомные состояния.

Энергия электрона в атоме, как легко видеть на примере простейшего атома – атома водорода, принимает дискретные значения (энергетические уровни). Чего мы еще не рассказали, так это того, что состояние электрона характеризуют четыре числа. Три из них описывают орбитальное движение электрона, а четвертое – проекцию спина. От проекции спина обычно энергия электрона почти не зависит. Различием состояний с противоположными спинами в хорошем приближении можно пренебречь, т.е. от роли спина можно абстрагироваться. Итак, решив первую половину задачи, мы знаем расположение энергетических уровней. Это позволяет приступить к заполнению уровней электронами.

Согласно принципу Паули в каждом состоянии может находиться один электрон, а если считать, что от проекции спина электрона энергия не зависит, то на каждом уровне может

находиться не более двух электронов, при этом, если их два, они имеют противоположные направления спинов.

Заполняют электроны атомные уровни, руководствуясь требованием того, чтобы энергия была минимальна, но чтобы при этом не нарушался принцип Паули. Атом нейтрален. Значит, число электронов совпадает с числом протонов в ядре атома. Нильс Бор показал, что расположение электронов на атомных уровнях с учетом принципа Паули объясняет химические свойства атомов.

Принцип Паули столь важен, что мы решили показать, как он выводится из антисимметрии волновой функции. Пусть греческие буквы α и β обозначают состояния, а арабские цифры 1 и 2 – наборы четырех величин (трех координат и проекции спина). Тогда антисимметричное (по перестановке частиц) состояние двух электронов, в котором один находится в α -состоянии, а другой в β -состоянии, имеет следующую структуру:

$$\Psi(1, 2) = \psi_{\alpha}(1)\psi_{\beta}(2) - \psi_{\beta}(1)\psi_{\alpha}(2).$$

Ясно, что если состояния совпадают ($\alpha = \beta$), то $\Psi(1, 2) \equiv 0$ – в одном состоянии оба электрона находиться не могут.

Теперь спросим себя: верно ли, что неразличимость электронов не позволяет наблюдать и исследовать один электрон? Почти всегда отдельный электрон – идеализация. В обычной жизни и в эксперименте мы имеем дело с огромным коллективом электронов. Их число чаще всего не поддается подсчету. Для того чтобы изучить свойства электрона или с его помощью другой физический объект, мы пытаемся выделить отдельный электрон, прибегая не столько к экспериментальным ухищрениям, сколько к помощи теоретических представлений, основанных на принципе неразличимости, так как уверены, что все электроны ведут себя одинаково.

Пометить электрон нельзя. Но можно попытаться изолировать его от других электронов. Например, локализовать электрон в определенной области пространства. Тогда можно говорить «этот электрон». Существует метод измерения магнитного момента электрона, основанный на резонансном отклике отдельного электрона на высокочастотный сигнал. Для проведения эксперимента в приборе локализуется один (!) электрон. Говорят, лаборант должен следить, чтобы электрон «не сбежал», так как процесс локализации очень труден. Пройдет время, неизбежно возникнет взаимодействие с другими электронами, и этот электрон потеряет свою индивидуальность – превратится в просто электрон.

Другими словами, некоторое время электрон может быть похож на обычный предмет. Но есть кардинальное отличие. Любой предмет (тот же стол, например) тоже может потерять свою индивидуальность – скажем, рассыпаться на щепки, превратиться в труху. При этом он перестанет быть столом. Электрон же, теряющий свою индивидуальность, остается электроном.

Кажется, были попытки построить квантовую электродинамику, в которой есть лишь один электрон, многократно (бесконечнократно) повторяющий себя. Воистину абстрактная теория! К сожалению, не знаю подробностей.

Неразличимость квантовых частиц делает понятия «электрон», «протон»,... удивительно похожими на математические понятия. Число 5 всегда 5. Можно спросить, 5 – чего, но само число 5 не зависит от того, к чему его относят. Электрон всегда электрон, просто электрон, где бы он ни находился, в чем бы ни участвовал. Мы уже подчеркивали, к элементарной частице не применим вопрос: «Какая из...?» У нее отсутствует индивидуальность, как у многих математических понятий.

Когда бозоны объединяются, они создают более сложную частицу, и частица эта тоже бозон. А вот из фермионов могут получиться либо бозоны, либо фермионы. Если в сложную частицу объединяется четное число фермионов, получается бозон, если нечетное – фермион. Причина проста: у частицы, состоящей из четного числа фермионов, всегда целый или равный нулю спин, а у частицы, состоящий из нечетного числа фермионов, – полуцелый.

Прекрасный пример – два изотопа гелия. У тяжелого, наиболее распространенного изотопа ${}^4\text{He}$ в ядре 2 протона и 2 нейтрона, у легкого, весьма редкого изотопа ${}^3\text{He}$ – 2 протона и 1 нейтрон. В каждом из атомов обоих изотопов 2 электрона. Тяжелый изотоп – бозон, легкий – фермион. Макроскопические свойства изотопов гелия во многом различны.

УДИВЛЕНИЕ, ПОНИМАНИЕ, ВОСХИЩЕНИЕ

*Стройный мост из железа ажурного.
Застекленный осколками неба лазурного.
Попробуй вынь его
Из неба синего
– Станет голо и пусто.
Это и есть искусство.*

Д. Самойлов

Можно восхититься мостом так, как это сделал поэт. Инженер восхищался бы иначе. Он рассказал бы, и не только своим коллегам по профессии, чем восхищающийся его мост отличается от других мостов. Скорее всего, не удержался бы и сообщил некоторые конкретные данные.

Много раз в сопровождении профессионалов-экскурсоводов я ходил по музеям, осматривал архитектурные достопримечательности. Одни экскурсоводы многословны – они сообщают множество интересных данных и фактов; другие лишь изредка указывают на что-то, что нельзя пропустить, и иногда бросают отрывочные фразы. Как правило, я получал большее впечатление от увиденного, когда экскурсовод был немногословен.

Сравнительно недавно ушел в историю XX век. Конечно, он принес много бед и несчастий. Но останется в памяти он не только этим. За ушедший век необычайно расширились границы познанного, что вызывает у меня глубокое восхищение. Именно восхищением я и хочу поделиться с читателями. (Об ужасах и несчастьях, поверьте, я тоже не забываю.)

Если я покажусь многословным, то простите: искренне хотел избежать ненужных подробностей, но очень трудно оценить, где кончается «нужное» и начинается «ненужное». Я не чувствую себя опытным экскурсоводом, скорее – инженером, влюбленным в конструкцию.



Из описания путешествия английского мореплавателя Джеймса Кука известно, что жители Новой Зеландии не удивились, когда к их берегам подошли никогда не виданные ими корабли. Не имея привычки объяснять, они все воспринимали как должное.

К концу XIX века казалось, что вот-вот будет понято, как устроен окружающий нас мир. Механика Ньютона и электродинамика Фарадея – Максвелла объяснили почти все. Термодинамика установила строгие границы возможного. Наука перестала быть забавой, удовлетворением любопытства кучки чудаков, не интересующихся жизненно важными для людей вопросами, а занятых непонятно чем. Выяснилось, что полученные учеными результаты могут помочь использовать силы природы и заставить их работать на человека. Стало очевидно, что созданные машины будут совершенствоваться, изменяя жизнь людей.

Почти не выходя за пределы реальных знаний, Жюль Верн – один из создателей столь популярного ныне жанра научной фантастики – сочинял увлекательные сказки, в которых ярко описывались замечательные достижения инженерной мысли. Конечно, не все романы Жюль Верна я помню – в детстве они «проглатывались» мною один за другим, но позже я их не перечитывал. Мне кажется, вся фантазия Жюль Верна тратилась на инженерные свершения. Не предполагал он, что в том будущем, в котором действуют его герои, наши знания претерпят весьма существенные изменения.

Большинство профессионалов-ученых на границе XIX и XX веков считали, что физическое описание мироустройства близко к завершению, осталось уточнить значения ряда физических величин и ... все. Мало кого заботило, например, что в рамках существующей науки почему-то не удастся описать излучение *абсолютно черного тела*. Далекие от науки люди не знали, как впрочем не знают и сейчас, что такое абсолютно черное тело. Но, думаю, и многим физикам тоже были неведомы загадки этого объекта.

Что же такое абсолютно черное тело? Формально, абсолютно черным телом принято называть тело, которое поглощает световые лучи, но не отражает их. Может ли существовать такое тело? Строго говоря, нет: всякое тело какую-то часть света поглощает, какую-то отражает. Но можно искусственно создать почти абсолютно черное тело (лучше было бы сказать, почти абсолютно черную поверхность). Для этого в массивном твердом теле

делают полость и связывают ее с внешним миром очень маленьким отверстием. Чем отверстие меньше, тем точнее и лучше модель приближается к своему «оригиналу». Действительно, вероятность того, что лучи света, попав внутрь полости через отверстие, выйдут наружу, очень мала – лучи поглощаются отверстием, но не отражаются.

Тело, в котором есть полость внутри, имеет определенную температуру. Эту температуру можно изменять и исследовать, как с изменением температуры изменяется характер излучения из отверстия, которое моделирует абсолютно черное тело. Все было бы просто, если бы теоретическая физика умела предсказать результат, а экспериментаторы подтвердили бы его. Кое-какие предсказания тогда (на границе веков) делались, но порой приводили к неприемлемым последствиям. Например, предсказывалось, что при любой температуре абсолютно черное тело должно излучать бесконечное количество энергии. Это предсказание получило даже специальное название – *ультрафиолетовая катастрофа*. Дело в том, что согласно теории тех лет излученная энергия растет с ростом частоты света.

Понимаю, у многих даже сейчас может возникнуть недоумение: «Страшное дело! Не могут объяснить, как излучает энергию какая-то дырочка. Сколько пользы уже принесла наука, какие возможности впереди, а нас пугают ультрафиолетовой катастрофой, будто она может кому-то навредить». Думаю, так или похоже рассуждали многие, и отнюдь не только далекие от физики люди на рубеже XX века. А мне не дают покоя строки Анны Ахматовой из «Поэмы без героя»:

Приближался не календарный –
Настоящий Двадцатый век.

Ведь именно в 1900 году Макс Планк осознал, что согласовать наблюдения излучения абсолютно черного тела с теорией можно, только если предположить, что атомы твердого тела не подчиняются законам ньютоновской механики, той самой механики, которая столько объяснила, которая принесла и несомненно принесет бесконечно много пользы.

По Планку (в откровенном противоречии с классической механикой), энергия колеблющегося атома может принимать только целочисленные значения – кванты энергии. Событие, находящееся, казалось бы, на периферии науки своего времени, примерно через четверть века научная общественность назовет революционным переворотом. Оно ознаменовало рождение новой, *квантовой физики*.

Многие активные молодые физики того времени с энтузиазмом посвятили свой талант новой науке. Что двигало ими? Не будем гадать. Приведу цитату из статьи Альберта Эйнштейна «Мотивы научного исследования»¹, посвященной Макс Планку: «Храм науки – строение многосложное. Различны пребывающие в нем люди и приведшие их туда духовные силы. Некоторые занимаются наукой с гордым чувством своего интеллектуального превосходства; для них наука является тем подходящим спортом, который должен им дать полноту жизни и удовлетворение честолюбия. Можно найти в храме и других: плоды своей мысли они приносят здесь в жертву только в утилитарных целях. Если бы посланный богом ангел пришел в храм и изгнал из него тех, кто принадлежит к этим двум категориям, то храм катастрофически опустел бы. Все-таки кое-кто из людей как прошлого, так и нашего времени в нем бы остался. К числу таких людей принадлежит наш Планк, и поэтому мы его любим».

Продолжу цитирование. С трудом заставляю себя делать купюры. Очень советую прочесть статью целиком. «...Но обратим вновь свой взгляд на тех, кто удостоился милости ангела... Что привело их в храм?» Эйнштейн считает, что важную роль для них играет «желание уйти от будничной жизни с ее мучительной жестокостью и безутешной пустотой, уйти от уз вечно меняющихся собственных прихотей». Не будем спорить с гением: несомненно, он делится своими сокровенными мыслями и чувствами. «Но к этой негативной причине, – пишет Эйнштейн через несколько строк, – добавляется и позитивная. Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира...»

Созданием картины мира заняты не только ученые, но и художники, поэты, музыканты, философы. «Какое место занимает картина мира физиков-теоретиков среди всех возможных таких картин? Благодаря использованию языка математики эта картина удовлетворяет наиболее высоким требованиям в отношении строгости и точности выражения взаимозависимостей. Но зато физик вынужден сильнее ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых ... явлений...» Ограничение заставляет добавить сомнение: «Высшая аккуратность, ясность и уверенность – за счет полноты... Заслуживает ли результат столь скромного занятия гордого названия “картины мира”?»

¹ Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов. Том IV. (М.: Наука, 1967.)

Ответ Эйнштейна вполне определенный: «Я думаю – да, ибо общие положения, лежащие в основе мысленных построений теоретической физики, претендуют быть действительными для всех происходящих в природе событий. Путем чисто логической дедукции из них можно было бы вывести картину, т.е. теорию всех явлений природы, включая жизнь». За этим следует оговорка: «если этот процесс дедукции не выходил бы далеко за пределы творческой возможности человеческого мышления».

Важное место в статье Эйнштейна занимает вопрос о роли интуиции при создании адекватной картины мира. Приведу только одну фразу, которую считаю очень важной для понимания природы познания: «К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция».

Как показывает развитие науки, пределы возможности человеческого мышления фантастически расширяются. И все же мы не можем ответить однозначно, будет или нет построена теория всех явлений природы, включая жизнь. Мне кажется, что процесс познания будет длиться столько, сколько будет существовать человеческая цивилизация. К сожалению, нетрудно представить себе трагический исход так нами почитаемого прогресса.

Высказанное высоким стилем изложим значительно более прозаически.

Из огромного количества фактов, которые к концу XIX века не были поняты, Макс Планк выбрал один – излучение абсолютно черного тела. Он попытался найти объяснение в рамках классической физики, не сумел и пришел к выводу: не всегда возможно пользоваться законами классической физики. Физика Ньютона и Фарадея–Максвелла получила эпитет «классическая» после того, как возникла и развилась новая, квантовая физика. На рубеже XIX и XX веков это была *вся* физика, которая, повторяюсь, себя прекрасно оправдала.

Несомненно, все началось с *удивления*: почему не удается в классических терминах описать излучение черного тела? Я же призываю к *восхищению* – сколь своевременно была высказана Планком «крамольная» идея.

Эрнест Резерфорд выяснил, что почти вся масса атома сосредоточена в его ядре, возникло представление об атоме как о планетарной системе: ядро – солнце, электроны – планеты. Нильс Бор понял, что, не привлекая идею Планка о квантах, объяснить устойчивость атомов невозможно. Созданная Бором теория атома водорода эклектична: к хорошо известным законам

движения механики Ньютона произвольно были добавлены квантовые условия, и формула водородного спектра правильно описала экспериментальные факты.

Победителей не судят, но какой ценой получен результат! По сути, разрушена строгая логика всей физики. Естественно, начались поиски выхода из создавшегося положения.

Сейчас, когда курс квантовой механики входит в стандартный набор предметов, изучаемых большинством молодых людей, получающих высшее техническое и естественно-научное образование, очень трудно себе представить, какого не только интеллектуального, но и эмоционального напряжения стоило создание основ новой физики.

В одной из книг Даниила Данина описан такой эпизод. Вернер Гейзенберг, тогда молодой ученый, обсуждал с Нильсом Бором логические трудности новой физики. Обсуждение продолжалось долго. Обоим казалось, что выхода нет. Бор пришел к выводу, что обсуждение надо на время прекратить, и, не предупредив своего молодого коллегу, уехал, устроив себе каникулы. Когда Гейзенберг узнал, что учитель его покинул, он расплакался (!). Итог эпизода замечателен: Бор вернулся после каникул с *принципом дополнительности*, а Гейзенберг в отсутствие Бора вывел *соотношение неопределенностей*. Эти результаты абсолютно необходимы для логики квантовой механики.

Квантовую механику, несомненно, надо считать важной составляющей того, что Эйнштейн назвал простой и ясной картиной мира. Конечно, нельзя считать, что с ее помощью объяснены все явления природы. Можно свое внимание сосредоточивать на том, что не объяснено. Так поступают профессионалы. Но не только. Много людей, далеких от физики, ощущают окружающий мир полным загадок и тайн. И они правы. Действительно, почти на каждом шагу можно столкнуться с явлением или событием, объяснение которого либо нам неизвестно, либо неизвестно вообще – даже тем, кто по своей профессии мог бы знать объяснение, если бы оно было. Те, кто смотрят на науку о мире как бы со стороны, из подобных наблюдений нередко делают неверный вывод о принципиальном бессилии науки.

Другая крайность – преувеличение возможностей науки. Есть люди, которые считают, что наука может все. Естественно, такой взгляд на науку тоже неправилен. Сошлюсь на высказывание одного из творцов новой физики Эрвина Шредингера: «Наука ни слова не может сказать нам о том, почему нас радует музыка, почему и как старая песня может вызвать у нас слезы. Мы полагаем, что наука может в принципе опи-

сать... Но о чувстве радости и сожаления, которые сопровождают процесс [познания], науке ничего неизвестно, поэтому она о них умалчивает». В этой цитате важны слова: «наука может в принципе описать». Наука всегда *описывает*. Правильней только было бы уточнить: «естественные науки могут в принципе описать».

Но не будем останавливаться на крайних точках зрения.

Три слова, поставленные в заглавие статьи, можно располагать по-разному. От этого может несколько измениться смысл. Пусть, например, это будет: *удивление – восхищение – понимание*. Удивившись и восхитившись увиденным, ученый постигает природу явления и, по словам Эйнштейна, превращает чудо в тривиальность. Принятый же в заглавии порядок слов: *удивление – понимание – восхищение* означает нечто другое. А именно:

- *Удивление* невозможностью объяснить наблюдаемое явление заставило ученого выйти за пределы принятой теории.
- Последовало создание новой теории. Возникло *понимание*, охватившее множество фактов и явлений.
- Новая картина мира вызывает истинное *восхищение*. Восхищение распространяется и на ученых, которые буквально ежедневно расширяют область познанного.

Поделиться восхищением очень трудно. Ни восклицательные знаки, ни охи, ни ахи не помогут. Расскажу, что восхищает *меня*.

Недавно я написал статью под названием «Из чего все состоит» (она опубликована в трех номерах журнала «Наука и жизнь»: № 10,11,12 за 2003 год). В статье рассказано, как из частиц трех типов – электронов, протонов, нейтронов – построены атомы, молекулы, твердые тела, т.е. все, что составляет окружающий нас мир, включая и нас самих. Статья заканчивается следующими словами: «Восхищение и объяснение плохо уживаются. Объяснив, как бы ликвидируешь восхищение. Очень хочется, чтобы, поняв в общих чертах принципы устройства всего на свете, вы не потеряли способность восхищаться тем, что для создания всего этого баснословного разнообразия достаточно лишь трех типов частиц – электронов, протонов и нейтронов. “Подумаешь, – скажет скептик, – с помощью двух значков (нуля и единицы) можно закодировать любой текст: скучную инструкцию и прекрасную поэму”. Правильно! Но текст, а также любое устройство кто-то создал. Когда кто-то создает уникальную машину или гениальную поэму, он, несомненно, заслуживает восхищения. Но восхищение вызывает и природа, естественным путем создавшая бесконечное многообразие из электронов, протонов и нейтронов».

Добавим к этому, что *естественный путь* удивительно однообразен. Нет сомнений, что «правила сборки», которыми пользуется природа на Земле и в удаленных, но доступных для наблюдения частях Вселенной, одни и те же. «Доступная для наблюдения часть Вселенной» – звучит очень буднично. Но она занимает сферу, у которой радиус порядка 10^{10} световых лет, т.е. свет от границы доступной для наблюдения области Вселенной движется к наблюдателю 10^{10} лет. И доступная для наблюдения часть Вселенной наполнена многими миллиардами галактик – многомиллиардными скоплениями звезд.

Хотелось бы эту непредставимо огромную сферу назвать *terra cognita* – познанной землей, в отличие от *terra incognita* – непознанной земли. Конечно, в этом есть заведомое преувеличение: мир полн тайн. Но необходимо подчеркнуть следующие два обстоятельства:

1) Своеобразную расчлененность мира. Мир устроен так, что можно исследовать и постигать его по частям. Не будь этого, мир был бы совершенно непознаваем.

2) Основываясь на объективно существующей расчлененности мира, естественные науки выработали у ученых своеобразное профессиональное чутье. Специалист знает, что принадлежит его «ведомству», а что нет.

История науки знает знаменательные «агрессии». Сначала химики, а потом физики занялись биологией. Их вмешательство принесло грандиозные плоды: помогло далеко продвинуть понимание проблем деятельности и развития живых организмов – вплоть до атомно-молекулярного уровня. Менее известно, что только вмешательство в космологию специалистов по микрофизике (по физике элементарных частиц) позволило поставить вопрос о развитии Вселенной и получить обнадеживающие ответы, дающие надежду выяснить, как развивалась Вселенная от момента Большого взрыва до наших дней.

Попытки определить наиболее впечатляющие достижения науки обычно носят конкретный характер – радио, электричество, атомная энергия... Все это, действительно, достойно восхищения. Но меня более всего восхищает в науке ее *методология*. Каждая из наук разработала жесткие правила обращения с объектом исследования. Правила эти очень разнообразны, но у них есть общие черты. Одно из основных требований – объективность. Когда речь идет об эксперименте или о выводе формулы, наука неукоснительно требует повторяемости, возможности независимой проверки. Именно научная методология вызывает особое уважение. Даже лженаука, выдавая себя за науку,

пользуется научной терминологией, пытаясь подчеркнуть свою объективность и надежность используемых ею методов.

Вернемся мысленно в необозримо огромную область, которую я назвал «познанной землей». Предположим, мы создали модель – нечто вроде глобуса с нанесенными на нем «значками», изображающими объекты окружающего нас мира. Пусть цвет объекта зависит от степени понимания природы этого объекта. Тогда «глобус» менял бы свою окраску все время: непрерывно появлялись бы новые «значки», а уже имеющиеся меняли бы свой цвет. Научные знания об окружающем нас мире постоянно совершенствуются, углубляются. Загадочное явление неожиданно получает подробное описание, открываются его новые, неизвестные ранее черты, оно входит в научный обиход, часто тянет за собой новые открытия.

Наука – одна из наиболее динамичных областей человеческой деятельности. При этом для науки характерен строгий отбор: она не «набрасывается» на любую тайну. Наука, как правило, ставит перед собой задачи, которые может решить. Существует *определенная логика развития науки*: то, что вчера было вне науки из-за недоступности, сегодня – на повестке дня. Недоступность отнюдь не всегда следствие неподготовленности инструментария научного познания. Чаще недоступность означает неподготовленность мировоззрения ученых к постановке соответствующей задачи. Одна из важных черт крупных ученых – ощущение изменения ситуации, изменения, которое позволяет двигаться от незнания к знанию.

Итак, наука динамична. В тысячах научных журналах различного профиля сотни тысяч ученых печатают свои статьи, сообщая о новых данных и новых теоретических соображениях. Поток информации огромен, по сути необозрим. Возникают и совершенствуются новые формы хранения информации и поиска необходимых сведений.

Последний абзац написан не для того, чтобы углубиться в информатику, а для того, чтобы попросить разделить со мной мое восхищение следующим.

Понимание атомно-молекулярного строения макроскопических тел² привело к тому, что само слово «понимание» по отношению к макроскопическим явлениям и свойствам макротел

² Термин «макроскопическое тело» в данном контексте означает, что тело состоит из огромного числа атомов, молекул. Макроскопическое свойство, макроскопическое явление – свойство, явление, в осуществлении которых принимает участие огромное количество атомных и субатомных частиц.

приобрело новый смысл. Понять – означает в конечном итоге уразуметь, каким образом атомы, молекулы, электроны своим положением в теле (т.е. строением тела, его составом) и своим движением «осуществляют» то или иное свойство, явление. Естественно, совсем не каждый раз описание макроскопических свойств и явлений доводится до микроскопического уровня. Но, несомненно, любой факт, любое наблюдение – все, что не укладывается в атомно-молекулярную теорию, что ей противоречит, было бы отмечено, тщательно исследовано, получило известность, оценено и приобрело бы фундаментальное значение. Насколько мне известно, ничего подобного пока нет.

Иногда появляется ощущение, что открыто, обнаружено нечто, что не укладывается в прокрустово ложе современной квантовой физики. Но проходит немного времени, и либо «нечто» находит объяснение в рамках известных законов природы, либо оказывается ошибкой. Именно это обстоятельство дало мне основание назвать непредставимо огромную область «познанной землей».

После построения квантовой механики атомно-молекулярная физика стала завершенной наукой. Свойства трех типов частиц (электронов, протонов, нейтронов), из которых все построено, по-видимому, в полной мере определены. Все большее число ученых склоняются к мысли, что объяснение (описание) даже наиболее загадочного явления – феномена жизни – не потребует открытия у частиц (не только у электронов, протонов, нейтронов, но и у атомов и молекул) каких-либо специфических свойств, которые проявляют себя только тогда, когда частицы принимают участие в работе живого организма. Последний тезис, конечно, недоказуем. Но история науки за последние более чем 70 лет при ее поистине умопомрачительном взлете не знает ни одного факта, который бы этому утверждению противоречил.

Означает ли это, что на будущую физику выпала роль лишь уточнять описание происходящих явлений и совершенствовать наши представления о свойствах тел? Конечно, нет! Хочу лишь обратить внимание, где находятся на нашем воображаемом «глобусе» источники новых фактов, которые могут заставить изменить наши представления о том, из чего построен мир.

В начале XX века стало ясно, что попытка понять устройство мира требует изучения движения микроскопических объектов в областях пространства, в сто миллионов раз меньших одного сантиметра (таков размер атома). Выяснение того, что каждый атом содержит компактное ядро, состоящее из протонов и

нейтронов, заставило сосредоточить внимание на пространственных масштабах, в сотни тысяч раз меньших, чем атом. Этим занялась ядерная физика, которая изучает структуру атомных ядер и силы, действующие между протонами и нейтронами. Хотя объекты ядерной физики столь миниатюрны (10^{-14} – 10^{-13} см), ее успехи принесли в мир ядерную энергетику и невиданные методы убийства – атомную и термоядерную (водородную) бомбы. Обойду молчанием *эти* достижения ядерной физики. К моему восхищению они мало что добавляют. Но в термоядерной физике есть нечто, что меня восхищает, – понимание механизма свечения Солнца и других звезд.

Проникновение в мир ядерных частиц привело к открытию совершенно неожиданных свойств микроскопических частиц. Произошел пересмотр наших представлений о структурных единицах вещества – об элементарных частицах. Во-первых, элементарных частиц для роли первичных сущностей оказалось слишком много (сейчас их числится более 300). Во-вторых, элементарные частицы превращаются друг в друга. Именно поэтому нельзя из них выделить те три (электрон, протон, нейтрон), из которых построен макромир. Один из трех «кирпичей» – нейтрон, оказывается, живет вечно лишь внутри большинства ядер, а в свободном пространстве распадается на электрон, протон и антинейтрино³. В-третьих, все превращения элементарных частиц подчиняются строгим законам сохранения, которые есть следствия симметрии пространства. Выяснилось, что симметрия пространства значительно менее наглядна, чем представлялось.

Развитие физики элементарных частиц заставило попытаться «заглянуть» внутрь протона и нейтрона. Заглянули. И открылся новый мир. Мир *кварков*. Первое впечатление: сколько можно? Неужели частицы напоминают матрешки? И так до бесконечности? Идут годы. Мир кварков познается все с большими подробностями. Но все яснее становится, что дошли до чего-то истинно нового. Нет сомнений, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Но вне частиц их нет. Они только *внутри*. Может быть, это свидетельство того, что физика добралась до по-настоящему первичных сущностей. Однако, не очень верится. Что-то слишком много разных кварков. Впереди много интересного...

³ Не обращайтесь внимание на приставку «анти». Она написана для точности. Многие частицы существуют парами. Кажется, только анти-электрону присвоено специальное наименование – позитрон. Частица и античастица могут аннигилировать – исчезнуть. Например, превратившись в фотоны, как электрон и позитрон.

Получается, что сигналы, которые могут заставить пересмотреть наши основные представления о фундаментальных законах природы, следует ожидать из субмикроскопических областей пространства. Но не только. Научившись получать и анализировать сигналы из далеких от нас мест во Вселенной, физики обнаружили, что есть нечто непонятное. Описывая динамику Вселенной, используя, казалось бы, прекрасно зарекомендовавшие себя законы природы, упираются в недоумение: для описания необходимо больше материи и энергии, чем во Вселенной удается обнаружить. В чем дело, покажет будущее. Напомню только, что сигналы «неблагополучия» приходят к нам с расстояний порядка 10^{10} световых лет, следовательно, из прошлого, удаленного от нас на 10^{10} лет.

Формула моего восхищения проста. Я восхищен познаваемостью мира и его реальной познанностью. Вне зависимости от того, что предстоит еще познать, меня восхищает то, что уже достигнуто. Область познанного – *terra cognita* – непредставимо огромна. Но, как говорилось, и на ней непрерывно рождается новое знание. Нет никаких оснований считать это знание второсортным в сравнении с тем, которое непосредственно раздвигает познанную область.

В попытках объяснить наблюдаемые факты и предсказать новые явления или свойства рождаются новые идеи. Хотя эти идеи не противоречат основам современной квантовой физики, они столь нетривиальны, что вполне сопоставимы с открытиями на границе познанной области. Новые идеи иногда столь всеобщы, что не ограничены областью, в которой возникли. Некоторые переносятся на границу познанного пространства – в физику элементарных частиц, в физику Вселенной.

Ощущение единства физики и ее всеобщности – одна из составляющих моего восхищения.

* * *

Мы живем в окружении предметов и устройств, созданных благодаря использованию результатов достижений науки. С удовольствием перешел от пера и бумаги к компьютеру, трудно представить себе жизнь без телефона и телевизора. Самолет и радиоволны изменили ощущаемые размеры Земного шара. Восхищен телевизором и компьютером. Я не знаю точно, как они устроены. Плохо знаю конкретное устройство значительно более простых механизмов – тепловоза или автомобиля. Я представляю себе общие принципы, лежащие в основе инженерных разработок, и искренне благоговею перед теми, кто может

наладить бесперебойную работу приборов, которыми успешно пользуюсь.

Но, откровенно говоря, не менее острое восхищение у меня вызывает другое – понимание того, как все устроено в природе. Понимание не обязательно мною. Мои знания конкретных подробностей весьма ограничены. Но я знаю, что есть те, кто знают. Нет такого человека, который знает о мире все. Знание распределено по многим. Хранитель знания – человечество. Трудами отдельных людей созданы монографии и энциклопедии. В них собрано знание о мире. Никакого простого знания не существует. Никто не владеет простой формулой, содержащей разгадку мироздания.

Сумма знаний, накопленных человечеством, внушает уважение и надежду на будущее. Очень хочется верить, что человечество в конце концов окажется достойным той удивительной картины мира, которую создало.

КАК КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ОПИСЫВАЕТ МИКРОМИР

В создании физической теории существеннейшую роль играют фундаментальные идеи. Физические книги полны сложных математических формул. Но началом каждой физической теории являются мысли и идеи, а не формулы. Идеи должны позднее принять математическую форму количественной теории, сделать возможным сравнение с экспериментом.

А.Эйнштейн

Вступление

Когда пишешь статью, стараешься представить себе, кто будет ее читать. В этот раз вопрос о том, кто мой читатель, меня особенно волновал. Дело в том, что статья получилась несколько более сложной, чем другие мои статьи, которые публиковались раньше в «Кванте». Правда, в процессе работы над статьей я успокаивал себя тем, что она адресована молодым людям, которые *уже* интересуются физикой, читали научно-популярные статьи по атомной физике и готовы потратить определенные усилия, чтобы разобраться в том, что читают. И еще, предлагаемая статья несколько отличается от большинства научно-популярных статей, посвященных квантовой механике. Здесь главное внимание уделено не конкретным результатам, а более общим вопросам. Ее основная тема — принципиальное отличие описания движения микрочастиц от описания движения макроскопических тел.

Хотелось бы, чтобы эта статья усилила ваше желание глубже понять физику, а в дальнейшем — и избрать физику своей профессией. Вы ведь уже знаете, что в физике бесконечно много интересного...



Как и почему?

Когда задумываешься о проблемах познания, о том, как наука объясняет строение мира и его частей, то понимаешь, что ответить на вопрос «Почему?» гораздо труднее, чем на вопрос «Как?» Ответ на первый вопрос предполагает возможность сослаться на более общую и потому на более глубокую теорию. Но мне всегда кажется, что как только я отвечу на очередной вопрос «Почему?», немедленно последует новый вопрос и спрашивающий захочет узнать, почему справедливо то, на чем основывается ответ на первое *почему*.

На вопрос «Как?» ответить проще. Стараюсь объяснить, *как* движутся частицы или *как* они, объединяясь, создают более сложные конструкции (атомы, молекулы, тела...) и как знание строения конструкций и сил, действующих между частями конструкций, помогает понять наблюдаемые явления и/или свойства окружающих нас тел, можно четко сказать, какая теория используется для объяснения и какие объекты воспринимаются как данные. Нет нужды пытаться объяснять, почему они такие. Иногда это добровольное ограничение, иногда ответа нет, скорее всего – пока.

Отсутствие ответа на вопрос «Почему?», как правило, не мешает ответить на вопрос «Как?» Более того, чаще всего именно так бывает не только в рассказе о науке, но и в научном творчестве. Знакомство с тем, как наука отвечает на бесконечно возникающие вопросы «Как?», позволяет почувствовать, где в настоящее время проходит граница познанной области.

Вот – два примера. Они помогут понять различие между обсуждаемыми вопросами.

Первый пример. За последние десятилетия удалось описать, *как* Вселенная развивалась с момента Большого взрыва до сегодняшней ее стадии. Многие черты развития допускают наблюдательную проверку и подтверждают высказываемые гипотезы. Для описания развития Вселенной используют законы физики, которые были открыты и сформулированы при изучении явлений совершенно иного масштаба, т.е. не пришлось создавать другую, какую-то особую *вселенскую* физику.

А *почему* произошел Большой взрыв? Почему законы природы такие, какие они есть, а не какие-нибудь другие? Ведь если бы законы были другими, то и Вселенная, естественно, была бы совсем иной. Возможно, такой, что в ней никогда не смогла бы возникнуть жизнь и, тем более, думающее, познающее существо.

Допустимы ли такие вопросы? Я убежден, что запрещать задавать какие-либо вопросы нельзя, хотя на некоторые из них

наука дать ответ не может и не сможет. Все чаще мне приходит в голову мысль, что при любом развитии науки останутся вопросы, выбор ответа на которые диктуется верой. Разные люди выбирают разные ответы.

Второй пример. Квантовая механика – о которой речь пойдет в этой статье – позволила в принципе объяснить строение и свойства веществ, их разнообразие и присущие им общие черты. Здесь не место для подробностей. Подчеркну только, что в понимании того, *как* построены тела и *каковы* их свойства, фундаментальную роль играет тот безусловный факт, что ядра атомов построены из нуклонов (протонов и нейтронов), а их оболочки – из электронов. Конкретные черты всей конструкции существенно определяются тем, что электрон примерно в 2000 раз легче нуклона. Если бы частицы, несущие заряды разных знаков, имели одинаковые массы, Мир был бы совершенно иным. Мог ли бы существовать такой мир, не знаю.

Так вот, я не могу ответить на вопрос, *почему* электрон в 1840 раз легче протона. Похоже, в настоящее время никто не знает на него ответа. Значит ли это, что все знание структуры тел и понимание их свойств не имеет основы, построено на песке? Нет, конечно. Важная черта любой науки – возможность использовать известные (или даже предполагаемые) данные о тех элементах, которыми оперирует теория, добываясь понимания. Данные эти не объясняются, а указываются, констатируются. Если теория хорошо и достаточно полно разработана, как например квантовая теория конденсированных тел, то можно точно указать, из каких элементов построены исследуемые объекты и каковы свойства элементов конструкции. Вопрос о том, *почему* элементы имеют такие свойства, а не какие-либо другие, считается неуместным. И сам вопрос, и ответ на него принадлежат другой области физики.

Мир объективно существует

Во фразу, вынесенную в подзаголовок, я вкладываю простой смысл: Мир такой, каков он есть. Нам (мне – точно!) представляется, что Мир познаваем. Ощущение познаваемости Мира из-за грандиозных успехов науки превращается в уверенность. Уверенность оказывала и оказывает стимулирующее действие. Но все же можно себе представить, что в будущем человечество столкнется с ситуацией, когда придется признать: *дальнейшее познание окружающего нас Мира невозможно.*

В частности, уже сейчас мы понимаем, что не можем ответить на вопрос, почему Мир познаваем. Ответ на этот вопрос, по-

видимому, находится за пределами научных методов познания. Это, похоже, один из тех вопросов, ответ на который зависит от мировоззрения отвечающего. Ученый-атеист, не умея ответить на этот вопрос, ограничивается тем, что пытается максимально использовать *познаваемость* Мира. Ее он воспринимает как естественное свойство материального Мира. Верующий ученый в процессе научной деятельности поступает так же, как атеист, но познаваемость Мира считает, по-видимому, Божьим даром. Мое ощущение: *почему* – я не знаю, но Мир *таков*. И это все, что о нем можно сказать, с каждым днем вкладывая в слово *таков* все больше и больше сведений, полученных путем научного познания.

Физика и математика

Разные ученые приходят к своим результатам очень разными путями, но (не конкретизируя) можно наметить некую общую схему пути научного познания. Не каждый ученый проходит весь путь. Чаще в процессе познания принимают участие разные ученые. Особенно, когда речь идет не о конкретном частном результате, а о создании новой науки – такой, как квантовая механика.

Начинается все с *наблюдения* и *обобщения*. Если собранные опытные факты не укладываются в существующую *теорию*, то некоторые ученые (далеко не все!) задумываются. *Необходимо* понять, в чем дело. Делаются попытки объяснить новые факты старой теорией. Неудача следует за неудачей. Кто-то, поняв, что нет надежды «подправить» старую теорию, порывает с ней – и ... рождается *новая теория*. Не вся целиком, а либо ее элементы, либо контуры. Если новая теория справляется с объяснением опытных фактов, то ей предстоит долгая жизнь. Она совершенствуется и постепенно становится столь же строгой и логически безупречной, как и ее предшественница.

Наша статья посвящена прежде всего *теории*. Но, начиная, наверное, с Галилея, *наблюдение* и *обобщение* (а об объяснении и говорить не приходится) не могут обойтись без теории. Даже отбор предмета наблюдения предполагает, что наблюдение будет важно для теории. Для теории, которой пока нет! Так поступали даже в античные времена, только теперь рассуждения античных ученых трудно называть теорией.¹

¹ Рекомендую прочесть книгу Э.Шредингера «Природа и греки» (Москва–Ижевск: R&C Dynamics, 2001). Она поможет понять место античной науки в истории естествознания.

Теория, как мы отметили, – творение ума. Первичное и одно из наиболее важных требований к теории – ее логичность, непротиворечивость. Это требование предъявляет к теории ее создатель. В частности, именно отсюда – необходимость использовать *законные* математические действия и приемы. Принято считать, что использование математики обеспечивает логичность теории. Была даже высказана максима: «Сколько математики, столько теории». Так ли это? Теория теории разнь.

Выше я упомянул границу познания. Оставаясь на интуитивном уровне понимания этого термина, представим себе, что обнаружено или известно давно пока еще непонятое явление, «расположенное» в познанной области да еще вдали от границы познания. Мы хотим его понять, т.е. хотим построить теорию, которая объясняет явление. Непознанных явлений в познанной области сколько угодно. Говоря, что явление принадлежит *познанной области*, мы подчеркиваем нашу уверенность, что для построения теории *этого* явления фундаментальная теория существует. Значит, есть возможность строго поставить математическую задачу и использовать строгие математические методы при ее решении. И в постановке задачи, и при ее решении математика предъявляет требования к физике. Например, физик-теоретик думает, что достаточно полно сформулировал свою задачу, а математический анализ показывает, что не хватает каких-то условий (начальных или граничных). Физик задумывается, выясняет, *что* он упустил, формулирует и добавляет необходимые условия. Этот процесс уточнения задачи не всегда проходит так безобидно, как может показаться. Даже когда «спорящие» физик и математик – одно лицо, дискуссия может быть очень острой.

Когда физик занят исследованием в непознанной области или на самой ее границе, то ситуация в подавляющем числе случаев другая. Физик по необходимости вводит новые понятия в попытке осознать структуру и свойства тех физических существностей, о которых пока мало что известно. Введение новых понятий заставляет наделять их чертами, которые трудно, а иногда невозможно описать апробированными математическими приемами. Иногда физик бросает математику вызов: «Что делать, если необходимо то-то и то-то, а у вас по этому поводу ничего не сказано?» Бывает и иначе: математик, увидев, как (иногда неуклюже) физик преодолевает математические трудности, иронично замечает: «Что же вы не воспользуетесь тем-то и тем-то? Мы сомневались, нужно ли это кому-нибудь, а оказалось... Очень рады, что полученные нами результаты вам нужны».

На официальном языке два последних абзаца можно заменить одной фразой: «Физика и математика обогащают друг друга».

Хочу повторить мысль о том, что одно из самых важных требований к теории – ее логичность и непротиворечивость. И еще, что использование математики обеспечивает логичность теории. Ясно, что речь идет о пользовании *узаконенными* математическими действиями. Но иногда новые математические понятия вводит физик, лишь потом эти понятия узакониваются математиками. Самый простой пример – обобщенные функции. Наиболее известная из них – дельта-функция Дирака. Сначала ее так и величали: *дельта-функция Дирака*. Потом привыкли, и она потеряла имя того, кто ввел ее в обращение. А сделал это Поль Дирак (1902–1984) – один из создателей квантовой механики.

Иногда физик сознательно жертвует математической логикой – когда ощущает, что «жертва угодна богам». Так, релятивистская квантовая механика не может обойтись без перенормировок – определенных дополнительных предписаний. Они выходят за границы общепринятых математических правил. Но то, что «жертва угодна богам», несомненно: теория позволяет описать широкий круг явлений, добиваясь баснословно точного совпадения своих предсказаний с данными опытов. Квантовая электродинамика позволяет вычислить магнитный момент электрона, и результат вычисления совпадает со значением, полученным на опыте, с фантастической, рекордной относительной точностью порядка 10^{-10} . Чудо да и только! Наверное, у меня ощущение чуда – это результат недостаточно глубокого понимания мною теории. Нам часто кажется чудом то, что мы не можем объяснить. Чудо или не чудо, но, как я понимаю, незаконные операции в теории присутствуют, а перенормировки – не только общепринятый способ делать вид, что в теории все в порядке, но и возможность получать конкретные и надежные результаты. Все понимают, что построение непротиворечивой теории – это дело будущего. Есть уверенность, что будущая теория среди прочих своих достижений объяснит, в чем причина успеха перенормировок.

А том водорода

Теперь речь пойдет о теории самого простого атома – атома водорода. Ее создал Нильс Бор (1885–1962) в 1913 году. Это была первая удавшаяся попытка понять строение атома и облечь понимание в формулы, допускающие убедитель-

ное сравнение теории с экспериментом. И в данном случае не обошлось без «жертвы, угодной богам».

Днем рождения квантовой физики надо считать 14 декабря 1900 года, когда Макс Планк (1858–1947) выступил со своим историческим докладом на заседании Немецкого физического общества. Убедившись, что классическая физика не может объяснить наблюдаемые законы теплового излучения, Планк понял, что опытные факты требуют ввести предположение, несовместимое с классической физикой. Он пришел к выводу, что согласия теории с опытом можно добиться, только если признать зерни-



Нильс Бор

стость энергии осциллятора, и принял, что энергия осциллятора равна $E = n\hbar\omega$, где n – целое число и ноль², ω – частота осциллятора, а \hbar – новая физическая постоянная. Постоянная естественно получила название *постоянной Планка* и скоро стала одной из важнейших мировых физических констант. Ее современное значение равно³ $1,0546 \cdot 10^{-27}$ эрг · с.

В превращении постоянной Планка в мировую константу определяющую роль сыграл Альберт Эйнштейн (1879–1955), распространив квантовый подход на широкий круг явлений – от теплоемкости твердых тел до фотоэффекта. Наименьшую порцию энергии осциллятора называли *квантом энергии*, или просто *квантом*. Квант энергии равен $\hbar\omega$.

Небольшой экскурс в историю физики нам понадобился, чтобы понять, из чего исходил Нильс Бор, пытаясь построить теорию атома.

Итак, Бор понимал, что есть не только *необходимость*, но и *возможность* выйти за пределы классической ньютоновской механики. Он верил недавнему (1911 г.) открытию Эрнеста

² Может ли энергия осциллятора быть равной нулю, мы обсудим позже.

³ В этой статье автор использует привычную для физиков-теоретиков гауссову систему единиц. (Прим. ред.)

Резерфорда (1871–1937) ядра атома, в котором сосредоточена масса атома и которое своими размерами приблизительно в 10^5 раз меньше атома. Несомненно, Бор вслед за Резерфордом, которого он считал своим учителем, глубоко проникся уверенностью, что любой атом напоминает Солнечную систему: ядро – Солнце, а электроны – планеты. Только силы, действующие между ядром и электронами, неизмеримо больше, чем силы гравитационного ньютоновского притяжения между микрочастицами. Притяжение обусловлено тем, что у ядра и электронов заряды разного знака. Они притягиваются друг к другу кулоновскими электростатическими силами. Атом водорода – простейшая система. Он состоит из одного протона – «солнца» и одного электрона – «планеты».

Почему была *необходимость* выйти за пределы классической физики? Причина состояла в том, что классическая физика не могла объяснить устойчивость атома, не могла ответить на фундаментальные вопросы, почему *все атомы* одного элемента *тождественны между собой* и почему *спектр излучения* возбужденных атомов *дискретен*. Все эти вопросы и ответы на них тесно связаны между собой. Вопросы содержат *почему*. Подчеркнем: описать, как движутся частицы в атоме, с помощью существующей механики оказалось невозможным. Об этом – чуть подробнее.

Стабильное существование планетарной системы возможно, только если «планета» движется вокруг «солнца» и центробежная сила инерции противостоит силе притяжения. Так как протон во много раз тяжелее электрона, то можно считать, что движется только электрон. Обозначим массу электрона m_e ($m_e = 9,1 \cdot 10^{28}$ г), его заряд равен $-e$ (заряд протона $+e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ), скорость электрона v . Считая что электрон движется по окружности радиусом a , имеем

$$\frac{e^2}{a^2} = \frac{m_e v^2}{a}, \text{ или } \frac{e^2}{a} = m_e v^2.$$

Стабильность объяснить, похоже, можно вращением. А тождественность? В одном атоме скорость электрона может быть больше, в другом меньше. Радиусы их будут отличаться. Возможно, существует какая-то характерная скорость? Физика уже имела в своем распоряжении характерную скорость – скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Попробуем подставить это значение в приведенную формулу. Если $v = c$, то размер атома должен быть порядка 10^{-13} см. Однако уже было известно, что атомы (даже самый легкий из них – атом водорода) значительно больше –

радиус атома порядка 10^{-8} см. Значит, скорость v электрона значительно меньше скорости света c , и релятивистские эффекты не должны иметь места.

Может быть, можно найти какую-то другую характерную скорость или другой характерный размер? Значением констант – величинами заряда и массы электрона – мы уже воспользовались, других констант нет. Во всяком случае, нет в пределах классической механики.

Прежде чем выйти за пределы классической (неквантовой) физики, вернемся к вопросу о стабильности. Атом, как мы отметили, стабилен с точки зрения классической механики. А как обстоит дело с электродинамикой? Согласно законам электродинамики, любое заряженное тело, двигаясь с ускорением (а движение по окружности или по эллипсу это движение с ускорением), будет излучать электромагнитные волны. Если частота обращения равна ω , то и частота волн будет ω . Волны унесут часть энергии электрона, он приблизится к ядру, скорость его возрастет (!), частота увеличится. Так, постепенно приближаясь к ядру и излучая волны все более высокой частоты, электрон в конце концов упадет на ядро. Можно посчитать, сколько на это ушло бы времени, если бы такая картина имела место. По атомным масштабам, для этого нужно много времени: примерно миллион раз обернулся бы электрон вокруг ядра, прежде чем упал бы на него. А по человеческим масштабам, время жизни атома было бы совершенно ничтожным – приблизительно 10^{-10} с. О какой стабильности можно говорить?!

Уменьшение энергии и одновременное увеличение скорости при приближении электрона к ядру может удивить. Не удивляйтесь: полная энергия движущегося электрона E тем больше, чем электрон дальше от ядра. Действительно, сумма потенциальной и кинетической энергий равна

$$E = -\frac{e^2}{a} + \frac{mv^2}{2}, \text{ но } \frac{mv^2}{a} = \frac{e^2}{a^2}, \text{ откуда } E = -\frac{e^2}{2a}.$$

Потенциальная энергия электрона, соответствующая силе притяжения $F = -\frac{e^2}{a^2}$, есть

$$U = -\frac{e^2}{a} + \text{const}.$$

Постоянную принято считать равной нулю, тогда при бесконечном расстоянии электрона от ядра энергия обращается в ноль. При отрицательной энергии ($E < 0$) электрон вращается вокруг ядра, а при $E > 0$ он не связан с ядром и может удалиться на бесконечность.

К 1913-у году Нильс Бор понимал или, по меньшей мере, надеялся, что постоянная Планка может играть роль в объяснении свойств микроскопических объектов. Давайте попробуем наряду с m_e и e включить \hbar в число величин, которые могут входить в формулы, определяющие значения скорости электрона v и радиуса его орбиты a . Нетрудно убедиться, что из соображений размерности получится

$$a = \frac{\hbar^2}{e^2 m_e}, \quad v = \frac{e^2}{\hbar}.$$

Лучшим доказательством правильности догадки служит численная оценка – и радиус орбиты a , и скорость v имеют нужный порядок величины: $a \sim 10^{-8}$ см, $v \sim 10^8$ см/с.

Результат, конечно, многообещающий. Но как двигаться дальше? Мне не хочется нарушать историческую последовательность событий. Обычно при популярном изложении в этот момент привлекают соображения Луи де Бройля (1892–1987) о существовании волн материи. Но, к сожалению, Бор этих соображений не знал – они были высказаны Луи де Бройлем лишь 10 лет спустя. Бор же исходил из того, что ему было известно.

Известно было, что энергия осциллятора *квантуется*. Согласно Планку, $E/\omega = n\hbar$. Энергию E осциллятора – частицы массой m , колеблющейся вдоль координаты q , можно записать следующим образом:

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 q^2}{2},$$

где $p = mv$ – импульс частицы. В физике часто употребляют понятие «фазовое пространство», добавляя к этим словам, к какой механической системе они относятся. *Фазовое пространство осциллятора* – это плоскость, на которую нанесена система координат: по оси абсцисс – координата q , а по оси ординат – импульс p . Выражение для энергии можно рассматривать как уравнение траектории в фазовом пространстве. Это – эллипс с полуосями $\sqrt{2Em}$ и $\sqrt{2E/(m\omega^2)}$. Площадь эллипса равна числу π , умноженному на произведение его полуосей. Это означает, что траектория в фазовом пространстве осциллятора охватывает площадь, равную $2\pi E/\omega$, или $2\pi I$. Величина I носит название *действия*.

Теперь условие квантования можно обобщить на любое периодическое движение: *если частица совершает периодическое движение, ее действие квантуется*. Закон квантования

прост: *действие* равно целому числу постоянных Планка, т.е.

$$I = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Подчеркнем, что условия квантования (и условие Планка, и его обобщение) в классическую механику внесены только в попытке объяснить опытные данные. В классической механике нет каких-либо выделенных траекторий. Согласно логике классической механики, возможны траектории с любым значением действия. Квантование нарушает логику классической механики.

Понимая, что «совершает преступление», Нильс Бор все же применил условие квантования к движению электрона вокруг протона. Результаты не заставили себя ждать. Оказалось, что электрон может (должен) двигаться по вполне определенным орбитам, радиусы которых равны

$$a_n = a_B n^2, \quad \text{где } a_B = \frac{\hbar^2}{me^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Индекс «В» – в честь Бора (Bohr). Величину a_B так и называют – *радиус Бора*, это минимальное расстояние, на которое электрон может приблизиться к ядру (протону). Радиус Бора с большой точностью равен $0,5 \cdot 10^{-8}$ см. Подставив значение радиуса a_n в выражение для энергии, получим

$$E_n = -\frac{e^2}{2a_n} = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Попытаемся понять качественную сторону полученных результатов. Электрон в атоме может иметь только дискретные значения энергии. Мы нарочно опустили наименование атома (водород), так как в любом атоме энергии электронов дискретны. Состояние электрона с дискретной энергией – *разрешенное состояние*. По теории Бора электрон, находясь в разрешенном состоянии, хотя и движется с ускорением, но не излучает (не спрашивайте, *почему!*). Среди разрешенных состояний есть состояние с наименьшей энергией E_1 . Она отрицательна, но не равна минус бесконечности, как было бы, если бы электрон упал на протон (при $a = 0$). Меньшей энергии, чем E_1 , электрон иметь не может. Состояние с наименьшей энергией называется *основным*. Все остальные разрешенные состояния называют *возбужденными*. Любое возбужденное состояние не вполне стационарно. Из возбужденного состояния электрон может «перепрыгнуть» в состояние с меньшей энергией, но только в такое состояние, энергия которого разрешена.

Энергия излучается квантами $\hbar\omega$. Частота излучения, т.е. энергия кванта, определяется законом сохранения энергии. В

процессе излучения, как во всех процессах, происходящих в природе, выполняется закон сохранения энергии. В согласии с ним, энергия излученного кванта равна

$$\hbar\omega_{nm} = E_n - E_m,$$

где n и m – целые числа и $n > m$. Сколько времени электрон проведет в возбужденном состоянии, зависит от ряда причин. Времена эти значительно различаются, но все они конечны. По теории Бора вычислить их нельзя.

Электрону, находящемуся в основном состоянии, закон сохранения энергии запрещает излучать электромагнитную энергию. Основное состояние электрона в атоме устойчиво.

Существование основного состояния обеспечивает тождественность атомов и их стабильное существование. Имеется полное согласие формулы

$$\hbar\omega_{nm} = \frac{me^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ при } n, m = 1, 2, 3, \dots \text{ и } n > m$$

со спектроскопической картиной.

Если бы задачей квантовой теории было лишь вычисление спектра атома водорода, то теорию Бора при всей ее эклектичности можно было бы посчитать выполнившей свою задачу. Задача была другой: понять, как «устроены» атомы. Но даже с построением теории атома гелия – с двумя электронами – новая теория Бора справлялась с большим трудом. И уж, конечно, она по общности и возможностям ни в какое сравнение не могла идти с классическими теориями. В конце XIX века казалось, что классической физике доступно объяснить «все на свете» с единых позиций. А у Бора вместо стройной теории – странная эклектика, по загадочной причине описывающая экспериментальные факты.

И все же значение теории Бора огромно. Впервые было показано, что объяснить свойства атомных частиц можно, только если «позвать на помощь» кванты. Правда, и сами кванты – незаконнорожденные отпрыски классической теории. Откуда они взялись? Что это за теория, когда ответ надо скорее угадывать, чем использовать привычную формулу, означающую, что теория завершена, правила выработаны и остается решать задачи, относящиеся к прерогативе теории.

С первых же дней создания теории атома водорода и Нильс Бор, и все его коллеги пытались построить *настоящую* теорию. На создание квантовой теории ушло приблизительно 15 лет. За эти годы была создана *квантовая механика*, и в понимании

законов микромира произошел удивительный скачок. Без преувеличения можно сказать, что создание квантовой механики – один из важных этапов истории цивилизации. Мир изменился за время жизни одного поколения людей. Последствия этого события будут ощущаться всегда.

Волны? Частицы?

То, что свет имеет двойную сущность, постепенно вошло в сознание физиков. *Фотоны* стали так же реальны, как световые волны. Этому способствовал ряд экспериментальных результатов, которые получили естественное объяснение на основе подхода к свету как к потоку фотонов. Упомянем лишь два явления.

Первое явление – *фотоэффект* – это испускание электронов веществом при облучении его светом. Отметим три экспериментальных факта: максимальная кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$ вылетевшего из вещества электрона не зависит от интенсивности света; $E_{\text{кин}}$ линейно зависит от частоты света; существует пороговый эффект – при частотах, меньших некоторой частоты ω_0 , фотоэффект отсутствует.

С точки зрения представления о свете как о волновом процессе, эти факты были необъяснимы. Альберт Эйнштейн объяснил их в работе 1905 года «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света». Объяснение удивительно просто: электрон поглощает свет квантами – фотонами. При поглощении фотона с энергией $\hbar\omega$ выполняется закон сохранения энергии

$$\hbar\omega = E_{\text{кин}} + A,$$

где A – энергия, которую надо затратить, чтобы «оторвать» электрон от вещества, ее называют *работой выхода*. Все перечисленные экспериментальные факты – следствие этого равенства.

Значение упомянутой работы видно по тому, что Нобелевскую премию в 1921 году Эйнштейн получил со следующей формулировкой: «За важные физико-математические исследования, особенно за открытие законов фотоэлектрического эффекта».

Второе явление – *комpton-эффект* – это рассеяние электромагнитной волны на свободном электроне. Назван эффект в честь американского физика Артура Комптона (1892–1962). Явление «впервые с требуемой тщательностью было им изучено», хотя эффект «проявлялся уже в первых опытах по рассея-

нию рентгеновских лучей...» (цитирую по Физической энциклопедии).

Особенность эффекта, которую невозможно объяснить, исходя из волновых представлений о свете, – это небольшое уменьшение частоты рассеянного света по сравнению с частотой падающего света. Действительно, объяснить такое нельзя: рассеянный свет излучают электроны, под действием электрического поля световой волны они колеблются с частотой света и свет такой же частоты должны излучать.

Совершенно другая картина, если свет – поток фотонов. Фотон – частица, чем-то напоминающая снаряд. Столкнувшись с электроном, фотон, как всякая частица, часть энергии и импульса передает электрону. Энергия ε и импульс \vec{p} фотона определяются его частотой ω и волновым вектором \vec{k} :

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k},$$

причем частота и величина волнового вектора связаны между собой соотношением $\omega = ck = 2\pi c/\lambda$, где λ – длина волны света, а направлен волновой вектор туда, куда движется волна. Согласно релятивистской механике Эйнштейна, энергия E электрона зависит от его импульса P следующим образом:

$$E = \sqrt{m_e^2 c^4 + c^2 P^2}.$$

Запишем законы сохранения энергии и импульса при столкновении фотона с электроном, а индексами «н» и «к» отметим начальное и конечное значения импульсов электрона и фотона:

$$E(P_n) + \varepsilon(p_n) = E(P_k) + \varepsilon(p_k), \quad \vec{P}_n + \vec{p}_n = \vec{P}_k + \vec{p}_k.$$

Расчет изменения частоты фотона теперь не представляет труда. Принято результат этого расчета приводить не в виде уменьшения частоты, а в виде увеличения длины волны рентгеновских лучей:

$$\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_n = \left(\frac{2\pi\hbar}{m_e c} \right) (1 - \cos\theta),$$

где θ – угол рассеяния. Параметр размерности длины $2\pi\hbar/(m_e c) = 2,4 \cdot 10^{-10}$ см называется *комптоновской длиной волны электрона*. Комптоновская длина волны определяет порядок величины эффекта Комптона. С развитием теории она стала играть важную роль при описании многих эффектов. Согласие измерений Комптона с формулой для $\Delta\lambda$ подтвердило, что фотон – настоящая частица. Как каждая частица, фотон обладает и импульсом, и энергией.

В 1927 году за открытие (1922 г.) эффекта, носящего его имя, А.Комптон получил Нобелевскую премию.

Оглядываясь назад, трудно оценить, как воспринималась сделанная работа тогда. Теперь кажется все очевидным. Какие могут быть сомнения? К счастью, сохранились высказывания современников открытия. Приведем концовку статьи Эйнштейна «Эксперимент Комптона»: «...Результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул, не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи количества движения [импульса]». А в тексте статьи есть абзац, усиливающий оценку работы Комптона и одновременно утверждающий алогичность ситуации в физике тех лет: «...Теперь мы имеем две теории света, обе необходимые и – как приходится признать сегодня – *существующие без всякой логической взаимосвязи*, несмотря на двадцать лет колоссальных усилий физиков-теоретиков. Квантовая теория света сделала возможной теорию атома Бора и объяснила так много фактов, что она должна содержать значительную долю истины. [...] *Чрезвычайную важность приобретает вопрос* о том, в какой степени частицам света, или квантам, следует приписывать свойства снарядов» (выделено мной – М.К.).

Обратим внимание на то, что в статье Эйнштейна нет слова *фотон*. Нет его и в публикации Комптона. Дело в том, что слово *фотон* «родилось» заметно позже, только в 1929 году, и ввел его в употребление американский физико-химик Гильберт Льюис (1875–1946).

Алогичность и странность физической картины микромира – мира атомных и субатомных частиц – побудила Луи де Бройля высказать в 1923 году совсем неожиданное соображение: движение частицы всегда сопровождается волной. Что это за волна, теория даже не пыталась объяснить, но характеристики волны указывала. Если E и \vec{P} – энергия и импульс частицы, то частота волны Ω и волновой вектор \vec{K} определяются так:

$$\Omega = \frac{E}{\hbar} \text{ и } \vec{K} = \frac{\vec{P}}{\hbar}, \text{ или } \hbar\Omega = E \text{ и } \hbar\vec{K} = \vec{P}.$$

Эти соотношения получили имя Луи де Бройля. Формально они не отличаются от уравнений, с помощью которых вводятся кванты света – фотоны. Если можно читать уравнение слева направо, то, очевидно, его можно читать и справа налево. Эта простая мысль – важное эвристическое соображение.

Высказано удивительное и неожиданное предположение. Казалось бы, надо немедленно поставить эксперимент и выяс-

нить, имеет ли гипотеза де Бройля какое-либо отношение к действительности. Лишь через четыре года, в 1927 году, в США Клинтон Дэйвиссоном (1881–1958) и в Англии Джорджем Томсоном (1892–1975) была открыта дифракция электронов на кристалле, подтвердившая существование у электронов волновых свойств. За это открытие Дэйвиссон и Томсон в 1937 году были удостоены Нобелевской премии.

Теоретические представления нередко опережают опыт. У них своя логика развития. В 1926 году Эрвин Шредингер (1887–1961) опубликовал работу, в которой сформулировал *волновое* уравнение, положившее начало одной из форм квантовой механики. Эта форма квантовой механики некоторое время именовалась волновой механикой и существовала наряду с *матричной механикой*. Волновая механика возникла почти одновременно с матричной, но все же чуть позже. Сначала считали, что придется выбирать между двумя формами квантовой механики. Потом не только убедились, что обе они хорошо приспособлены к описанию свойств микромира, но и пришли к выводу о полной их тождественности. Все свойства атома, которые он имеет, т.е. те, которые можно обнаружить в эксперименте и даже измерить, могут быть вычислены, найдены, предсказаны, используя решение уравнений квантовой механики. В какой именно форме, безразлично. Главное, решить задачу без ошибок.

Творцом матричной механики заслуженно считается Вернер Гейзенберг (1901–1976). В 1932 году за открытие квантовой механики в матричной форме (1925 г.) Гейзенберг получил Нобелевскую премию. Открытие, за которое были удостоены Нобелевской премии 1933 года Эрвин Шредингер и Поль Дирак, сформулировано так: «За открытие *новых форм* атомной теории» (выделено мной – М.К.). Главная заслуга Дирака – формулировка основ *релятивистской квантовой механики*. Но матричная квантовая механика, как и релятивистская квантовая механика, – за пределами нашего рассказа.

Уравнение Шредингера

Попробуем понять, что руководило Шредингером при формулировке нового уравнения – конечно, это уравнение получило имя Шредингера. Правильнее было бы написать не «что руководило Шредингером», а чем *мог бы, по моему мнению*, Шредингер руководствоваться. Уже закончив эту статью, я смог познакомиться с историей создания волновой механики по статьям ее творца (см. книгу Э.Шредингера «Новые

пути в физике, статьи и речи» – М.: Наука, 1971). Ход рассуждений Шредингера описан мною в общих чертах верно.

Все, что было привнесено в классическую физику (в механику и оптику) в попытках объяснить природу атомных и субатомных частиц, несомненно, никаким образом из основных положений классической физики не следовало. Все формулы, которые содержали постоянную Планка, – и самого Планка, и Бора, и де Бройля – *привнесены, добавлены*, а не выведены. Эрвин Шредингер попытался построить последовательную теорию движения микроскопических частиц, сформулировать уравнение – такое, чтобы квантовые условия были необходимыми следствиями его решений. Его попытка завершилась успехом.

Задумавшись над тем, что из себя представляют уравнения классической механики и электродинамики (оптика – ее часть). И здесь не обойтись без ответа на вопрос «Почему?» Уравнения механики и электродинамики – основных наук, составляющих к началу XX века вместе с термодинамикой всю классическую физику, суть дифференциальные уравнения, т.е. они содержат не только искомые функции, но и их производные. В этом есть глубокий смысл.

События происходят в пространстве и во времени. Зная состояние в начальный момент, мы должны с помощью фундаментальных уравнений уметь определить, что будет происходить дальше, в последующие моменты времени. И прежде всего – через бесконечно малый интервал времени dt . Перемещение в пространстве требует умения описывать бесконечно малый сдвиг в пространстве – сдвиг, равный дифференциалу $d\vec{r}$ ($d\vec{r}$, как и радиус-вектор \vec{r} , имеет три проекции: dx , dy , dz). Именно поэтому фундаментальные уравнения должны содержать и содержат не только величины, определяющие состояние, но и их производные. Ньютону для создания механики пришлось разработать специальный математический аппарат – анализ бесконечно малых. Его тогда еще не было.



Эрвин Шредингер

Уже дважды было упомянуто слово «состояние». Как в классической физике описывается состояние? Рассмотрим два примера.

Первый пример – движение частицы массой m под воздействием силы \vec{F} , зависящей от координаты \vec{r} .

Уравнение Ньютона позволяет решить любую задачу о движении частицы. В понятие состояния частицы, несомненно, входит ее положение в момент времени t . Но знания координаты частицы $\vec{r} = \vec{r}(t)$ мало. Чтобы уметь определить траекторию, т.е. судьбу частицы в любой произвольный момент времени, надо, кроме координаты частицы в момент времени t , знать и ее скорость $\vec{v} = d\vec{r}/dt$ в тот же момент. Координата \vec{r} и скорость \vec{v} полностью определяют состояние частицы. Вместо скорости \vec{v} удобнее задавать импульс $\vec{p} = m\vec{v}$. Раньше мы говорили, что физики часто вводят понятие фазового пространства. Фазовое пространство одной частицы – это 6-мерное пространство (\vec{r}, \vec{p}) . Оно объединяет в одно пространство трехмерное координатное и трехмерное импульсное пространства. Состояние частицы изображает точка в фазовом пространстве.

Выпишем для полноты и уравнение Ньютона в выбранных переменных:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}(\vec{r}).$$

Второй пример – электромагнитная волна.

Не будем уточнять, идет речь о световой волне или о радиоволне. Важно то, что в любой электромагнитной волне колеблются и электрическое и магнитное поля. Этот пример придется разобрать подробнее, так как он для нас очень важен.

Уравнения электродинамики сформулировал Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879). Одно из важных достижений максвелловской электродинамики – вывод о том, что в пустом пространстве могут распространяться электромагнитные волны. Состояние волны нам известно, если известны значения напряженностей полей – электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} – во всех точках пространства (при любом \vec{r}) в данный момент времени t .³ Иными словами, состояние волны описывается двумя функциями: $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$ и $\vec{H} = \vec{H}(\vec{r}, t)$. Теория дает возможность подроб-

³ Напряженность \vec{H} магнитного поля определяет тот вклад в магнитную индукцию \vec{B} , который дают внешние источники поля. (Прим. ред.)

но изучить свойства электромагнитных волн. Эксперимент их прекрасно подтверждает. Упомянем два свойства, которые помогут облегчить изложение.

1) Электромагнитные волны поперечны: в распространяющейся вдоль оси z волне векторы напряженностей \vec{E} и \vec{H} лежат в плоскости x, y .

2) Векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны друг другу.

Выберем оси координат так: ось x – вдоль вектора \vec{E} , ось y – вдоль вектора \vec{H} , ось z , как мы уже говорили, – вдоль волнового вектора \vec{k} ($k_x = 0$, $k_y = 0$, $k_z = k$). В этом случае уравнения Максвелла выглядят сравнительно просто:

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad -\frac{\partial H_y}{\partial z} = \frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t}.$$

Индексы « x » и « y » обозначают, каковы отличные от нуля компоненты векторов \vec{E} и \vec{H} ; выражения $\partial\phi/\partial z$ и $\partial\phi/\partial t$ – частные производные от функции $\phi = \phi(z, t)$; скорость света, как всегда, обозначена буквой c .⁴

Из уравнений Максвелла легко выводится *волновое уравнение*. Ему удовлетворяют обе функции: $E_x = E_x(z, t)$ и $H_y = H_y(z, t)$. Выпишем волновое уравнение для напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = 0.$$

Почему уравнение называется волновым? Потому что его решение описывает волну. Решение уравнения можно записать по-разному – либо в виде действительной функции:

$$E_x = A \cos(kz - \omega t + \alpha),$$

либо в виде комплексной функции:

$$E_x = A \exp(i(kz - \omega t + \alpha)),$$

где A и α – действительные постоянные числа, зависящие от конкретной постановки задачи. Подставляя эти функции в

⁴ Не могу удержаться, чтобы не напомнить следующее. Формулируя экспериментальные результаты Майкла Фарадея (1791–1867), установившего связь электрических и магнитных свойств, Максвеллу необходимо было ввести множитель, связывающий разнородные (электрические и магнитные) величины. Этот множитель был обозначен буквой c . Когда оказалось, что численно множитель c равен скорости света, стала ясной электромагнитная природа света.

волновое уравнение, убеждаемся, что обе они удовлетворяют уравнению, а его следствием служит связь между частотой и модулем волнового вектора: $\omega = ck$, а для фотона – между энергией и модулем импульса: $\varepsilon = cp$. Напомним: $\varepsilon = \hbar\omega$ и $\vec{p} = \hbar\vec{k}$; если $k_x = k_y = 0$, то $k = k_z$, $p = p_z$; в общем случае $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$, а $p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$.

Сделаем важное замечание по поводу использования комплексных чисел и комплексных функций. Единственным оправданием их использования здесь и вообще в классической (неквантовой) физике служит удобство. В данном случае – то, что $d(e^x)/dx = e^x$, а $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ (последняя формула называется формулой Эйлера). Конечно, и E_x и H_y – действительные величины. Как же иначе, если $e\vec{E}$ сила, действующая на электрон со стороны электрического поля, а магнитное поле \vec{H} определяет силу Лоренца $(e/c)[\vec{v}\vec{H}]$, действующую на движущийся электрон. Найдя решение в комплексной форме, мы *обязаны* взять от полученного выражения действительную часть (Re):

$$E_x = A \cdot Re(\exp(i(kz - \omega t + \alpha))),$$

а

$$Re(\exp(i(kz - \omega t + \alpha))) = \cos(kz - \omega t + \alpha).$$

Выражение для E_x можно, естественно, получить без использования комплексных чисел.

Вернемся к уравнениям де Бройля. В дальнейшем энергию и импульс частицы мы будем обозначать так: ε – энергия, а \vec{p} – импульс. Спутать с фотоном трудно: о нем пока не будет идти речь.

Первая задача, которую ставил перед собой Шредингер, была задача об энергетическом спектре атома водорода. Необходимо было найти уравнение, из которого бы *следовали* вычисленные Бором уровни энергии электрона, вращающегося вокруг ядра (протона). Ведь уровни, хотя они и были получены искусственно, с нарушением логики, прекрасно соответствовали данным опыта – спектру излучения и поглощения атома водорода. Понимая, что релятивистские осложнения при описании движения электрона в атоме водорода можно до поры до времени не учитывать, Шредингер использовал нерелятивистскую механику. Шредингер – создатель *нерелятивистской волновой (квантовой) механики*.

У свободно движущейся нерелятивистской частицы $\varepsilon = p^2/(2m)$, а, согласно уравнениям де Бройля, $\varepsilon = \hbar\omega$ и $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

(мы заменили также обозначения частоты и волнового вектора). Запишем волновое уравнение, решение которого $A \exp(i(\vec{k}\vec{r} - \omega t + \alpha))$ должно приводить к следующему соотношению между частотой и волновым вектором:

$$\omega = \frac{\hbar k^2}{2m}, \quad k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2.$$

Присутствие постоянной Планка \hbar в этом выражении – свидетельство о квантовом генезисе волновых свойств частицы. С электромагнитными волнами было строго наоборот: для волнового описания ($\omega = ck$), конечно, не нужна постоянная Планка. С помощью постоянной Планка осуществляется переход к фотону.

Итак, нам надо найти уравнение, решение которого есть $A \exp(i(\vec{k}\vec{r} - \omega t + \alpha))$. Так как $\vec{k}\vec{r} = xk_x + yk_y + zk_z$, то это довольно просто. Обозначим искомое решение буквой Ψ . Для того чтобы функция Ψ равнялась $A \exp(i(\vec{k}\vec{r} - \omega t + \alpha))$, необходимо, чтобы уравнение, которому функция Ψ удовлетворяет, имело вид

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right).$$

А зачем, собственно говоря, вводить частоту и волновой вектор? Не проще ли функцию выразить через энергию и импульс: $\Psi = A' \exp((i/\hbar)(\vec{p}\vec{r} - \varepsilon t))$? Фазу $\alpha' = \hbar\alpha$ мы включили в постоянную A' , которая теперь комплексна.

Перепишем предыдущее уравнение, умножив его на \hbar . Подстановка в него решения $\Psi = A' \exp((i/\hbar)(\vec{p}\vec{r} - \varepsilon t))$, естественно, приводит к правильному соотношению

$$\varepsilon = \frac{p^2}{2m}.$$

Мы получили нужное соотношение, ничего не зная о природе Ψ -функции. Несомненно, Ψ -функция – необычная физическая величина: она комплексна и ограничиться ее действительной частью нельзя. Ни действительная, ни мнимая части Ψ -функции найденному уравнению не удовлетворяют. То, что эти соображения не остановили Шредингера, – свидетельство его удивительной интуиции.

Среди задач квантовой механики важное место занимают задачи, в которых частица или система частиц имеют определенную энергию. Это может быть либо изолированная система, либо

система, находящаяся под действием постоянной силы. Задача о свободной частице, несомненно, принадлежит к классу таких задач. В дальнейшем только такими задачами мы и будем заниматься.

Выделим из Ψ -функции ее зависимость от времени:

$$\Psi = \psi(\vec{r}) \exp\left(-\frac{i\epsilon t}{\hbar}\right)$$

и получим уравнение для стационарной, не зависящей от времени волновой функции $\psi = \psi(\vec{r})$:

$$\epsilon\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} \right).$$

Нам предстоит трудный шаг, связанный с введением операторов. Термина *оператор* не следует бояться, он не скрывает ничего таинственного. Например, $\partial/\partial x$ – оператор дифференцирования. Если функция стоит справа от оператора дифференцирования, то ее следует продифференцировать. Вот и все...

Сделаем важное утверждение: *каждой механической величине в квантовой механике соответствует оператор.*

Как вводятся операторы, мы покажем на примере трех операторов проекций составляющих импульса. Свободно движущаяся частица имеет импульс \vec{p} . Проекции импульса \vec{p} на оси координат равны p_x, p_y, p_z . Операторы, соответствующие проекциям импульса, обозначим Op_x, Op_y, Op_z и запишем

$$Op_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}, \quad Op_y = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial y}, \quad Op_z = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial z},$$

Ψ -функцию свободной частицы с импульсом \vec{p} мы знаем. Подействуем на нее операторами Op_x, Op_y, Op_z и получим

$$Op_x\Psi = p_x\Psi, \quad Op_y\Psi = p_y\Psi, \quad Op_z\Psi = p_z\Psi.$$

Если действие какого-либо оператора на функцию сводится к умножению на константу, то такую функцию называют *собственной функцией этого оператора*, а значение константы – *собственным значением оператора*. В согласии с определением, если частица имеет импульс, равный \vec{p} , то это означает, что волновая функция есть собственная функция оператора

$Op_{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial \vec{r}}$, заданного соответствующими проекциями:

$$\Psi_{\vec{p}} = \Psi_{\vec{p}}(\vec{r}) \exp\left(i\epsilon(\vec{p}) \frac{t}{\hbar}\right), \quad \Psi_{\vec{p}} = A' \exp\left(\frac{i}{\hbar} \vec{p}\vec{r}\right), \quad \epsilon(\vec{p}) = \frac{p^2}{2m}.$$

Надеюсь, вы понимаете, что пока мы лишь вводили новые обозначения, но не продвинулись дальше соотношений де Бройля. Часто разумно выбранные обозначения помогают продвигаться вперед.

Воспользовавшись определениями операторов, перепишем уравнение для Ψ -функции:

$$\epsilon \Psi = \frac{1}{2m} \left((Op_x)^2 + (Op_y)^2 + (Op_z)^2 \right) \Psi .$$

Стоящий в правой части оператор по своему смыслу есть оператор кинетической энергии. Если к кинетической энергии добавить потенциальную энергию $U(\vec{r})$, то получится полная энергия. Если к оператору кинетической энергии добавить потенциальную энергию,⁵ то получится оператор энергии ОН:

$$\text{ОН} = \frac{1}{2m} \left((Op_x)^2 + (Op_y)^2 + (Op_z)^2 \right) + U(\vec{r}) .$$

Буква «Н» выбрана потому, что энергия, выраженная через импульс и координату, называется функцией Гамильтона (W. Hamilton, 1805–1865). Полученное выражение определяет оператор Гамильтона – *гамильтониан*.

Вот теперь можно вслед за Шрёдингером продвинуться вперед.

Для того чтобы решить задачу о квантовом движении частицы, находящейся под действием силы $\vec{F} = -\partial U(\vec{r})/\partial \vec{r}$, надо найти *собственные функции и собственные значения гамильтониана*, т.е. решить уравнение Шрёдингера, которое мы запишем в трех различных, но тождественных друг другу видах:

$$\text{ОН}\Psi = \epsilon \Psi ,$$

$$\frac{1}{2m} \left(\left((Op_x)^2 + (Op_y)^2 + (Op_z)^2 \right) + U(\vec{r}) \right) \Psi = \epsilon \Psi , \quad (1)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + (\epsilon - U(\vec{r})) \Psi = 0, \quad \Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} .$$

Теория уравнений такого типа математиками уже была разработана.

⁵ В том варианте квантовой механики, которая здесь излагается, оператор координаты есть оператор умножения, т.е. фактически любую функцию координаты при переходе к квантовой механике заменять оператором не надо.

Решение уравнения Шредингера

Легко представить себе, какую радость испытал Шредингер, когда найденные им уровни энергии электрона в атоме совпали с теми, которые были получены Нильсом Бором, а уровни энергии осциллятора совпали с теми, которые навязал осциллятору Макс Планк для объяснения законов теплового излучения. Правда, оказалось, что квантовый осциллятор не может не колебаться. Даже в основном состоянии, т.е. в состоянии с наименьшей возможной энергией – энергией *нулевых колебаний* $(1/2)\hbar\omega$, осциллятор колеблется. Уровни энергии осциллятора таковы:

$$\varepsilon = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots - \text{целые числа.}$$

Нулевые колебания – специфическая квантово-механическая черта. Несколько слов о них будет сказано ниже. Заметим, что и электрон в основном состоянии в атоме водорода движется: среди значений n в формуле Бора нет значения $n = 0$.

Математическая теория решений уравнений вида уравнения Шредингера довольно сложна. Вывести формулы Бора и Планка нам здесь не удастся. Отметим только: для решения уравнения Шредингера необходимо сформулировать граничные условия для Ψ -функции – в обеих задачах (об осцилляторе и об атоме водорода) Ψ -функция на бесконечности должна обращаться в ноль. То, что вычисленные по теории Шредингера уровни энергии электрона в атоме водорода и осциллятора *точно* совпали с результатами Планка и Бора, – специфическая особенность именно этих задач. Из теории Шредингера следуют условия квантования, использованные Планком и Бором. В общем случае метод Бора и Планка – квантование *классического действия* – справедлив только тогда, когда действие велико, т.е. $n \gg 1$. Справедливость формул Планка и Бора при произвольных значениях числа n – в каком-то смысле удача.

Чтобы показать, как естественно возникают квантованные (дискретные) уровни энергии, мы рассмотрим простейшую задачу. Пусть частица, способная двигаться только вдоль оси x , «заперта» в потенциальной яме шириной $2d$ с бесконечно высокими потенциальными стенками, т.е. $U = 0$ при $|x| \leq d$ и $U = \infty$ при $|x| \geq d$. Искомая Ψ -функция подчиняется простому уравнению (см. третье из уравнений (1))

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + k^2\Psi = 0, \quad k^2 = \frac{2m\varepsilon}{\hbar^2}. \quad (2)$$

Граничное условие в данном случае таково: $\psi = 0$ при $|x| = d$ (это нетрудно показать). Уравнению удовлетворяют и $\psi = \cos kx$ и $\psi = \sin kx$. Граничное условие выбирает допустимые значения k . Итак, при $|x| \leq d$

$$\begin{aligned} \psi_n^s &= A^s \cos kx, \quad kd = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi, \\ n &= 0, 1, 2, 3, \dots - \text{целые числа}, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\psi_n^a = A^a \sin kx, \quad kd = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

О значениях постоянных A^s и A^a скажем ниже, верхние индексы (s, a) отмечают тот факт, что косинус – симметричная функция, а синус – асимметричная. Разрешенные значения энергии частицы представляют две серии значений:

$$\begin{aligned} \epsilon_n^s &= \frac{\hbar}{2m} \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2}{d^2}, \\ n &= 0, 1, 2, 3, \dots - \text{целые числа}, \\ \epsilon_n^a &= \frac{\hbar^2}{2m} n^2 \frac{\pi^2}{d^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (26)$$

Как у электрона в атоме, у частицы в потенциальной яме есть основное состояние, наименьшее значение энергии в котором равно $\epsilon = \left(\hbar^2/(2m)\right)\pi^2/(4d^2)$. Отметим: частица не может «лечь на дно ямы» – энергия основного состояния отлична от нуля, при этом чем яма уже, тем энергия основного состояния больше.

И еще одну такую же простую задачу мы сформулируем, а решение оставим читателям для упражнения. Речь пойдет о прохождении через непреодолимый для классической частицы потенциальный барьер. По-прежнему будем считать, что частица может двигаться только вдоль оси x , а потенциальная энергия $U(x) = U_0 > 0$ при $|x| \leq d$ и $U = 0$ при $|x| \geq d$. Это и есть простейший потенциальный барьер. Во всяком случае, для частиц с энергией $\epsilon < U_0$. Итак, пусть на потенциальный барьер слева падает частица с волновым вектором k ($k = p/\hbar$, p – импульс, $p = p_x$). Решив задачу, вы убедитесь, что волновая функция слева от барьера будет суммой двух волн – падающей (волновой вектор k) и отраженной (волновой вектор $-k$); справа от барьера волновая функция – волна с волновым вектором k , уходящая от барьера. Получить этот результат и вычислить амплитуды прошедшей и отраженной волн можно, если выяснить, что представляет собой решение уравнения при $|x| \leq d$. Надо только добавить: при $x = \pm d$ функция $\psi(x)$ и ее производная $\partial\psi/dx$ непрерывны. И это условие тоже нетрудно вывести.

Что же такое Ψ -функция?

Значение открытия Шредингера не в том, что с помощью его уравнения были получены уже известные результаты. Фундаментально важно то, что они получены единообразно. Каждая задача – частный случай единой теории. Теория – волновая механика – предоставила естественную возможность двигаться вперед, формулировать новые задачи.

Один из важнейших результатов новой теории – возможность рассматривать системы, состоящие из нескольких частиц. Оказалось, что способ описания систем в волновой механике с помощью Ψ -функции существенно отличается от описания классических волн. Остановимся на этом вопросе. Это даст возможность осторожнее относиться к Ψ -функции, не переносить на нее буквально свойства классических волн. Кстати, напомним: полная волновая Ψ -функция всегда комплексна.

Нам предстоит сравнить описание движения двух классических частиц, двух классических волн и двух квантовых частиц.

Пусть *две классические частицы* 1 и 2 движутся в одном силовом поле, не взаимодействуя друг с другом (последнее – только для простоты). Каждая частица движется по своей траектории: $\vec{r}_1 = \vec{r}_1(t)$, $\vec{r}_2 = \vec{r}_2(t)$. Обе траектории – кривые (прямые – частный случай) в трехмерном пространстве.

Пусть есть *две классические волны* – например, радиоволна 1 и световая волна 2. Каждая из волн описывается своей функцией, своей зависимостью от времени и координат в пространстве: $\Phi_1 = \Phi_1(\vec{r}, t)$, $\Phi_2 = \Phi_2(\vec{r}, t)$. Как и траектории частиц, волны «существуют» в привычном нам трехмерном пространстве.

В обоих классических примерах движение двух объектов описывается двумя функциями. Они могут быть скалярными, векторными или более сложными. Так, электромагнитная волна распространяется в виде двух векторов. И все же в классическом описании есть притягательная наглядность: нечто движется в трехмерном мире.

Описание движения *двух квантовых частиц* устроено совершенно иначе и лишено наглядности. К сожалению, у нас нет возможности привести аргументы. Ограничимся только констатацией – утверждениями без объяснений. «Устроено» описание совсем не так, как описание двух классических волн: Ψ -функция двух частиц – функция семи переменных. Переменные – дважды по три координаты (x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2) и время t . Лучше сказать так: волновая функция двух частиц –

функция двух трехмерных радиусов-векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 и времени t , т.е. $\Psi = \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2; t)$.

Для описания поведения N частиц приходится использовать пространство размерности $3N$. Его называют *конфигурационным пространством*.

Давайте в этом месте остановимся и задумаемся. Известные нам способы описания движения классических объектов можно рассматривать как абстракцию чувственных восприятий. Действительно, траектория – просто след трассирующей пули. Сложнее с электромагнитной волной. Трудно себе сейчас представить, но для создания Максвеллом электродинамики, как теоретического описания результатов Фарадея, ему понадобились какие-то теперь всеми забытые шестеренки. Но волна в трехмерном пространстве сама по себе – прекрасный образ, заставляющий вспомнить зрительно наблюдаемые волны на поверхности воды или на натянутом канате.

С Ψ -функцией совсем иначе. Прежде всего, она комплексна. А когда с помощью Ψ -функции надо описать движение N частиц, то приходится прибегнуть к $3N$ -мерному пространству. О какой абстракции чувственного восприятия можно говорить?! Невозможно себе представить четырехмерное пространство. Описать можно пространство любого числа измерений, а представить – нет. Похоже, квантовая механика оперирует более абстрактными понятиями, чем классическая физика, а Ψ -функция более «удалена» от объекта, который она описывает, чем величины, используемые в классической (неквантовой) физике.

Вернемся к одной частице, чтобы понять, как с помощью Ψ -функции можно получить информацию, допускающую сравнение с экспериментом.

В классической механике *состояние* одной частицы описывается двумя векторами: радиусом-вектором \vec{r} и импульсом \vec{p} . Величины, характеризующие состояние, могут быть непосредственно измерены⁶. Задача теории (классической механики) указать, каковы значения \vec{r} и \vec{p} . Есть непосредственная возможность сравнить с экспериментом величины, определяющие состояние.

Состояние электромагнитной волны характеризуется значениями амплитуд волн электрического и магнитного полей в

⁶ Мы не останавливаемся на том, как происходит измерение. Измерение – сложная самостоятельная задача. Нам важно здесь подчеркнуть, что измерить координату и импульс частицы можно.

любой момент времени t . И они могут быть измерены. Можно измерить такие волновые характеристики, как частота и длина волны. Электромагнитная волна может быть полностью восстановлена, а результат можно сравнить с теорией.

Ψ -функция, несомненно, описывает *частицу*. Когда речь идет об электроне, то о частице (именно, как о частице!) многое хорошо известно: заряд, масса. Никто никогда не встречался с порцией заряда, меньшей заряда электрона. И масса и заряд электрона непосредственно измерены.

Состояние частицы в квантовой механике описывает Ψ -функция – это один из постулатов квантовой механики. Более того, слова *состояние* и Ψ -*функция* – синонимы. Согласившись с этим, мы имеем право задать такие вопросы:

Что конкретно мы знаем о частице, если нам известна ее Ψ -функция?

Какие величины, входящие в Ψ -функцию, можно сравнить с результатами опытов?

Нет приборов, с помощью которых можно непосредственно измерить Ψ -функцию. Нужен способ, позволяющий извлечь необходимую информацию. Каков он? Способ должен быть достаточно общим. Иначе с каждой новой задачей физику придется изобретать новый способ. В частности, именно этого и хотели избежать творцы квантовой механики.

Ответить на заданные вопросы помогут примеры, осмыслив которые мы сформулируем алгоритм, пригодный для любых задач.

Обратимся сначала к задаче о частице в потенциальной яме (мы об этом уже говорили). Пусть известно, что волновая функция частицы есть $\psi_0 = A^s \cos kx$, а $kd = (1/2)\pi$, т.е. $n = 0$. Очевидно, энергия частицы в этом состоянии имеет значение $\epsilon_0^s = (\hbar^2/(2m))\pi^2/(4d^2)$. Если бы мы сумели измерить энергию частицы, отсчитанную от дна потенциальной ямы, то несомненно получили бы именно это значение. А если бы измерили частоту, излучаемую частицей при переходах из состояния с большей энергией в состояние с меньшей, то наверняка бы обнаружили, что квант энергии $\hbar\omega$ равен разности двух значений энергии из выписанных выше формул. Хотя обычно в реальных экспериментах с атомными и субатомными частицами имеют дело с большими коллективами частиц, в данном случае нет никаких сомнений, что каждый отдельный электрон в потенциальной яме будет иметь тот самый спектр значений энергии, который указан формулами (2). Эксперимент можно проводить со многими

частицами или повторять много раз. Результаты (скажем, спектр излучения) будут тождественны.

А что еще известно о частице в потенциальной яме, доступное сравнению с экспериментом? Пожалуй, ничего. По крайней мере, пока... И скажем откровенно, в понимании Ψ -функции мы совсем не продвинулись. Ведь для того чтобы получить нужное значение энергии, и было сформулировано Шредингером уравнение для непонятно что из себя представляющей Ψ -функции.

Вернемся к постановке задачи о частице в яме. Теперь обратимся к первому из уравнений (1). Мы видим, что наша задача состоит в том, чтобы найти собственные функции оператора Гамильтона и его собственные значения. Формулы (2) решают эту задачу. Запомним этот факт в более абстрактной формулировке:

Когда Ψ -функция – собственная функция оператора физической величины, то собственное значение, соответствующее этой функции, это значение физической величины частицы, состояние которой – данная Ψ -функция.

Мы подчеркиваем этот факт вторично. Первый раз, когда ввели оператор импульса.

Теперь задумаемся над результатом той задачи, которую я предложил вам в виде упражнения, – о прохождении частицей потенциального барьера. По условию задачи волна, описывающая движение частицы, приближается слева к барьеру, частично отражается от него, а частично проходит через барьер и движется от него вправо. Таким образом, вне барьера есть три волны. Все они описывают движение частицы (частицы, а не частиц!) с определенным импульсом. Справа от барьера Ψ -функция описывает состояние частицы с импульсом, равным $\hbar k$, как и падающая на барьер волна. А вот Ψ -функция, отразившаяся от барьера, описывает частицу с импульсом $-\hbar k$. Можно ли проверить это странное утверждение? И да и нет.

Если направить *одну* частицу на барьер и попытаться обнаружить эту частицу за барьером летящей от него, то результат предсказать нельзя: иногда частица будет обнаружена, иногда не будет. То же самое – при попытке обнаружить частицу, отразившуюся от барьера: иногда будет обнаружена, иногда нет. При повторении эксперимента два-три раза никакая закономерность не проявится. А если повторять эксперимент многократно, закономерность начнет проявляться: чем больше амплитуда прошедшей волны, тем чаще будут обнаруживаться частицы справа от барьера; чем больше амплитуда отраженной

волны, тем чаще будут зафиксированы частицы, отразившиеся от барьера.

Выше описан мысленный эксперимент. Но вот описание вполне реального опыта – дифракции электронов на кристалле. Вспомните – этот эксперимент служит (с опозданием, правда) несомненным доказательством предположения де Бройля.

Рассмотрим рассеяние электронов на кристаллической решетке внимательно, наблюдая за каждым электроном. Обнаружение электрона, отразившегося от кристалла, проявляется в появлении на фотопластине маленького пятнышка. Размер пятнышка определяется величиной зерна фотопластинки. Чем зерно меньше, тем меньше пятнышко. Есть уверенность: имей мы пластинку с бесконечно малым зерном, мы убедились бы, что электрон обнаруживает себя во вполне *определенной точке* пространства. Положение точки случайно. При повторении опыта электрон – точка на пластинке – появляется то в одном случайном месте, то в другом. Ничего похожего на дифракцию.

Наблюдая за отражением большого числа электронов (последовательно или одновременно – безразлично), убедимся: каждый отдельный электрон засвечивает фотопластинку в совершенно случайном месте, но при большом числе электронов, засветивших пластинку, вырисовывается дифракционная картина, на ней отчетливо различимы места скопления точек (туда попало много электронов) и места, куда электроны не попали вовсе. Дифракционная картина очень похожа на ту, которая наблюдается при рассеянии рентгеновских лучей.

Так же, как в случае прохождения частицы через потенциальный барьер, теория рассеяния электронов на кристалле строится путем решения уравнения Шредингера для *одного* электрона, но при этом правильно описывает результаты опыта со многими электронами. Мы начинаем понимать, что в Ψ -функции скрыта информация, относящаяся не к одному электрону, а к ансамблю электронов.

Макс Борн (1882–1970) в том же 1926 году, когда Эрвин Шредингер сформулировал свое уравнение, высказал идею о смысле волновой функции. Он понял, что величина $|\Psi|^2 dx$ определяет *вероятность* попадания частицы в состоянии $\Psi(x, t)$ в интервал dx между точками x и $x + dx$. Если Ψ -функция – функция радиуса-вектора \vec{r} , то $|\Psi(\vec{r})|dV$ определяет вероятность попадания частицы в элемент объема $dV = dx dy dz$ вокруг точки с координатами x, y, z ; $|\Psi|^2$ – квадрат модуля комплексно-

го числа Ψ , $|\Psi|^2 = \Psi * \Psi$, звездочка ($*$) означает комплексное сопряжение. Надо подчеркнуть, что для стационарных задач $|\Psi|^2$ не зависит от времени.

Максу Борну принадлежат и другие фундаментальные работы по квантовой механике. В 1954 году он был удостоен Нобелевской премии по физике с простой и выразительной формулировкой: «За работы по квантовой механике».

В нашем изложении первое нетривиальное следствие идеи Борна – возможность определить константы A^s и A^a у волновых функций частицы в потенциальной яме. Условие их определения таково: вероятность обнаружить частицу в потенциальной яме должна быть равна единице. Ведь частица там есть! Нарисуем функции $|\psi_n^s(x)|^2$ и $|\psi_n^a(x)|^2$, а значения констант A^s и A^a выберем так, чтобы площадь под кривыми равнялась единице. Условие будет выполнено. В данном случае $A^s = A^a = \sqrt{1/d}$ для всех значений n . Напомним, что ширина потенциальной ямы равна $2d$.

Пытаясь проверить утверждение Борна о смысле Ψ -функции на примере частицы, находящейся в *определённом* состоянии внутри ямы, мы вынуждены были бы иметь дело с ансамблем тождественных объектов. Одинокое измерение, как и в случаях, рассмотренных раньше, дало бы совершенно случайный результат.

Описание волновой механики Шредингера мы начинали с рассмотрения свободной частицы, волновая функция которой – плоская волна. Но для плоской волны $|\Psi(\vec{r})|^2$ есть константа, т.е. вовсе не зависит от координаты. Это значит, что свободную частицу с равной вероятностью можно обнаружить в любой точке пространства. Напомним: импульс у нее имеет вполне определенное значение.



Макс Борн

Соотношения неопределенностей

Создан строгий математический аппарат квантовой механики. Он хорошо разработан и позволяет решить (в принципе, конечно) любую задачу, которая относится к «ведомству» квантовой механики. Самое точное решение не позволяет выйти за пределы вероятностного, статистического подхода. Поэтому полученные в результате ответы, как правило, относятся к большому числу частиц, к ансамблям частиц, а не к отдельным изолированным частицам.

Еще один поясняющий пример. Предположим, мы хотим решить задачу о столкновении двух частиц. В нашем макроскопическом мире такое грустное событие, как столкновение (например, дорожное происшествие), может быть рассмотрено с любой степенью подробности. Каждый из нас знает, с какой дотошностью представители дорожной милиции изучают следы, чтобы нарисовать траектории столкнувшихся машин. В квантовой механике такой подход принципиально невозможен хотя бы потому, что микрочастица не движется по траектории. Ее движение описывается Ψ -функцией. Некоторые характеристики столкновения достоверны. Как правило, те, которые являются следствием законов сохранения энергии и импульса.

Описание столкновений в достоверных терминах называют *кинематическим* описанием. Кинематического описания столкновения недостаточно. Необходимо знать, как часто (или как редко) происходят столкновения. Квантовая теория дает возможность вычислить вероятность столкновения с тем или другим исходом, разрешенным кинематикой столкновения. Мерой вероятности служит величина размерности площади, именуемая *эффективным сечением рассеяния*. По величине этого сечения физики, занятые исследованием столкновений в мире микрочастиц, ясно представляют себе, имеют они дело с редким, трудно наблюдаемым явлением или с явлением, легко доступным обнаружению.

Мы уже говорили, что когда Ψ -функция – собственная функция оператора физической величины, то собственное значение, соответствующее этой функции, есть значение данной физической величины. Позволяет ли квантовая механика выяснить, каковы будут результаты измерения физической величины в том случае, когда Ψ -функция не есть собственная функция оператора физической величины, которая нас интересует? Однозначный ответ получить нельзя. Но можно выяснить, какие значения будут получаться при измерении и с какой вероятностью.

Общее правило требует разложить Ψ -функцию по собственным функциям оператора той физической величины, значения которой мы измеряем.⁷ Квадрат модуля коэффициента при собственной функции, соответствующей определенному значению физической величины, пропорционален вероятности получить при измерении именно это значение физической величины.

Для определенности повторим сказанное на примере измерения импульса. Мы знаем, что из себя представляет оператор импульса и каковы собственные функции этого оператора (собственные функции оператора импульса – плоские волны). Какие значения импульса \vec{p} и с какими вероятностями мы получим при измерении импульса электрона, находящегося в потенциальной яме, или электрона в атоме водорода? Для получения ответа надо разложить Ψ -функцию по плоским волнам. Коэффициент разложения зависит от импульса \vec{p} , а квадрат его модуля пропорционален вероятности того, что измеренное значение окажется равным \vec{p} .

Один из фундаментальных результатов квантовой механики – выявление факта существования пар физических величин, которые не могут одновременно иметь точные значения. Естественно, обе они описывают движение одной частицы. Называют их *сопряженными величинами*. С одной парой мы уже встретились – это импульс и координата. Если частица имеет определенное значение импульса, то, как мы видели, ее координата полностью не определена. Существуют соотношения – *соотношения неопределенностей*, указывающие максимально возможную степень точности пары значений сопряженных величин. Сформулируем соотношение неопределенностей для x и p_x . Пару составляют проекции радиуса-вектора \vec{r} и импульса \vec{p} на одну ось. Знание вероятностей значений физических величин позволяет определить их средние значения. Обозначать средние значения будем и большими буквами и угловыми скобками (и так и так).

Пусть частица находится в каком-то состоянии, а X и P_x – средние значения ее координаты и проекции импульса. Мерой *неопределенностей* координаты x и проекции импульса p_x

⁷ Разложение по собственным функциям напоминает разложение произвольного вектора \vec{A} в трехмерном пространстве по трем ортогональным ортам $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$: $\vec{A} = (An_1)\vec{n}_1 + (An_2)\vec{n}_2 + (An_3)\vec{n}_3$. Роль ортов играют собственные функции. Важное свойство оператора любой физической величины состоит в том, что собственных функций всегда хватает для разложения.

могут служить *следующие* средние величины:

$$\delta x = \sqrt{\langle (x - X)^2 \rangle}, \quad \delta p_x = \sqrt{\langle (p_x - P_x)^2 \rangle}.$$

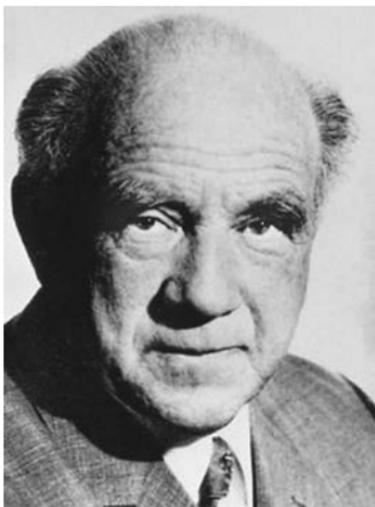
Соотношение неопределенностей утверждает:

$$\delta x \delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (3)$$

Наименьшее, *непреодолимое* значение произведения неопределенностей равно $\hbar/2$.

Важное следствие соотношений неопределенностей – нулевые колебания, о которых мы упоминали. Если бы энергия осциллятора равнялась нулю, то это означало бы, что его импульс и координата (оба) равны нулю, что невозможно. По той же причине в основном состоянии электрон в атоме водорода имеет конечную энергию. Объяснение многих характерных квантовых явлений основано именно на соотношениях неопределенностей.

Неравенство (3) вывел Вернер Гейзенберг в 1927 году. В том же году Нильс Бор сформулировал *принцип дополнительности*, согласно которому у *любой* физической величины есть дополнительная – компонента пары, которая не может быть точно определена вместе с ней. Соотношения неопределенностей (типа (3)) являются математическим выражением принципа дополнительности, который сыграл важную роль в понимании структуры квантовой механики.



Вернер Гейзенберг

Вероятностный, статистический характер предсказаний квантовой механики озадачивал и озадачивает многих. Очень трудно себе представить, что ответ на поставленный вопрос о поведении микрочастицы – ответ максимально возможной определенности – содержит лишь вероятность того, что произойдет, а не точное предсказание результата. Трудно привыкнуть к тому, что для экспериментальной проверки теории, построенной на основании уравнения, описывающего движение *одной* частицы, экспериментировать в большин-

стве случаев необходимо не с одной частицей, а с ансамблем частиц.

Дополнительность, статистический характер описания объектов микромира, как и отказ от наглядности, – все это с трудом преодолевалось не только рядовыми физиками, но и самими создателями квантовой механики.⁸ Тот факт, что решение многих задач квантовой механики не заканчивается решением ее фундаментальных уравнений, а требует «перевода» на язык, принятый в классической физике, и невозможен без использования статистического подхода, до настоящего времени у некоторых вызывает неудовлетворенность. Из-за этого до сих пор продолжаются поиски улучшения аппарата квантовой механики. Попыток было много, но ни одна не была успешной.

Иногда можно прочесть, что квантовая механика противоречит принципу причинности, детерминизму. Обычно выражаются осторожнее – механическому детерминизму. Но и это не так. Согласно уравнению Шредингера, состояние развивается вполне детерминированно: изменение движения обусловлено действием сил, а реакция частицы и системы частиц никогда не опережает причину.

Большинство физиков-теоретиков считают нерелятивистскую квантовую механику идейно завершенной, логически безупречной наукой. На протяжении уже многих десятков лет она служит надежной основой понимания свойств не только атомов и молекул, но и разнообразных макроскопических систем: твердых тел, жидкостей, плазмы...

Как физика описывает явления, происходящие в природе, а также свойства макроскопических тел – отдельная серьезная тема. Нерелятивистская квантовая механика – одна из тех базовых наук, которые служат основой описания для других дисциплин. Как всякая математизированная наука, квантовая механика требует строгой постановки и применима отнюдь не ко всему на свете. К сожалению, на объектах материального мира нет каких-либо меток – указаний, какой теорией надо (можно)

⁸ В статье 1953 года Макс Борн убеждает Эрвина Шредингера (!), что без использования теории вероятности при описании свойств атомных и субатомных частиц обойтись невозможно, а в некрологе 1961 года возвращается к этому вопросу. Очевидно, один из создателей квантовой механики ушел из жизни, так и не признав полностью «окончателюность» ее структуры. То, что подобные сомнения не покидали Альберта Эйнштейна до конца жизни, я знал, а с точкой зрения Шредингера познакомился, когда писал эту статью.

пользоваться при описании их свойств или при объяснении происходящих с ними явлений. Одно из важнейших качеств опытного физика – *умение до понимания* свойства и/или явления *почувствовать*, на базе какой теории надо искать понимание. На этом этапе возможны неожиданности. Накоплен огромный опыт и понято множество явлений и свойств на основе нерелятивистской квантовой механики. Она так зарекомендовала себя, что успешно используется даже в инженерной практике – при создании различных приборов и устройств.

Принцип соответствия

Если бы «сражения» революций естествознания нуждались в знаменах, то на знамени релятивистской революции красовалась бы скорость света c , а на знамени квантовой революции – постоянная Планка \hbar . Для перехода от новой механики Эйнштейна к старой классической механике Ньютона надо устремить скорость света к бесконечности. Фактически пренебрегают высокими степенями отношения v/c , где v – скорость частицы (тела).

От квантовой механики к механике Ньютона можно перейти, если приравнять \hbar нулю. Вот – пример. При $\hbar = 0$ исчезает туннельный эффект. Потенциальный барьер становится непрозрачным для частиц, если их энергия меньше его высоты. Решив ранее предложенную мной задачу, вы в этом убедитесь. Так и должно быть по законам классической механики.

Но не всегда переход так прост. В выражении для дискретных уровней энергии электрона в атоме водорода постоянная Планка \hbar стоит в знаменателе. Нет возможности просто положить ее равной нулю. Рассмотрим этот случай подробнее.

Чтобы не возвращаться к началу статьи, выпишем еще раз формулу Бора:

$$E_n = -\frac{e^2}{2a_n} = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}, \quad n = 1, 2, 3\dots$$

При классическом подходе электрон, движущийся вокруг протона, может иметь любую энергию $E < 0$ (напомним: потенциальную энергию на бесконечности мы выбрали равной нулю). При переходе к классическому пределу должна исчезнуть дискретность уровней, т.е. при произвольном n отношение

$$\frac{\Delta E}{|E|} = \frac{E_{n+1} - E_n}{|E_n|}$$

должно обратиться в ноль при $\hbar = 0$. Согласно формуле Бора,

$\Delta E/E = (2n + 1)/(n + 1)^2$. Как перейти к пределу? Надо выразить n через E , а *потом* устремить \hbar к нулю. Нетрудно убедиться, что $\Delta E/|E|$ в пределе действительно обращается в ноль.

Обязательность предельного перехода от квантовой механики при $\hbar = 0$ к классической носит название *принципа соответствия*. Когда речь идет о соответствии формул, встречающиеся трудности чаще всего похожи на ту, которая возникла с формулой Бора, и легко преодолимы. Иногда приходится вспомнить, что формула описывает чисто квантовый эффект, а классической формулы нет вовсе, не с чем сравнивать.

Иногда принцип соответствия используют менее радикально – как метод вывода приближенных формул в условиях, когда действие $I \gg \hbar$. Тогда принцип соответствия используется для приближенного решения квантовой задачи. Слова «принцип соответствия» заменяют словами «квазиклассическое приближение». Используя квазиклассическое приближение, приравнивают классическое значение действия целому числу постоянных Планка: $I = n\hbar$, $n \gg 1$. Из равенства $I = n\hbar$ следует, что расстояние между соседними уровнями равно $\Delta E = \hbar\omega$, где в *данном случае* $\omega = 2\pi/T_{\text{кл}}$, а $T_{\text{кл}}$ – период движения частицы по классической траектории.

Квазиклассическое приближение часто весьма облегчает решение задач. Содержащуюся в волновой функции информацию формулируют в терминах классической физики. Без этого невозможно сравнение теории с экспериментом. Можно сказать иначе: квантовая механика не может обойтись без классической. Все это весьма осложняет «взаимоотношение» между квантовой механикой и классической. Аккуратный анализ предельного перехода от квантовой механики к классической – непростая задача, не будем на ней останавливаться.

Заключительные замечания

Заканчивается рассказ о том, как описывают свойства объектов микромира. Заглавие статьи по существу содержит не вопрос, а ответ: *свойства микрочастиц описывает квантовая механика*. Существуют разные способы построения квантовой механики. Мы избрали самый доступный для изложения вариант, так как он позволяет познакомиться с описанием движения объектов микромира, не привлекая весь математический аппарат квантовой теории. Много, правда, не объяснено, а лишь обозначено. Понять квантовую механику так, чтобы самому решать задачи, научно-популярной статьи недостаточно. Чтобы освоиться в квантовой механике, необходимо изучить весь

ее математический аппарат, привыкнуть к нему. Последнее возможно, если использовать квантовую механику в своей практической деятельности.

Наибольшая трудность квантовой механики – непредставимость основного объекта, для описания которого она создана. Этот объект – *микрочастица*.

Что есть частица? Утверждение о корпускулярно-волновом дуализме, т.е. о корпускулярно-волновой двойственности, ничего не разъясняет. Как ни называй, но ведь частицы ведут себя по-разному: *то* как волны, *то* как частицы. И *представить* себе я этого не могу. Лев Давидович Ландау (1908–1968, Нобелевская премия 1962 г.) утверждал, что огромное достижение – понимать, не представляя. Можно сказать и так. Много раз я повторял это высказывание с некой гордостью за физиков и физику. Гордость, несомненно, звучит и в словах Ландау. Но в этот раз я неожиданно подумал: ведь можно иначе поставить ударение, признав, что нам не *хватает* воображения: «Понять можем, а *представить* – нет». Интуитивный этап творчества для большинства невозможен без наглядного образа. Решение каждой задачи – пример пусть иногда довольно примитивного, но все же творчества. И мы все знаем, как помогает наглядность. Может быть, я несколько преувеличиваю, но о себе я знаю это точно.

Непредставимость основных понятий заставляет создавать разнообразные наглядные образы. Атом изображают то в виде солнечной системы, рисуя орбиты, которых нет; то в виде атомного ядра, окруженного странно анизотропной атмосферой; а иногда просто в виде шарика. Одно изображение удобно в одном случае, другие – в других. Все картинки играют лишь вспомогательную роль. И все имеют мало общего с атомом, каков он есть, согласно квантовой механике. Атом – конструкция. Ядро и окружающие его электроны – его составные части. Если не вдаваться в подробности, не пытаться уточнять свои представления, то «картинка» сама возникает: ядро, окруженное электронами.

А вот электрон я действительно не могу себе представить...

Я благодарен Льву Ильичу Розоноэру за несколько ценных замечаний. Они были учтены в окончательном тексте статьи.

Введение

В статье «Как квантовая механика описывает микромир» рассказывалось о фундаментальном уравнении квантовой механики – уравнении Шредингера – и с его помощью рассматривалась задача поведения частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме. В предлагаемой вниманию читателей публикации главное внимание будет уделено решению нескольких сравнительно простых задач, которые подобраны так, чтобы продемонстрировать необычность поведения микрочастиц по сравнению с макроскопическими телами. Из соображений простоты мы ограничимся только одномерными задачами.

Предлагаемые задачи, как правило, не могут претендовать на описание какого-то реального физического явления. Но они могут помочь понять реальные явления, достойные называться *квантовыми чудесами*.

Частица или волна? Одна или много?

Наибольшей психологической трудностью квантовой механики считается непредставимость основного объекта, для описания движения которого она создана. То частица проявляет свои волновые свойства, то корпускулярные. Математический аппарат квантовой механики устроен так, что, решая любую физическую задачу, можно пользоваться общими приемами, позволяющими строго сформулировать математическую задачу, а для решения задачи нет необходимости *предполагать заранее*, какую черту поведения микроскопической частицы мы установим – вол-



новую или корпускулярную. Решив задачу, мы *поймем*, как квантовая механика описывает движение частицы. Поймем, даже если не сможем себе представить.

В данной статье строгая постановка задачи означает возможность записать уравнение Шредингера, установить необходимые граничные и начальные условия. Решение поставленной задачи состоит не только в нахождении Ψ -функции, удовлетворяющей уравнению Шредингера с начальными и граничными условиями, но и в вычислении интересующих нас физических величин. Будут решаться только такие задачи, где Ψ -функция описывает движение *одной* частицы под действием силы, не зависящей от времени. Однако конкретные физические результаты, которые «содержатся» в Ψ -функции одной частицы и которые можно сравнивать с результатами эксперимента, относятся не к одной частице, а к ансамблю, коллективу во всем подобных частиц.

Что же описывает уравнение Шредингера: движение одной частицы или многих частиц? Одной! Но чтобы воспользоваться полученными результатами, их нужно перевести на язык макроскопической, классической физики. Именно для этого необходим переход к ансамблю многих частиц.

Переход из микромира в макромир не проходит «безнаказанно»: меняется описание причинной связи между событиями. В макромире властвует обычный механический детерминизм. Во всяком случае, когда речь идет о движении одной частицы под действием заданной силы. Зная начальные условия, мы можем проследить движение частицы во все последующие моменты. Уточним: пусть при $t = 0$ известны координата x_0 и скорость v_0 частицы. Решив уравнение Ньютона (сила известна), мы найдем положение частицы в любой момент времени, т.е. функцию $x = x(t)$, равную x_0 при $t = 0$. Производная $dx(t)/dt$ есть скорость частицы $v(t)$. Естественно, когда $t = 0$, то $v = v_0$. Именно это утверждение и носит пышное название *механического детерминизма*.

Пусть не обманет вас слово «макромир». В макромире происходят разнообразные события, предсказать результаты которых абсолютно достоверно невозможно. Иногда это связано только с неполным знанием начальных условий. Классический пример – бросание кости. Если бы знать, но абсолютно точно(!), как бросить кубик, чтобы он выпал нужной гранью вверх, задача имела бы однозначное решение. А так надо довольствоваться оценкой вероятности того, что произойдет.

Бывает, и весьма часто, иначе: точно известна сила, приводящая макротело в движение, и известно, как будет двигаться тело

под действием этой силы. Но если тело движется, например, в воздухе или скользит по наклонной плоскости, то на тело, кроме известной силы, действуют также силы со стороны молекул воздуха или атомов того тела, по которому оно скользит. Конечно, описать во всех подробностях движение тела и всех частиц (воздуха, наклонной плоскости) невозможно. Обычно достаточно ограничиться усредненным описанием влияния окружающей среды с помощью силы трения или сопротивления атмосферы. Учитывая силу трения (сопротивления), описывать движение макроскопического тела можно вполне надежно, но важные черты движения при этом существенно изменяются.

Так, часть энергии тела из-за трения необратимо теряется, превращаясь в тепло, — исчезает обратимость. Обратимость уравнений механики — формальное следствие того, что они не изменяются при замене t на $-t$. Ускорение — вторая производная от координаты — при замене t на $-t$ не меняется. Сила же трения пропорциональна скорости тела — первой производной от координаты, которая при такой замене изменяется. Именно это обстоятельство и есть формальная причина потери обратимости.

В таком описании сил трения внимательный читатель ощутит непоследовательность. Каждая молекула воздуха или наклонной плоскости подчиняется тем же законам, что и само тело (сейчас речь не идет об изменениях, вносимых квантовой механикой). Почему же появляется необратимость? Это — весьма сложный вопрос. В основе ответа на него лежит явление диссипации, обусловленной переходом энергии от небольшого числа механических степеней свободы макроскопического тела к по сути бесконечному числу степеней свободы микроскопических частиц. Движение микрочастиц столь хаотично, что вероятность возвращения энергии обратно к телу равна нулю. По этому поводу говорят о необратимом запутывании, а более строгим языком — о росте *энтропии*, которая служит мерой беспорядка.

Вернемся к одной квантовой частице, движение которой описывается Ψ -функцией — решением уравнения Шредингера. Волновая функция — функция координат и времени. Задав начальное состояние, мы найдем вполне определенное решение $\Psi = \Psi(x, t)$. Казалось бы, вполне детерминированный процесс. Но, задав себе простейший вопрос о том, где находится частица в момент времени t , мы вынуждены ограничиться утверждением, что нам известна лишь вероятность нахождения частицы в интервале dx вокруг точки x , и вероятность эта равна $|\Psi(x, t)|^2 dx$. Подчеркнем: несомненно, речь идет об ансамбле частиц, а не об одной частице. Без ансамбля тождественных частиц понятие

вероятности теряет смысл. И дело не в неполноте знаний или во взаимодействии с большим количеством иных частиц. Вероятность – первичное понятие квантовой механики. Строгое рассмотрение показало, что добиться большей точности предсказаний нельзя, нельзя избежать использования вероятности при описании движения микроскопических частиц.

Корпускулярно-волновой дуализм квантовых частиц не только делает их движение очень непохожим на движение классических тел, но заставляет рассматривать поведение ансамбля частиц даже тогда, когда, казалось бы, уравнение описывает движение одной частицы. В этом состоит еще одна психологическая трудность понимания квантовой механики.

Траектория, стационарное состояние

Общее описание движения микроскопических частиц квантовой механикой убеждает нас: квантовые законы движения не похожи на классические. Но чтобы возникло ощущение чуда, появилось впечатление, что происходит нечто, чего «не может быть», необходимо рассмотреть примеры. Сделать наглядным отличие поведения квантовых микрочастиц от макроскопических тел можно, если четко представить движение классических макротел в условиях, точно совпадающих с условиями, в которых будет рассмотрено движение квантовых частиц. При описании движения классических тел и квантовых частиц мы постараемся использовать одинаковые термины – там, где это возможно.

В одномерном случае как-то неудобно говорить о *траектории*. Классическая частица в одномерном мире, конечно, всегда движется по прямой. Исчерпывающее описание движения частицы под действием внешней, не зависящей от времени силы $F = F(x)$ сводится к определению зависимости координаты частицы от времени – к нахождению функции $x = x(t)$. Полная информация о движении частицы содержится в этой функции. Скорость частицы равна $v(t) = dx(t)/dt$, импульс частицы (количество движения) есть $p(t) = mv(t)$.

Функция $x(t)$ – решение уравнения Ньютона. Из уравнения Ньютона следует *закон сохранения энергии*:

$$\varepsilon = \frac{mv^2}{2} + U(x) = \text{const}, \text{ или } \varepsilon = \frac{p^2}{2m} + U(x) = \text{const}. \quad (1)$$

Сила – производная, взятая с противоположным знаком, от потенциальной энергии: $F(x) = -\frac{dU(x)}{dx}$. Для понимания связи

уравнения Ньютона с законом сохранения энергии продифференцируйте первое из указанных равенств по времени, помня, что координата x зависит от времени t , и немедленно получите уравнение Ньютона:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F(x). \quad (1')$$

Мы будем рассматривать потенциальную энергию либо в виде потенциального барьера (рис.1), либо в виде потенциальной ямы (рис.2). На рисунках 1 и 2 показано также, как

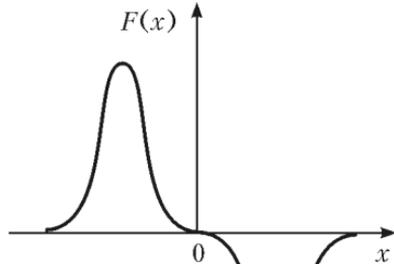
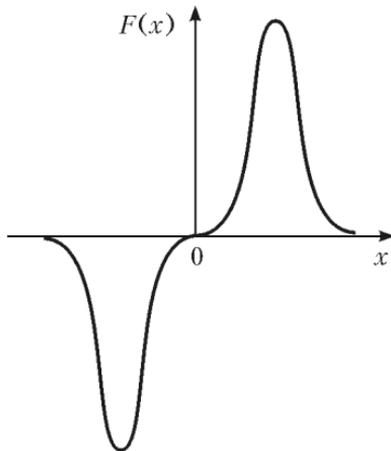
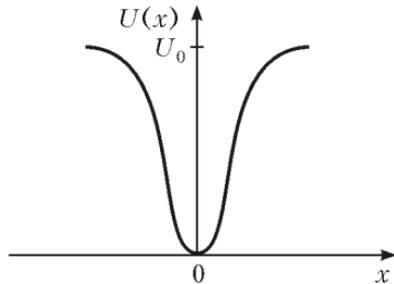
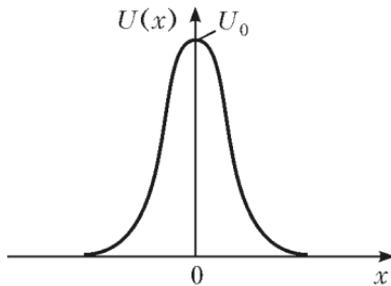


Рис.1. Потенциальный барьер

Рис.2. Потенциальная яма

выглядит сила, под действием которой ускоряется или замедляется частица.

Рисунок 3 изображает предельно упрощенный потенциальный барьер, а рисунок 4 – предельно упрощенную потенциальную яму. Это идеализация, конечно, но очень удобная для расчета. На всей оси x , кроме точек $x = \pm d$, сила равна нулю, а в точках $x = \pm d$ $F = \pm\infty$. Функция $F(x)$, равная нулю при всех значениях x , кроме $x = 0$, а при $x = 0$ равная бесконечности, это

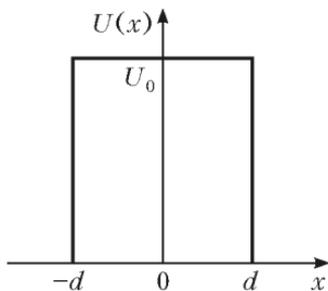


Рис.3. Упрощенный потенциальный барьер

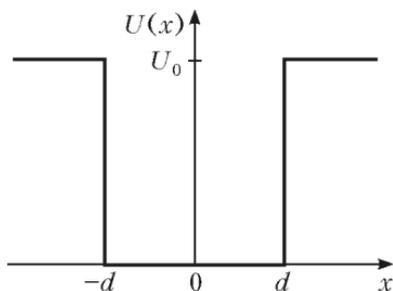


Рис.4. Упрощенная потенциальная яма

та самая дельта-функция Дирака, о которой говорилось в упомянутой ранее статье. Обозначается она так: $\delta(x)$. Таким образом, для прямоугольного барьера

$$F(x) = -U_0\delta(x+d) + U_0\delta(x-d), \quad (2)$$

а для прямоугольной ямы

$$F(x) = U_0\delta(x+d) - U_0\delta(x-d). \quad (2')$$

Уточним определение δ -функции: интеграл от $\delta(x)$ по интервалу, содержащему точку $x = 0$, равен единице.

В тех задачах, которые здесь обсуждаются, всегда и справа и слева с определенного расстояния до бесконечности потенциальная энергия есть ноль или константа. Уравнения (1) задают зависимость скорости v и импульса p от координаты x :

$$v = \sqrt{\frac{2(\epsilon - U(x))}{m}}, \quad p = \sqrt{2m(\epsilon - U(x))},$$

а из рисунков 1 и 2 видно, что расстояние от точки с координатой x на кривой $U = U(x)$ до прямой $\epsilon = \text{const}$ по вертикали равно кинетической энергии макрочастицы. При заданной потенциальной энергии значение энергии ϵ определяет характер движения. Так, согласно рисунку 1, частица с энергией, превышающей $\max U(x) = U_0$, движется беспрепятственно вдоль всей оси x , а частица с энергией $\epsilon < U_0$ движется только по полуоси: либо справа от потенциального барьера, либо слева. В случае потенциальной ямы различие еще более разительно: если $\epsilon > U_0$, то частица совершает инфинитное движение, т.е. где бы частица ни начала свое движение, она уйдет на бесконечность. При $\epsilon < U_0$ движение финитно: частица движется в пределах потенциальной ямы.

Зная, что предсказания квантовой механики могут быть проверены только в экспериментах с ансамблями частиц даже при рассмотрении движения одной частицы, выясним, как движение многих тождественных частиц описывается классической механикой.

Основными терминами для описания движения коллектива тождественных частиц служат плотность частиц n и плотность потока частиц \vec{j} . Заметим, что плотность потока частиц – это вектор. В трехмерном пространстве размерность плотности частиц есть см^{-3} , а плотности потока частиц есть $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. В одномерном случае n – это число частиц на единице длины, размерность n есть см^{-1} , а плотность потока частиц $j = vn$ – это число частиц, проходящих через точку в единицу времени, размерность j есть с^{-1} .

И n , и j – функции x и t . Между n и j есть связь, называемая *уравнением непрерывности*:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Здесь использованы традиционные обозначения: $\partial \dots / \partial t$ – производная по времени при постоянном значении координаты x , а $\partial \dots / \partial x$ – производная по координате при постоянном значении времени t . Для вывода уравнения непрерывности надо вычислить изменение числа частиц на интервале dx за время dt , обязанное различию плотности потока на концах интервала (число частиц на интервале dx равно $n dx$, а за время dt через любую точку проходит $j dt$ частиц). Уравнение непрерывности встречается всегда, когда плотность чего-либо изменяется в пространстве только за счет перемещения, а появление (рождение) или уничтожение (гибель) отсутствуют.

Уравнение непрерывности позволяет описать *стационарное состояние*. В классической механике, когда речь идет об одной частице, стационарное состояние как термин не употребляется. Если частица движется периодически, то говорят, что частица движется по стационарной траектории, подчеркивая, что траектория не изменяется со временем. Когда же речь идет об ансамбле тождественных частиц, стационарное состояние означает следующее. В понятие тождественности входят одинаковые начальные условия для всех частиц. Пусть в область, где на частицы действует сила, входит постоянный поток частиц плотностью $j = j_0$ с одной и той же для всех частиц энергией $\epsilon_0 = mv_0^2/2$. Вся картина движения потока частиц не зависит от времени – осуществляется *стационарное состояние*: плотность

потока не зависит от времени (произведение скорости v на плотность частиц n , равное плотности потока частиц j , не изменяется со временем). При этом скорость v зависит от координаты, как это следует из закона сохранения энергии, и, следовательно, плотность частиц зависит от координаты: $n = n(x)$. Там, где скорость больше, там плотность меньше, а где скорость меньше, там плотность больше – это хорошо известный эффект (например, часто наблюдаемое скопление автомашин на участках замедленного движения). Стационарное состояние легко обобщается на поток частиц с различными энергиями. Если пренебречь столкновениями, то каждая группа частиц с одной и той же начальной скоростью подчиняется уравнению непрерывности, и каждая, независимо от других, движется так, как описано выше.

Чтобы в дальнейшем подчеркнуть отличие поведения квантовых частиц в сравнении с классическими, отметим несколько очевидных фактов.

Какова бы ни была форма или высота потенциального барьера, классическая частица с энергией, меньшей высоты барьера, под барьер проникнуть не может. От барьера она отразится и со скоростью, равной по величине, но направленной противоположно первоначальной скорости, двинется от барьера. Поток тождественных частиц поведет себя так же. Если плотность потока частиц к барьеру обозначить j_+ , а плотность потока частиц от барьера обозначить j_- , то их отношение j_-/j_+ есть коэффициент отражения. Обозначим его буквой R , тогда для классических частиц $R = 1$.

Каковы бы ни были форма и размер потенциальной ямы, если энергия частицы меньше потенциальной энергии вне ямы, классическая частица будет двигаться от одной стенки к другой и покинуть яму не сможет. Ничто не запрещает частице неподвижно лежать на дне ямы. Период движения частицы в яме зависит от ее энергии. В прямоугольной яме шириной $2d$, изображенной на рисунке 4, период равен

$$T = \frac{4d}{\sqrt{2(\varepsilon - U_0)/m}}.$$

Совсем очевидный и уже отмеченный выше факт: классическая частица с энергией $\varepsilon > U(x)$ при любом значении координаты x движется свободно со скоростью, зависящей от координаты. Плотность потока частиц j при этом неизменна. Наконец, энергия классической частицы может иметь любое значение. Есть единственное ограничение: полная энергия ε должна быть

больше или равна потенциальной энергии $U(x)$. Иначе: энергетический спектр классической частицы непрерывен.

Уравнение Шредингера. Плотность потока...

Как Шредингер сформулировал уравнение, носящее теперь его имя, довольно подробно рассказано в упомянутой выше статье. Не повторяя сказанного, напомним только, что введение Ψ -функции послужило основой создания волновой механики. Сначала квантовую теорию в Шредингеровском варианте называли именно *волновой* механикой, подчеркивая волновые свойства атомных и субатомных частиц. Действительно, иногда понять квантовое явление легче, сравнивая движение квантовой частицы не с движением классической частицы, а с распространением волны, например электромагнитной.

Выпишем уравнения Шредингера для одномерного случая. Множественное число (уравнения) использовано потому, что мы выпишем два уравнения: нестационарное и стационарное. *Нестационарная* волновая функция в одномерном случае зависит от двух переменных – от координаты и от времени: $\Psi = \Psi(x, t)$, а *стационарная* волновая функция, тоже обозначаемая буквой Ψ , но меньших размеров, зависит только от координаты: $\Psi = \Psi(x)$. Для состояния частицы, энергия которой имеет определенное значение, стационарная волновая функция $\Psi(x)$ – это амплитуда в выражении для нестационарной волновой функции:

$$\Psi(x, t) = \exp\left(-\frac{i\epsilon t}{\hbar}\right)\Psi(x). \quad (4)$$

Итак, в одномерном случае нестационарное уравнение Шредингера имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U(x) \Psi \right), \quad (5)$$

а стационарное уравнение –

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (\epsilon - U(x)) \Psi = 0. \quad (6)$$

Эти дифференциальные уравнения должны быть дополнены граничными и начальными условиями, но об этом позже.

В цитированной статье (и, конечно, не только в ней) сказано, что выражение $\Psi\Psi^* dx$, где звездочка * обозначает комплексное сопряжение, есть вероятность обнаружить частицу в точке x при многократном осуществлении эксперимента, в котором частица движется так, как описывает Ψ -функция. Следовательно,

$\rho(x, t) = \Psi\Psi^* = |\Psi(x, t)|^2$ есть плотность вероятности обнаружить частицу в точке x в момент времени t . Если $\rho(x, t) \neq 0$ в небольшой области пространства, то напрашивается зрительный образ – *облако вероятности*. Несомненно, интересно и важно знать, как оно движется, каков его закон движения.

Вывести уравнение, описывающее изменение плотности вероятности $\rho(x, t)$, нетрудно. Для этого используются уравнение (5) для Ψ и аналогичное уравнение для Ψ^* . После соответствующих преобразований получится

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = 0, \quad j = \frac{i\hbar}{2m} \left(\Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} - \Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right). \quad (7)$$

Мы получили уравнение непрерывности. Естественно, здесь j – плотность потока. Но потока чего? Так как ρ – плотность вероятности, то j – *плотность потока вероятности*.

Удивительное дело: величины, с помощью которых можно только оценить вероятность того, попадет ли частица в данную точку пространства (ρ и j), с ходом времени изменяются в пространстве так, будто описывают движение газа частиц. Уравнение непрерывности показывает, что при движении вероятность не рождается и не исчезает, а только перемещается в пространстве. Если начальное состояние частицы таково, что она с достоверностью находится в какой-то области пространства, то с ходом времени может измениться область, где частицу можно обнаружить, но по-прежнему во всей доступной области частица с достоверностью находится.

Уравнение непрерывности (7) описывает закон сохранения частицы.

* * *

Уравнение Шредингера допускает постановку разных задач. С некоторыми из них вы встретитесь в этой статье и сможете познакомиться с явлениями, столь разительно отличающимися от поведения классических объектов, что их вполне можно назвать квантовыми чудесами.

Нет стен, через которые нельзя пройти

Французский писатель Марсель Эме написал роман «Человек, проходивший сквозь стены». Хорошая, ироничная, умная книга. Роман был экранизирован, и фильм получился вполне неплохой. Проходить через стены человеку помогала его вера в себя. Когда он терял веру, способность исчезала. Весьма нравоучительно...

Мы точно знаем, что, не разрушив стену, ни человек, ни любое другое макроскопическое тело пройти сквозь нее не может. А микроскопическая частица? Не будем спешить с ответом.

На рисунке 5 изображена потенциальная яма. Вне области $|x| < d$ частица находиться не может: при $|x| > d$ волновая функция $\psi(x, t) \equiv 0$. Это неизбежное следствие того, что $U(x) = \infty$ при $|x| > d$. По этой же причине квантовая микрочастица не может проникнуть через бесконечно высокий потенциальный барьер.

А если потенциальный барьер имеет конечную высоту? При энергии, превышающей высоту барьера, частица *может* пролететь над ним. Но обязательно ли иметь энергию, превышающую высоту барьера? И обязательно ли частица пролетит над барьером?

Квантовая механика меняет наши обычные представления: микроскопическая частица может проникнуть через недоступную классической частице область, т.е. пройти через стену, а может отразиться от барьера даже тогда, когда ее энергия превышает высоту барьера.

Вернемся к потенциальному барьеру, изображенному на рисунке 3: $U(x) = U_0 > 0$ при $|x| < d$, $U(x) = 0$ при $|x| > d$. Классическая частица с энергией $\epsilon < U_0$, долетев до барьера, отразится, а частица, имеющая энергию $\epsilon > U_0$, свободно перелетит область $|x| < d$. А как поведет себя квантовая частица?

Найдем состояния квантовой частицы (ее ψ -функцию) при различных значениях энергии ϵ . Для этого необходимо найти решение уравнения Шредингера. В квантовой механике, если частица движется под действием постоянной силы, имея определенную энергию, ее состояние называют *стационарным* – неважно, совершает частица финитное или инфинитное движение. Это состояние описывается стационарной волновой функцией, удовлетворяющей стационарному уравнению Шредингера.

В случае прямоугольного потенциального барьера это уравнение на разных участках оси имеет разный вид:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + \epsilon\psi = 0 \quad \text{при } |x| > d,$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + (\epsilon - U_0)\psi = 0 \quad \text{при } |x| < d.$$

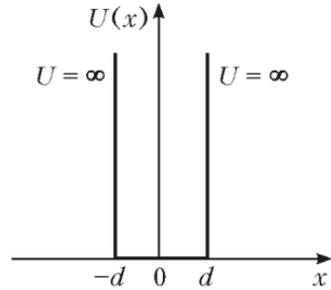


Рис.5. Бесконечно глубокая потенциальная яма

Слева и справа от барьера (при $|x| > d$) решениями уравнения являются две плоские волны $\exp(ik_e x)$ и $\exp(-ik_e x)$, где $k_e = \sqrt{2m\epsilon}/\hbar$ – волновой вектор. Одна волна движется к ступеньке, а другая – от нее. При $|x| < d$ характер решения зависит от величины энергии ϵ . Если $\epsilon > U_0$, то и в этом случае решения представляют плоские волны $\exp(ik_i x)$ и $\exp(-ik_i x)$ с волновым вектором $k_i = \sqrt{2m(\epsilon - U_0)}/\hbar$. Если $\epsilon < U_0$, то решения уравнения совсем не похожи на плоские волны. Это $\exp(\pm \kappa x)$, где $\kappa = \sqrt{2m(U_0 - \epsilon)}/\hbar$. Одна из функций на расстоянии $1/\kappa$ возрастает в $e \approx 2,718281828\dots$ раз, а другая во столько же раз уменьшается.¹

Существование двух решений в каждой из областей означает, что решений бесконечно много: любая линейная комбинация двух решений также есть решение. Необходимо понять, каким образом выбрать нужное решение и как следует «сшивать» волновую функцию при $x = -d$ и при $x = d$. Ответы на поставленные вопросы дает физический смысл Ψ -функции.

Плотность вероятности $\rho = |\Psi(x)|^2$ не исчезает, а только перемещается в пространстве согласно уравнению непрерывности. Плотность потока вероятности $f(x)$ содержит производные от Ψ -функции по координате x . Плотность вероятности ρ и плотность потока j по своему смыслу должны быть непрерывными функциями координаты. Поэтому при скачкообразном изменении потенциальной энергии на волновую Ψ -функцию и на ее производную $d\Psi/dx$ надо наложить условие непрерывности. Отсутствие скачков у Ψ и у $d\Psi/dx$ и формулирует условие «сшивки» Ψ -функции на разных участках.

Теперь можно обсудить выбор решений, который существенно зависит от постановки задачи. Сначала рассмотрим самый простой случай. Перенесем правый обрыв барьера на $+\infty$, а начало координат ($x = 0$) совместим с левым обрывом. В результате потенциальная энергия $U(x)$ будет представлять собой ступеньку высотой U_0 , занимающую полуось $x > 0$ (рис.6). Наша задача – найти состояния квантовой частицы при различных значениях энергии ϵ , для чего необходимо найти решения уравнений Шредингера при $x > 0$ и при $x < 0$, т.е. на

¹ Привел значение числа e с точностью до 9-го знака после запятой, чтобы поделиться с читателями мнемоническим правилом для запоминания этого числа. Число 2,7 надо знать, а дальше – дважды год рождения Льва Николаевича Толстого. Если кому-то это правило поможет запомнить год рождения Толстого – тоже неплохо.

двух полуосях. Эти уравнения имеют тот же самый вид, как и в случае прямоугольного барьера при $|x| > d$ и $|x| < d$.

Пусть $0 < \varepsilon < U_0$. Слева от ступеньки (при $x < 0$) решения уравнения – это две волны $\exp(ikx)$ и $\exp(-ikx)$, волновой вектор $k = \sqrt{2m\varepsilon}/\hbar$. Одна волна движется к ступеньке, а другая – от нее. Как ни странно, хотя энергия частицы ε меньше потенциальной энергии U_0 , нет формальных соображений, позволяющих считать, что $\psi(x) \equiv 0$ при $x > 0$. Мы уже отмечали, что решения совсем не похожи на плоские волны. Это $\exp(\pm \kappa x)$, где $\kappa = \sqrt{2m(U_0 - \varepsilon)}/\hbar$. Решение, экспоненциально растущее с ростом координаты, заведомо не подходит: на любом даже маленьком интервале, достаточно удаленном от ступеньки (при достаточно больших значениях координаты x , ведь $x \rightarrow \infty$), вероятность обнаружить частицу превысит единицу, чего быть не может. Годится только затухающее с ростом x решение:

$$\psi(x) = b \exp(-\kappa x) \text{ при } x > 0 \text{ и } \varepsilon < U_0.$$

Движущаяся слева к ступеньке частица описывается волновой функцией $\exp(ikx)$. Интуиция подсказывает, что частица может (скорее, даже должна) отразиться от ступеньки, ведь ее энергия по предположению меньше высоты ступеньки. Значит, ψ -функция – сумма падающей волны и волны отраженной, т.е.

$$\psi(x) = \exp(ikx) + a \exp(-ikx) \text{ при } x < 0.$$

Постоянные множители a и b надо найти из условий «сшивки» (коэффициент при экспоненте у волны, падающей на ступеньку, выбран равным единице для удобства, физический смысл имеет квадрат отношения амплитуд падающей и отраженной волн). Эти условия (отсутствие скачков у ψ и у $d\psi/dx$ при $x = 0$) приводят к системе уравнений

$$1 + a = b, \quad ik(1 - a) = -\kappa b.$$

Отсюда

$$a = \frac{1 - i\kappa/k}{1 + i\kappa/k} = \frac{1 - i\sqrt{(U_0 - \varepsilon)}/\varepsilon}{1 + i\sqrt{(U_0 - \varepsilon)}/\varepsilon},$$

$$b = \frac{2}{1 + i\sqrt{(U_0 - \varepsilon)}/\varepsilon}.$$

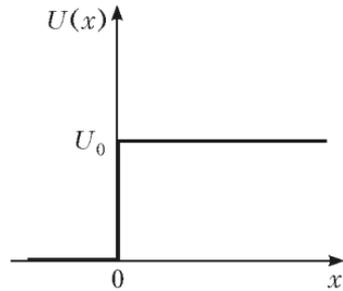


Рис.б. Ступенька

По принятой в квантовой механике трактовке полученного результата величина $R = |a|^2$ — это коэффициент отражения, т.е. отношение плотности потока вероятности, направленного от ступеньки, к плотности потока, направленного к ступеньке. А если вспомнить, что сравнение полученных теоретических формул с экспериментом требует ансамбля тождественных частиц в одинаковых условиях, то можно считать, что коэффициент отражения R есть отношение плотности потока частиц, отраженных от ступеньки, к плотности потока частиц, двигающихся слева направо к ступеньке.

На первый взгляд получилось нечто странное. Коэффициент отражения от ступеньки $R = 1$, так как множитель a равен отношению комплексно сопряженных величин. А в то же время $b \neq 0$, значит, вероятность обнаружить частицу правее ступеньки отлична от нуля. Что-то тут не так? Нет, все правильно. Ошибки нет. Отсутствие противоречия подтверждается тем, что плотность потока вероятности $j = 0$ при $x \geq 0$. Убедитесь в этом.

Ясно, что проникновение частиц в область, где полная энергия меньше потенциальной, сугубо квантовое явление — проявление волновых свойств микроскопических частиц.

Теперь рассмотрим частицу, летящую к ступеньке по-прежнему слева, но с энергией $\varepsilon > U_0$. Классическая частица, замедлив свой полет, беспрепятственно преодолет ступеньку. Посмотрим, что произойдет с квантовой частицей.

И при $x > 0$, и при $x < 0$ уравнения Шредингера имеют решения в виде плоских волн, правда с разными волновыми векторами. На каждой из полуосей есть по две волны, распространяющиеся в противоположные стороны. Однако нет никаких оснований считать, что справа от ступеньки есть волна, распространяющаяся справа налево. Это означало бы, что бегущая направо волна от чего-то отразилась. Не от чего. А есть ли бегущая налево волна при $x < 0$, покажет условие «сшивки».

Итак, при $\varepsilon > U_0$

$$\psi(x) = \exp(ik_1x) + a \exp(-ik_1x), \quad k_1 = \sqrt{2m\varepsilon}/\hbar \quad \text{при } x < 0,$$

$$\psi(x) = b \exp(ik_2x), \quad k_2 = \sqrt{2m(\varepsilon - U_0)}/\hbar \quad \text{при } x > 0.$$

Из условий «сшивки» немедленно находим значения амплитуд a и b . Да, $a \neq 0$. Значит, отличен от нуля и коэффициент отражения

$$R = \frac{(k_1 - k_2)^2}{(k_1 + k_2)^2}.$$

Коэффициент отражения R меньше единицы, а коэффициент

прохождения равен $D = 1 - R$. Любопытно, что R не зависит от направления полета частицы. Квантовая частица с энергией $\epsilon > U_0$, откуда бы она ни летела, отражается от ступеньки с одной и той же вероятностью. Обратите внимание: $D \neq |b|^2$, и попытайтесь объяснить, почему.

С ростом энергии ϵ коэффициент отражения R уменьшается и при стремлении ϵ к бесконечности стремится к нулю. По какому закону R обращается в ноль, вы легко определите самостоятельно. При $\epsilon = U_0$ коэффициент отражения R обращается в единицу и, как мы знаем, остается равным единице при любом значении энергии $\epsilon < U_0$.

Итак, квантовая частица может проникать в область, где $\epsilon < U_0$, и отражается от ступеньки, даже если $\epsilon > U_0$. А что произойдет, если на пути частицы стена – барьер конечной высоты и конечной ширины? Для ответа на этот вопрос надо вернуться к задаче с прямоугольным потенциальным барьером.

Мы уже понимаем, что при $x < -d$ волновая функция частицы – это сумма двух волн, падающей и отраженной. Амплитуду падающей волны снова примем равной единице, а амплитуду отраженной волны по традиции обозначим буквой a . Их волновые векторы противоположны по знаку, а по модулю равны $k = \sqrt{2m\epsilon}/\hbar$. За барьером (при $x > d$) есть только одна волна с тем же волновым вектором:

$$\psi = f \exp(ikx) \text{ при } x > d.$$

Вне зависимости от соотношения между ϵ и U_0 нет никаких оснований в области $|x| < d$ отбрасывать ни экспоненциально возрастающее решение при $\epsilon < U_0$, ни волну, бегущую справа налево с действительным волновым вектором k_1 . Так что при $|x| < d$

$$\psi = b_1 \exp(\kappa x) + b_2 \exp(-\kappa x), \quad \kappa = \sqrt{2m(U_0 - \epsilon)}/\hbar, \quad \epsilon < U_0,$$

$$\psi = b_1 \exp(ik_1 x) + b_2 \exp(-ik_1 x), \quad k_1 = \sqrt{2m(U_0 - \epsilon)}/\hbar, \quad \epsilon > U_0.$$

Здесь b_1 , b_2 и f – амплитуды. Задача свелась к их определению. Для этого служат четыре условия «сшивки»: на каждом скачке потенциальной энергии должны быть непрерывны ψ и $d\psi/dx$.

После простого расчета (очень советую его проделать!) можно получить два выражения для коэффициента прохождения $D = |f|^2$ и коэффициента отражения $R = |a|^2 = 1 - D$: когда энергия частицы меньше высоты барьера (при $\epsilon < U_0$) и частица летит сквозь барьер и когда частица летит над барьером при энергии больше высоты барьера (при $\epsilon > U_0$). При $\epsilon = U_0$

коэффициент прохождения D обращается в единицу, что вполне естественно, так как волна беспрепятственно проходит область барьера. Заметим, что при стремлении ϵ к U_0 со стороны больших энергий коэффициент прохождения D тоже стремится к единице. Ведь при $\epsilon = U_0$ и длина волны де Бройля $2\pi/k_1 \rightarrow \infty$. Но $D = 1$ не только при $\epsilon = U_0$, когда $k_1 = 0$. Если $2k_1d = \nu\pi$, где $\nu = 1, 2, 3$ и т.д. – целые числа, т.е. на ширине барьера $2d$ укладывается целое число полуволн, то и тогда $D = 1$. Во всех случаях, кроме перечисленных, коэффициент прохождения $D < 1$, а коэффициент отражения $R \neq 0$.

Надо отметить еще один факт. Чем энергия частицы ϵ меньше (речь идет о сравнении с U_0), тем коэффициент прохождения через барьер меньше. Если $kd \geq 1$, то коэффициент прохождения экспоненциально мал.

Таким образом, мы убедились, что непроницаемых стен нет. Чем энергия частицы больше, даже при $\epsilon < U_0$, тем коэффициент прохождения D ближе к единице, а коэффициент отражения R – к нулю. И все же, несомненно, описанные свойства можно отнести к квантовым чудесам. Хотя бы потому, что устанавливаются они при изучении движения *отдельной частицы*, так непохожей на волну. И обнаружить проницаемость барьера можно, наблюдая за одной частицей. Но для сравнения количественных предсказаний теории с экспериментом необходимо исследовать поведение *многих частиц*.

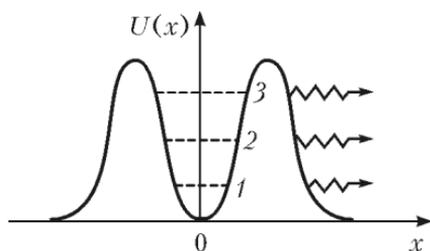
Туннель, который не надо прокладывать

Прохождение микроскопической частицей недоступной по законам классической механики области получило название *туннельного эффекта*. Туннельный эффект встречается нередко и играет важную роль. Только упомянем: радиоактивный α -распад – типичный пример туннельного эффекта, источники термоядерной энергии звезд и нашего Солнца не существовали бы, не будь туннельного эффекта; многие химические реакции, происходящие в живых организмах, могут осуществляться благодаря туннельным переходам электрона из молекулы в молекулу; наконец, некоторые современные приборы содержат туннельный диод, получивший свое название по туннельному эффекту, на котором основан.

Туннельный эффект обычно характеризуется коэффициентом прохождения недоступной для классической частицы области, но не всегда постановка задачи такая, как мы рассмотрели.

При распаде сложного образования, например атомного ядра, когда α -частица покидает ядро благодаря туннельному эффек-

ту, задача состоит в вычислении времени жизни исходного, составного состояния – того, что было до радиоактивного распада. Обычно вычисляют время полураспада – время, за которое половина всех атомов или ядер распадётся. Мы обращали внимание на то, что коэффициент прохождения D тем больше, чем ближе энергия ϵ налетающей частицы к высоте барьера U_0 . Чем больше энергия того состояния, которое занимает частица в связанном состоянии, тем время полураспада меньше (рис.7).



1, 2, 3 – уровни энергии

$\tau_3 < \tau_2 < \tau_1$ – времена полураспада

Рис.7. Время полураспада и энергия частицы

Приведем еще один пример проявления туннельного эффекта. На рисунке 8 изображена довольно сложная потенциальная яма. Скорее, две ямы, разделенные между собой барьером. Если бы барьер был бесконечно высоким, то в каждой из ям была бы своя система энергетических уровней. Так как ямы одинаковы, то и системы уровней в ямах были бы тождественны. Сказав, что частица имеет такую-то энергию, мы не знали бы, в какой яме частица находится. О такой ситуации говорят, что *имеет место вырождение*: два разных состояния имеют одинаковые энергии. Одно состояние принадлежит левой яме, другое – правой. Через бесконечно высокий барьер частица перемещаться не может, но через барьер конечной высоты, благодаря туннельному эффекту, может. Если барьер не слишком узкий, то коэффициент прохождения мал. А как способность частицы перемещаться из одной ямы в другую изменит энергетический спектр частицы в ямах? Ответ будет нетривиальным.

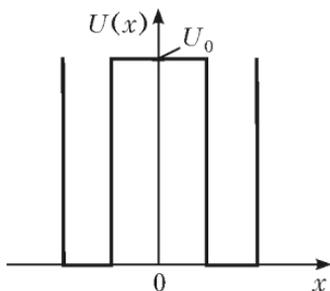


Рис.8. Две ямы, связанные туннельным эффектом

Мы хотим не только сформулировать ответ, но и показать, как подобная задача решается, для чего и рассмотрим две ямы прямоугольной формы, разделенные прямоугольным барьером. Как и барьеры, которые мы рассмотрели ранее, прямоугольный барьер с прямоугольными границами, без сомнения, упрощенная

модель, но для описания интересующего нас явления она вполне пригодна.

Итак, мы должны найти решение стационарного уравнения Шредингера с потенциальной энергией $U = U(x)$, изображенной на рисунке 8. В целях простоты высота барьера приравнена к глубине ям. Функция $U = U(x)$, а тем самым и уравнение Шредингера, обладает симметрией при замене x на $-x$. Уравнение инвариантно (неизменно) при такой замене. Симметрия уравнения Шредингера позволяет его решения разделить на два класса: на симметричные, для которых $\psi_s(x) = \psi_s(-x)$, и антисимметричные, для которых $\psi_s(x) = -\psi_s(-x)$.²

Уравнение Шредингера имеет различный вид в зависимости от того, какому интервалу принадлежит координата x . Нас будут интересовать состояния с энергией $0 < \epsilon < U_0$. На разных интервалах уравнения разные:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + \epsilon\psi = 0 \quad \text{при } |a| > |x| > |b|,$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} - (U_0 - \epsilon)\psi = 0 \quad \text{при } |x| < |b| \text{ и } |x| > |a|.$$

Как мы отметили, ψ -функция может быть либо симметричной, либо антисимметричной. Выбрав для ψ -функции s - или a -решение, достаточно выписать зависимость либо при $x > 0$, либо при $x < 0$. Ограничимся правой полуосью (значение ψ -функции на левой полуоси определяется симметрией):

$$\psi_s(x) = A \operatorname{ch} \kappa x \quad \text{при } x < b,$$

$$\psi_a(x) = A \operatorname{sh} \kappa x \quad \text{при } x < b,$$

$$\psi_{s,a}(x) = B \exp(ikx) + C \exp(-ikx) \quad \text{при } b < x < a,$$

$$\psi_{s,a}(x) = D \exp(-kx) \quad \text{при } x > a.$$

Здесь $\kappa = \sqrt{2m(U_0 - \epsilon)}/\hbar$, $k = \sqrt{2m\epsilon}/\hbar$, ch и sh – гиперболический косинус и гиперболический синус соответственно, а $0 < \epsilon < U_0$.

² С тем что у симметричной задачи может быть антисимметричное решение, мы уже встретились при вычислении уровней энергии частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме. Вопрос о симметрии решений физических задач очень интересен. Вспомните, что при сферической симметрии силы всемирного притяжения все планеты движутся по эллипсам. К сожалению, вопрос этот выходит за пределы темы нашей статьи.

Требования непрерывности ψ -функции и ее производной по координате на границах интервалов формулируют четыре уравнения для четырех неизвестных A , B , C и D , у которых мы опустили индексы s и a , хотя их значения для симметричной и антисимметричной ψ -функций различны. Условие разрешимости каждой из систем уравнений служит дисперсионное уравнение, позволяющее найти разрешенные уровни энергии. Оно выводится путем исключения всех четырех постоянных. При $U_0 \rightarrow \infty$, когда две ямы не связаны друг с другом, дисперсионные уравнения совпадают, что и соответствует вырождению: уровни энергии дважды вырождены ($\epsilon_s^0 = \epsilon_a^0$). При конечном значении U_0 энергии s - и a -уровни различаются, и вырождение ликвидируется. Если $U_0 \gg \hbar^2 / (2m(a-b)^2)$, то $|\epsilon_s^0 - \epsilon_a^0| \ll \epsilon_{s,a}^0$ — уровни энергии расщепляются на близко расположенные пары (рис.9). С ростом энергии растет и расстояние между уровнями в паре.



Рис.9. Расщепление уровней энергии частицы

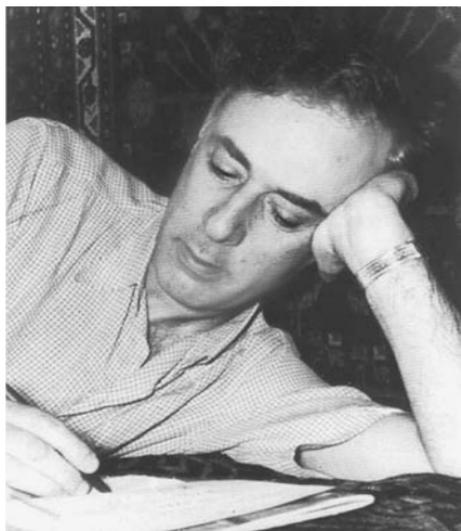
22 января 2008 года исполнилось бы сто лет величайшему физику-теоретику XX века Льву Давидовичу Ландау.

Предлагаем вниманию читателей отрывок из книги М.И.Каганова «Школа Ландау: что я о ней думаю» (книга выпущена издательством «Гривант» в 1998 году). Автор книги принимал самое непосредственное участие в жизни этой Школы.

Льва Давидовича никогда не привлекали модные увлечения читательской аудитории: снежный человек, телепатия, летающие тарелки и т.п. Большинство подобных увлечений он считал интеллигентским суеверием и остро высмеивал.

Я неоднократно рассказывал об ироническом отношении Дау к «таинственным» явлениям, и часто слушатели обижались за «таинственное» явление, высказывали удивление, иногда даже подозревали Льва Давидовича в ограниченности. Дело, конечно, не в ограниченности. Повышенный интерес к таинственным, загадочным проблемам, как правило, связан с тем, что обычные, ежедневные проблемы скучнеют, теряют свежесть что ли. В Ландау поражал неослабевающий с годами интерес к реальным (большим и малым) задачам, которые ставит и решает физика.

Он разговаривал о науке с сотнями физиков. Они рассказывали ему самые различные работы, отличающиеся по трудности, по глубине, по значительности, работы, относящиеся к самым разным объектам – к твердым телам и к элементарным частицам, к звездам и к газам. Работа выслушивалась Дау, выслушивалась и занимала место в его фантастической памяти в том и только в том случае, если она удовлетворяла простому принципу: ра-



бота должна разъяснить что-то непонятное. Бесконечно разъясняющимся и бесконечно ставящим новые загадки – таким видел и ощущал мир Дау. Острый интерес к решению реальных задач не оставлял места для задач надуманных, хотя, быть может, и весьма увлекательных. И еще: Ландау всегда требовал профессионального отношения к науке, не любил дилетантов. Его раздражали болтовня и верхоглядство, которые, как правило, сопровождали попытки решения «таинственных» проблем.

Говоря о Ландау, часто упоминают о гениальной интуиции, о «даре божьем». Дар божий, конечно, был, но была и ежедневная, нет, ежечасная титаническая работа, утомляющая, требующая отдачи всего себя. Я встречался с Дау вечерами, после рабочего дня, когда усталость, усугубленная невозможностью отключиться, была видна невооруженным глазом. Он задумывался, выпадал из разговора. Однако всегда брал себя в руки и включался в беседу. При этом очень помогали стандартные темы – о счастье, о любви, о том, каковы должны быть женские прически и женские платья.

Я не хочу, чтобы подумали, будто разговоры о счастье, любви были для Ландау способом отвлечься от работы. Это, по-моему, совершенно не так. Он по-настоящему глубоко, я бы сказал выстраданно, интересовался «вечными темами». Его высказывания были нестандартны. Многих отпугивала «теорфизическая» ясность, с которой Дау пытался (и часто не без успеха) решать сложные задачи человеческих взаимоотношений. Он был глубоко убежден, что в большинстве случаев сложность взаимоотношений надуманна (он всегда строго различал слова «сложно» и «трудно»), и пытался добраться до материалистической сущности конфликта, если таковой был. По своему темпераменту Дау был просветителем, и не только в науке, но и в жизни. Он считал, что людей надо учить жить. И учил...

Ландау прожил трудную, но, по сути, счастливую жизнь. Он был окружен преданными учениками, признание и слава достались ему при жизни. Ему казалось естественным – человек должен быть счастливым. Если ты несчастлив, то, поняв это, тщательно проанализировав, что мешает тебе жить и, главное, получать от жизни удовольствие, ты обязан (именно обязан) добиваться своего счастья, бороться него.

«ЭЛЕКТРОНЫ, ФОНОНЫ, МАГНОНЫ»

(Неопубликованное предисловие ко второму изданию книги)

Перечитывая книгу¹, написанную мною приблизительно 30 лет назад, я испытывал несколько странное чувство. С одной стороны, книгу, несомненно, написал я. Узнаю свои мысли, свое отношение к тому или другому явлению, открытию. Так безошибочно узнаешь себя, глядя на старую фотографию, хотя в зеркале видишь совсем другое лицо. С другой стороны, благодаря прошедшим годам возникает некая отчужденность, позволяющая оценивать прочитанное объективно или почти объективно. Это разрешает мне сказать: «Электронны, фононы, магноны» – хорошая книга, она мне понравилась при перечитывании. Если бы это было не так, не дал бы согласия на ее переиздание.

Конечно, в квантовой теории твердого тела, популярному изложению которой посвящена книга, за прошедшие годы произошло много событий. Но мне кажется, происходившее правильно назвать *развитием*. Основы квантовой теории твердых

тел не были пересмотрены. Без знания того, о чем говорится в книге, нельзя понять, в частности, и тех изменений, которые произошли за годы, прошедшие между первым и вторым изданиями.

Квантовые свойства разных твердых тел все более активно используются в технике. Писалась бы книга теперь, с большой вероятностью встречались бы в ней упомина-



¹ М.И.Каганов. «Электронны, фононы, магноны». Издание 2-е. (М.: Издательство ЛКИ, 2008.) Первое издание книги вышло в Главной редакции физико-математической литературы издательства «Наука» в 1979 году. По неизвестным автору причинам специально написанное для второго издания предисловие в книгу не вошло.

ния наноструктур, высокотемпературных сверхпроводников и многих интереснейших открытий, сделанных сравнительно недавно. Признаюсь, я задумывался, не стоит ли сделать вставки или подстрочные примечания с подобными упоминаниями, и пришел к выводу, что делать этого не надо. Сколько-нибудь серьезно рассказать о том, чего не знали в 70-е годы прошлого века, в рамках этой книги невозможно, а знаний, которые можно почерпнуть, прочитав «Электроны, фононы, магноны», будет достаточно для того, чтобы воспользоваться информацией, заполняющей публикации в научно-популярных журналах, в интернете и в других доступных источниках.

Вот на что стоит обратить внимание. В книге нередко упоминается время, прошедшее после какого-либо научного события, или говорится в «настоящее время», «теперь» и т.п. Надо помнить, что от момента написания книги до того, как она попала к вам, прошло много лет. Надо в уме произвести сложение, либо мысленно перенестись лет на 30 назад. Такие «выкладки», читая, делал и я.

* * *

За прошедшие годы изменилась не только физика твердого тела. Углубилось и изменилось представление о Мире, о его структурных единицах – элементарных частицах, претерпели изменение даже представления о структуре Вселенной, о ее рождении и судьбе.

Вот один пример из далекой от физики твердого тела области – из физики элементарных частиц: в книге ни разу не упоминаются кварки. В те годы, когда книга писалась, кварки были модной темой; много спорили – реальны ли кварки или это только удобный способ описания многих частиц и, главное, обнаруженных нестандартных свойств симметрии. Давно завершились споры. Кварки всеми признаны. Кварки – элементарные частицы, из которых состоят нуклоны и некоторые из мезонов. При этом возникло понимание того, что кварки не существуют как свободные частицы в вакууме, вне барионов. Несомненно, это событие огромного значения. Оно, возможно, изменит наше мировоззрение. Если дальнейшее дробление частиц невозможно и именно кварки – истинно элементарные частицы, то человечество, наконец, обнаружило то, из чего состоит все. И все же, повторю, кварки в книге не встречаются, хотя нуклоны (и протоны, и нейтроны) в книге упоминаются многократно. Но что нужно знать об этих частицах физике твердого тела? Их массу, заряд и магнитный момент. Пожалуй, все. Их внутренняя

структура, существенная не только при изучении взаимодействий между частицами, но и для понимания структуры мироздания, непосредственно в физике твердого тела роли не играет (возможно, пока).

Одна из черт окружающего нас Мира и, как следствие, науки о Мире – своеобразная иерархичность. О ней упомянуто в книге. Строительной механике от физики твердого тела необходимо получить справочные сведения о прочностных и упругих характеристиках строительных материалов в разных условиях. Электротехнике – электрические характеристики используемых проводников и изоляторов. При исследовании конденсированных тел физики (теоретики и экспериментаторы) пользуются результатами атомной физики и не могут без них обойтись. Недостаточно знать, что тело построено из атомов или молекул. Для понимания природы свойств макроскопических тел и явлений, происходящих в них, необходимо знать устройство тех «кирпичиков», из которых они построены. Но о частицах – строительном материале молекул и атомов, об электронах, протонах и нейтронах – достаточно знать то, что можно почерпнуть из любого справочника. Более того, я думаю, что даже для объяснения феномена жизни этого знания вполне достаточно. Понятно, это не означает, что уже сейчас мы можем ответить на все вопросы, которые ставит молекулярная биология. Предстоят многие годы интенсивных исследований. И, главное, нужно ждать появления новых идей. За последние десятилетия у молекулярной биологии, которая впитала в себя многое из физики твердого тела, есть блестящие достижения. Физических знаний о структуре молекул, из которых построены все живые организмы, пока совершенно достаточно. Думаю, хотя и не все имеют такое мнение, что какого-то специального углубления в физику элементарных частиц для развития молекулярной биологии не потребуется никогда. По-прежнему молекулярным биологам, как и физикам, занятым твердыми телами, достаточно будет знать об электронах, протонах и нейтронах то, что прекрасно известно сегодня.

* * *

Читая книгу, не мог не вспоминать. Во введении к первому изданию книги я не без удовольствия вспомнил, как зародилась мысль написать «Электроны, фононы, магноны». А теперь я с меньшим удовольствием вспоминаю, как книга писалась.

Большая часть была написана в Пущино, где я проводил отпуск, который совпал с перерывом в чтении лекций в МГУ. В

Пушино – уютном городе на берегу Оки – была удобная гостиница. Но главное, в Пушино жил друг моей юности Иосиф Захарович Гольденберг, или Графчик, как называют его все друзья. Обаятельный человек, поэт и прекрасный педагог, он работал в библиотеке Института белка АН СССР и имел возможность помочь в бронировании номера в гостинице. В те годы это было ох, как непросто! Друзья пользовались помощью Графчика. Удобство проживания сопровождалось изоляцией от московской суеты, роскошью человеческого общения и прогулками по берегу Оки, по березовой роще... В Пушино я написал многое из того, что вошло в книгу, и придумал нестандартное расположение материала, за которое меня попрекали, но, и перечитывая, я не разочаровался в своем замысле. Может быть, он возник из разговоров с Иосифом Захаровичем о романе Хулио Кортасара «Игра в классики», но, откровенно говоря, я этого уже не помню.

И еще одно воспоминание. Очень важное. В том же 1979 году, когда вышла книга «Электроны, фононы, магноны», в журнале «Успехи физических наук» был опубликован обзор «Электронная теория металлов и геометрия» – последняя совместная публикация с моим учителем академиком Ильей Михайловичем Лифшицем. Он ушел из жизни в 1982 году безвременно рано – ему было 65 лет. Многие годы я работал под руководством Ильи



Каждая из механик имеет свою область применения, которую удобно изобразить в виде диаграммы. На этой диаграмме по вертикали откладывается отношение скорости частицы v к скорости света в вакууме c . По горизонтали откладывается отношение постоянной Планка \hbar к удвоенному действию частицы S . Действие – некоторая физическая величина, имеющая размерность постоянной Планка. Оценить действие можно, перемножив характерный путь, проходимый частицей при заданном движении, и характерный импульс частицы. Пунктирные линии на рисунке – условные границы между механиками

Михайловича. Невозможно переоценить, что дало мне его руководство. Думая о написанных мною и в соавторстве с И.М.Лифшицем научно-популярных статьях и книгах, я чувствую, сколь важна была роль Ильи Михайловича в формировании моего физического мировоззрения. Перечитывая некоторые абзацы, я слышал голос своего учителя. А воспроизведенный здесь рисунок из книги, важный для понимания места физики твердого тела среди наук, я впервые увидел нарисованным на доске Ильей Михайловичем при чтении им научно-популярной лекции в Харьковском лектории. Потом рисунок появился в нашей статье, которая так и называлась «Физика твердого тела на карте науки». Опубликована она была в сборнике «Будущее науки». Серию сборников под таким названием выпускало общество «Знание».

Вспоминать можно до бесконечности. И, казалось бы, есть вполне законный повод – переиздание книги, вышедшей из печати много лет назад. Но, предаваясь воспоминаниям, не следует все же забывать, что написанное в ней не устарело. И сегодня книга «Электроны, фононы, магноны» может быть весьма полезной для понимания природы процессов и явлений, происходящих в твердых телах.

ДВЕ ПРОСТЫЕ, НО НЕ ВПОЛНЕ ТРИВИАЛЬНЫЕ ФОРМУЛЫ

Речь пойдет о двух довольно простых явлениях: о течении жидкости или газа по трубе и о прохождении электрического тока по проводнику. Мне хотелось написать «о течении электрического тока» и отметить, что язык свидетельствует о сходстве, даже тождественности обоих явлений: и там, и там что-то течет. Потом сообразил, «течение тока» – масло масляное.

Формула, описывающая течение жидкости по трубе, носит имя французского физиолога и физика Жана Луи Мари Пуазейля (1799–1869). Ее называют *законом Пуазейля*. А формулу, описывающую прохождение тока по проводнику, называют *законом Ома*. Георг Симон Ом – немецкий физик, жил с 1787 по 1854 год. Я привел годы жизни тех, именем которых названы обсуждаемые нами формулы, для того чтобы подчеркнуть: решил задуматься над старыми, хорошо изученными явлениями. Решил, так как заметил: если сравнивать эти явления, то можно обнаружить нечто интересное. Интерес трудно поддается определению. Одному интересно, а другому – безмерно скучно. Буду рад, если то, что интересно мне, покажется интересным и читателям.

Начнем с *закона Пуазейля*. Любая физическая формула включает в себя буквы (символы), обозначающие физические величины, которые могут быть определены и измерены независимым образом. Каждую физическую величину надо уметь определить независимо от других величин, входящих в формулу. Нам придется останавливаться на подобных вопросах. Но дальше – более конкретно, чтобы не увязнуть.

Скорость протекания жидкости или газа по трубе определяется величиной, называемой расхо-



дом. Расход, обозначаемый буквой Q , есть количество (масса) жидкости, протекающей через поперечное сечение трубы в единицу времени:

$$Q = \pi R^2 \rho V,$$

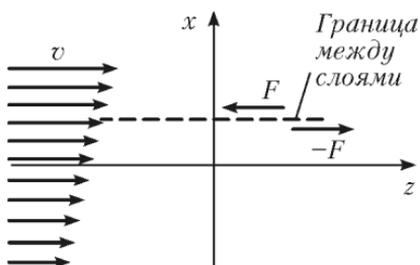
если для простоты предположить, что труба – круглый цилиндр радиуса R , ρ – плотность жидкости, а V – ее средняя по сечению трубы скорость. Размерность расхода есть

$$[Q] = \text{см}^2 \cdot (\text{г}/\text{см}^3) \cdot (\text{см}/\text{с}) = \text{г} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Закон Пуазейля утверждает:

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 L \nu}, \quad (1)$$

Здесь Δp – разность давлений на концах трубы длиной L , а ν – коэффициент кинематической вязкости, равный отношению обычной вязкости к плотности: $\nu = \eta/\rho$. Напомним, что коэффициент вязкости (или просто вязкость) η описывает внутреннее (вязкое) трение в жидкости (или газе). Сила трения между слоями жидкости возникает в том случае, когда скорость течения меняется от слоя к слою. Если, например, жидкость течет в направлении z , а ее скорость v зависит от координаты x , то сила



трения в расчете на единицу площади границы пропорциональна скорости изменения скорости в поперечном направлении (см. рисунок):

$$\frac{F}{S} = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right|. \quad (2)$$

Эта формула написана для ламинарного течения (см.

ниже) и фактически является определением коэффициента вязкости η . Отметим, что вязкое трение (как и любое трение) приводит к диссипации механической энергии, т.е. к превращению ее в тепловую энергию. Правда, с точки зрения молекулярной теории, механизм возникновения вязкого трения совсем не такой, как для сухого трения. За счет теплового движения молекулы из одного слоя перескакивают в другой. Молекулы из «медленного» слоя, попадая в «быстрый», должны (в среднем) приобрести дополнительную скорость, т.е. на них со стороны остальных молекул слоя должна подействовать сила «вперед». По третьему закону Ньютона, на слой со стороны «гостевых» молекул будет действовать сила «назад». Ана-

логично – для молекул, попадающих из «быстрого» слоя в «медленный».

Коэффициенты вязкости жидкостей и газов различаются на много порядков. Воспроизведем часть таблицы значений η и ν при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$, взятой из справочника:

	$\eta, \text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$
Вода	0,010	0,010
Воздух	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,150
Спирт	0,018	0,022
Глицерин	8,5	6,8
Ртуть	0,0156	0,0012

Заметим, что здесь значения η (и ν) даны в граммах, сантиметрах и секундах. Обычно значение вязкости в справочниках приводится в единицах, обозначаемых $\text{Па} \cdot \text{с}$, где единица давления Па названа по имени великого французского ученого – физика, математика и философа Блеза Паскаля (1623–1662). Иногда вязкость измеряют в пуазах (П): $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Эта единица вязкости, конечно, получила свое название в честь Пуазейля.

Формула (1) и знание численных значений входящих в нее величин (радиуса трубы R , перепада давления Δp на расстоянии L и кинематической вязкости ν), естественно, позволяют вычислить расход Q , но, боюсь, мало помогут понять, что происходит. Специалисты, встречаясь с чем-то новым, пытаются выяснить *физику явления*, а иногда наоборот – понимая, что происходит или должно происходить, пытаются описать, как можно наблюдать нечто новое. Или, наконец, сами ставят эксперимент.

Прежде чем двигаться дальше, сделаем одно замечание. Все многократно наблюдали, что течение жидкости в разных условиях происходит по-разному. Иногда жидкость бурлит, пенится. Такое движение называют турбулентным (от латинского *turbulentus* – беспорядочный). Плавное, спокойное течение жидкости называют ламинарным (по латыни *lamina* – пластина, слой). Спокойное течение жидкости осуществляется как бы слоями, которые различаются только величиной скорости, медленно меняющейся от слоя к слою. Так вот, *закон Пуазейля описывает ламинарное течение жидкости по трубе.*

Теперь можно продолжать. Подставим в формулу (1) выражение для расхода Q , заменим кинематическую вязкость ее выражением $\nu = \eta/\rho$, сократим в правой и левой частях равенства совпадающие множители и для средней скорости V получим:

$$V = \frac{1}{8} \frac{\Delta p}{L} \frac{R^2}{\eta}. \quad (3)$$

Движение жидкости описывает гидродинамика. Гидродинамика – одна из наук, принадлежащих тому разделу физики, который принято называть макрофизикой. Другая наука, принадлежащая макрофизике, это теория упругости. Ее вместе с гидродинамикой часто объединяют в *механику сплошных сред*. Эта констатация – для того чтобы подчеркнуть: для гидродинамики жидкость это сплошная среда. В основных чертах гидродинамика была создана до того, как было осознано, что макроскопические тела состоят из атомов и молекул. В чем это проявляется? В том, что все величины – характеристики, описывающие жидкость – относятся к большому числу атомов. Например, гидродинамика имеет дело с плотностью. Плотность ρ , т.е. масса единицы объема, – явно макроскопическая величина. Даже скорость жидкости, которая может изменяться от «точки» к «точке» (например, по сечению трубы), при гидродинамическом описании есть не скорость отдельных частиц, а скорость элемента объема (массы) жидкости. Элемент объема мал по сравнению с радиусом трубы, но велик по сравнению с межатомными расстояниями, т.е. это макроскопический объект. Поэтому слово «точка» здесь взято в кавычки. Обычно так не поступают, и мы в дальнейшем тоже не будем.

Теперь мы прекрасно знаем, что все макроскопические тела состоят из атомных частиц, а иногда и субатомных (так, в металлах имеются свободные электроны). Есть возможность выразить любые макроскопические величины через атомные, ионные, молекулярные или электронные характеристики. Простейший пример. Пусть жидкость состоит из молекул массой M , а n – число молекул в единице объема. Тогда $\rho = Mn$. Вот и выразили. Гидродинамическая скорость – скорость элемента объема $\vec{v}(\vec{r})$ – это средняя скорость молекул жидкости в этом объеме. Введенная выше (формула 3) скорость V есть среднее по сечению трубы значение скорости $\vec{V}(\vec{r})$. Эта скорость в обычных условиях (например, в водопроводных трубах) составляет несколько метров в секунду. Мы специально выделили курсивом утверждение, что введенная скорость – среднее значе-

ние скорости по сечению трубы. Чтобы не забыть. Мы покажем ниже, как скорость воды меняется с расстоянием от центра трубы.

«Что-то все слишком просто, – уверен, недоумевает читатель, – а тепловое движение молекул?» Попробуем разобраться. Напомним, что тепловое движение хаотично, молекулы движутся во все стороны, у теплового движения нет выделенного направления. Средняя энергия теплового движения молекул равна

$$\frac{Mv_T^2}{2} = \frac{3}{2}k_B T,$$

где v_T – скорость теплового движения, T – температура (в градусах Кельвина), k_B – постоянная Больцмана. Нетрудно посчитать, что для воды при обычных условиях ($T = 300$ К) скорость теплового движения составляет $v_T \approx 3 \cdot 10^2$ м/с. Теперь картина прояснилась: молекулы хаотически быстро двигаются во все стороны, сталкиваются друг с другом, обмениваются энергиями и импульсами, и вся эта движущаяся масса медленно (со скоростью, в сотни раз меньшей тепловой) движется по трубе. Таким образом, истинная скорость частицы есть $\vec{v}(\vec{r}) + \vec{v}_T$, но среднее значение тепловой скорости равно нулю. Гидродинамика способна описать лишь поведение средней скорости. В общем случае средняя скорость зависит не только от \vec{r} , но и от времени: $\vec{V} = \vec{V}(\vec{r}, t)$.

Задумаемся. Формула (3) утверждает: средняя скорость течения жидкости линейно зависит от приложенной силы. Конечно, именно разность давлений создает силу, под действием которой жидкость течет с постоянной средней скоростью. Согласно механике Ньютона, под действием постоянной силы тело движется с ускорением. Отсутствие ускорения указывает, что существует компенсирующая сила. Она, эта сила, направлена против внешней силы и линейно зависит от скорости. Равенство суммы сил нулю определяет среднюю скорость течения. Не будем говорить загадками. Сила, которая компенсирует внешнюю силу, это сила трения жидкости о стенки трубы. Сила трения тем больше, чем больше вязкость, и поэтому скорость V обратно пропорциональна вязкости.

Все сказанное относится к первой из двух формул, определивших название статьи. Обратимся теперь ко второй формуле – к *закону Ома*. В отличие от закона Пуазейля, его можно сформулировать так, чтобы равенство не содержало размеров проводника. Правда, только в том случае, если проводник достаточно больших (макроскопических) размеров. (Для модных ныне наноструктур такой подход неприменим.)

Способность вещества проводить электрический ток описывается удельной электропроводностью σ , с помощью которой можно записать закон Ома в форме, не зависящей от конкретной формы и размеров образца. Если $\vec{j} = \vec{j}(\vec{r})$ – плотность электрического тока в точке \vec{r} , а $\vec{E}(\vec{r})$ – напряженность электрического поля в той же точке, то между ними есть линейная связь. Ее именуют законом Ома в локальной (дифференциальной) форме:

$$\vec{j}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r}), \quad (4)$$

где и плотность тока, и напряженность поля – векторные величины. В анизотропном проводнике, в кристалле, связь между \vec{j} и \vec{E} сложнее, но мы не будем на этом останавливаться. Отметим только, что характер этой анизотропной зависимости может быть установлен на основании свойств симметрии кристалла, для этого нет нужды знать природу проводимости. Характер анизотропии – следствие законов макроскопической физики. Другой важный вывод, не требующий уточнения природы проводимости, таков: в равновесных условиях $\sigma > 0$. Величина, обратная удельной проводимости, это удельное сопротивление: $\rho = 1/\sigma$. Закон Ома и уравнения электродинамики сплошных сред – науки об электрических и магнитных свойствах макротел – позволяют, рассчитав распределение тока и электромагнитных полей по проводнику. Самые разнообразные задачи электротехники и радиофизики решены таким путем и имеют огромное практическое значение.

Знание того, что в металлах и полупроводниках электрический ток осуществляется переносом зарядов электронами, позволяет записать плотность тока следующим образом: $\vec{j} = en_e \vec{V}_e$, где e – заряд электрона, n_e – число электронов в единице объема, а \vec{V}_e – средняя скорость движения электронов под действием электрического поля \vec{E} . Тогда получаем

$$\vec{V}_e = \frac{\sigma}{e^2 n_e} e \vec{E}. \quad (5)$$

Мы домножили и разделили на заряд электрона e , чтобы выделить силу \vec{F} , действующую на электрон: $\vec{F} = e \vec{E}$. Линейная зависимость средней скорости движения электронов от силы (скорости, а не ускорения!) показывает, что есть сила, компенсирующая силу \vec{F} . Это – сила трения электронов обо все, что мешает их движению по проводнику (см. ниже).

Среднюю скорость движения частиц (в данном случае электронов) удобно характеризовать *подвижностью* – средней скоростью частиц, обусловленной единичной силой. Пусть подвижность электронов есть U_e . Согласно формуле (5),

$$U_e = \frac{\sigma}{e^2 n_e}. \quad (6)$$

Значения удельной электропроводности σ , а точнее удельного сопротивления $\rho = 1/\sigma$, можно найти во многих справочниках. В лучших из них не только указано значение при определенной температуре, но и задается температурная зависимость $\rho(T)$. Проводимость существенно зависит от температуры. Но нас, скорее, будет интересовать не столько температурная зависимость, сколько полученная в электронной теории металлов зависимость удельной проводимости σ от параметров, описывающих электроны проводимости – тех, кто осуществляет перенос заряда, когда по проводнику течет ток.

Простейшая модель электронной проводимости – это модель Друде–Лоренца–Зоммерфельда, согласно которой перенос заряда в металле осуществляют свободные электроны. Откуда они взялись в металлах? При конденсации атомов в жидкость или кристалл более половины атомов, имеющих в таблице Менделеева, ионизируются: электроны, слабо связанные с ядром, вовсе теряют с ним связь и перемещаются свободно по кристаллу. Почему движение в периодическом поле ионов похоже на движение в свободном пространстве, объяснила квантовая механика. Мы не будем на этом останавливаться, а просто примем модель Друде–Лоренца: *в металле есть газ свободных электронов*. Я не забыл Зоммерфельда, а не упомянул его сознательно, так как наличие газа свободных электронов в металлах предположили Друде и Лоренц (о полупроводниках тогда не знали). Зоммерфельд же понял, что *электронный газ надо описывать квантовыми формулами*.

Будем последовательны. В любом металле есть газ свободных электронов. На каждую частицу действует сила $e\vec{E}$, обязанная разности потенциалов на концах проводника. Если бы это была единственная сила, действующая на электроны, то они бы ускорялись. Этого не происходит. Электроны, сталкиваясь с любыми нарушениями, которые всегда есть в кристалле, теряют приобретенный от электрического поля импульс и тормозятся. Даже в идеальном кристалле, в котором нет ни примесей, ни дефектов в структуре кристаллической решетки, т.е. нарушений в строго периодическом расположении атомов или ионов, при

отличной от нуля температуре происходит рассеяние. Причиной торможения электронов служит тепловое движение атомов, их колебания вокруг строго фиксированных центров. Только и именно благодаря столкновениям электроны по проводнику движутся с трением. А вот столкновения электронов друг с другом не приводят к торможению: при межэлектронных столкновениях импульс коллектива электронов перераспределяется между электронами, не диссипирует, не исчезает безвозвратно и поток электронов не тормозится.

Итак, в результате столкновений с центрами рассеяния в объеме проводника возникает сила трения. В согласии с законом Ома, сила трения пропорциональна средней скорости газа электронов и направлена против этой скорости. Теперь мы можем записать уравнение движения электронов, т.е. уравнение второго закона Ньютона:

$$m \frac{d\bar{V}_e}{dt} = e\bar{E} + \bar{F}_{\text{тр}}, \quad (7)$$

где m – масса электрона, а $\bar{F}_{\text{тр}} = -(m/\tau)\bar{V}_e$ – сила трения. Почему коэффициент пропорциональности между силой трения и скоростью написан в таком виде, сейчас будет ясно. В отсутствие электрического поля, когда $E = 0$, средняя скорость электронов обратится в ноль, даже если в момент выключения поля она не была равна нулю. Происходить этот процесс будет по экспоненциальному закону

$$V_e(t) = V_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где V_0 – начальная скорость, а τ – время затухания направленного движения электронов. Если при каждом столкновении электрон заметно изменяет свой импульс, то по порядку величины τ – это среднее время свободного пробега электрона или среднее время между двумя столкновениями. Умножив время τ на среднюю скорость теплового (хаотического) движения электронов, мы получим длину свободного пробега электронов l (среднюю, естественно). Чтобы закон Ома мог быть записан в виде формулы (4) с проводимостью, не зависящей от радиуса проволоки R , должно выполняться сильное условие: $R \gg l$. (В наноструктурах обычно $l > R$.)

Зная выражение для силы трения, из условия $e\bar{E} + \bar{F}_{\text{тр}} = 0$ нетрудно найти не зависящую от времени среднюю скорость V_e , и вычислить коэффициент электропроводности σ :

$$\sigma = \frac{e^2 n_e \tau}{m}. \quad (8)$$

Может показаться странным: зачем один коэффициент σ выражать через два других n_e и τ (заряд электрона и его масса известны)? Дело в том, что оба параметра n_e и τ могут быть независимо измерены, а тем самым формула (8), одна из важнейших формул электронной теории металлов, может быть проверена. Кроме того, n_e и τ имеют простой физический смысл, так что формула (8) *объясняет закон Ома*. Она справедлива не только для металлов, но и для полупроводников, хотя значения n_e и τ у полупроводников заметно отличаются от соответствующих значений в металлах. Подставляя выражение (8) в формулу (6) для подвижности электронов, получим

$$U_e = \frac{\tau}{m}. \quad (9)$$

А теперь попытаемся определить подвижность частиц при пуазейлевом течении жидкости. Это чуть более сложная задача. Впрочем, вывод формулы для подвижности читатель может опустить и сразу включиться в обсуждение полученного результата.

Частицы жидкости теряют импульс только при столкновении со стенкой трубы. Их столкновения между собой, казалось бы, можно не учитывать по тем же причинам, что и межэлектронные столкновения. Однако это не так. Как мы знаем, при столкновениях происходит перераспределение импульса между частицами. При стационарном ламинарном пуазейлевом течении в соседних слоях жидкости скорости течения несколько отличаются: чем дальше от центра трубы, тем скорость меньше. Сила вязкого трения пропорциональна не скорости, как при столкновении электронов с препятствиями, а второй производной средней скорости по координате.

Действительно, на каждый слой жидкости действует сила трения (2) с двух сторон. Если бы производная dv/dx была постоянна, то эти силы были бы равны друг другу и полная сила равнялась бы нулю. Ненулевая результирующая сила возникает только в том случае, если dv/dx зависит от x , т.е. если вторая производная отлична от нуля.

Уравнение движения вязкой жидкости выглядит так:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Напомним, что $\partial v/\partial t$ и т.д. — это так называемые частные производные. Если функция зависит от нескольких переменных, например от t , x , y , z , то $\partial v/\partial t$ обозначает производную по времени t при постоянных x , y , z и т.д.

Для простоты мы рассмотрим движение жидкости не по цилиндрической трубе, а между двумя бесконечными параллельными плоскостя-

ми, расстояние между которыми равно $2d$. Расход Q будем определять через квадрат со стороной $2d$. Пусть жидкость течет вдоль оси z , так что $v = v(x, t)$ – это составляющая вектора скорости по оси z , а производная $\partial p / \partial z$, равная $-\Delta p / L$, есть постоянная величина. Плотность ρ запишем в виде $\rho = Mn_l$, где M – масса молекулы жидкости, а n_l – число молекул в единице объема. (Здесь и далее « l » от англ. liquid – жидкость.) Теперь уравнение (10) примет вид

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{n_l} \frac{\Delta p}{L} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}.$$

Очевидно, что на каждую частицу жидкости действуют две силы: внешняя сила (первое слагаемое в правой части уравнения) и сила вязкого трения (второе слагаемое). Равенство механической силы силе трения в каждой точке между плоскостями ($-d < x < d$) позволяет определить зависимость скорости $v = v(x)$ стационарного ($\partial v / \partial t = 0$) течения. Итак,

$$-\frac{\Delta p}{L} = \eta \frac{d^2 v}{dx^2}. \quad (11)$$

На стенках «трубы» (при $x = -d$ и $x = d$) скорость равна нулю. Легко проверить, что решением уравнения (11) служит простая функция

$$v(x) = \frac{\Delta p}{2L\eta} (d^2 - x^2). \quad (12)$$

Отсюда нетрудно найти среднюю скорость:

$$V = \frac{1}{3} \frac{\Delta p}{L} \frac{d^2}{\eta} \quad (13)$$

и расход, равный в нашем случае $(2d)^2 \rho V$:

$$Q = \frac{4}{3} \frac{\Delta p}{L} \frac{d^4}{\nu}. \quad (14)$$

Разделив среднюю скорость V на величину внешней силы $\frac{1}{n_l} \frac{\Delta p}{L} = \frac{M}{\rho} \frac{\Delta p}{L}$, найдем подвижность U_l частицы жидкости.

Получается, что подвижность пуазейлевой частицы жидкости равна

$$U_l = \frac{1}{3} \frac{d^2}{\nu} \frac{1}{M} \approx \frac{\tau_l}{M}, \quad \text{где } \tau_l = \frac{d^2}{\nu}. \quad (15)$$

Благодаря выбранным обозначениям, формула (15) похожа на формулу (9). В обоих случаях в знаменателях стоит масса отдельной частицы, коллектив которых ответствен за описываемое явление. В первом случае – за электропроводность, во втором случае – за вязкость. То что подвижность обратно пропорцио-

нальна массе частицы, вполне естественно: чем частица тяжелее, тем медленнее она движется. Параметры τ и τ_l , имеющие размерность времени, определяются характером диссипативных процессов. Их природа совсем различна.

Параметр τ есть время свободного пробега электрона металла или полупроводника. За это время в среднем каждый электрон с чем-то столкнется, в результате чего потеряет приобретаемый от электрического поля импульс. Так устанавливается стационарное состояние: средняя скорость электронов не возрастает и не убывает.

Теперь поговорим о параметре τ_l . Вернемся к движению жидкости по трубе. Мы уже знаем, что вдали от стенок трубы частицы не могут потерять приобретенный от внешней силы импульс, для этого они должны столкнуться со стенкой. Но до стенки надо добраться. Не будь столкновений, вся жидкость, все ее частицы двигались бы с ускорением под действием внешней силы. Столкновения перемешивают частицы, они переходят из слоя в слой. Причина столкновений – тепловое движение молекул жидкости. Как правило, скорость теплового движения молекул значительно больше, чем скорость упорядоченного движения. Тепловое движение хаотично. Поэтому хаотичны и столкновения. В направлении от центра трубы к стенке никакая внешняя сила не действует. Частицы из слоев, далеких от стенок, попадают на стенку в результате многих столкновений после относительно длительного случайного блуждания. Так вот, время τ_l есть время, которое частица в среднем тратит на то, чтобы в результате случайного блуждания из центра трубы добраться до стенки. Неудивительно, что τ_l тем больше, чем больший путь надо преодолеть частице.

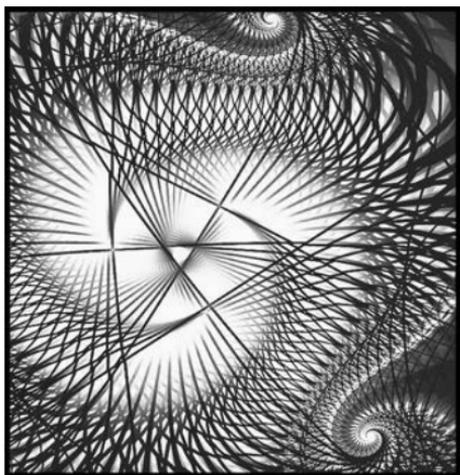
Итак, сравнивая разные явления, иногда обнаруживаешь неожиданное сходство, иногда – существенное различие, но всегда или по меньшей мере часто нечто проясняется. Тешу себя мыслью, что сравнение пуазейлева течения жидкости по трубе и прохождения электрического тока по проводнику было небесполезно.

НА БЕРЕГУ ОКЕАНА НЕПОЗНАННОГО: ИЛЛЮЗИЯ ПРОСТОТЫ

Памяти Л.Н.Розенцвейга

Недавно я вспомнил Генриха Мореплавателя. Был в XV веке такой португальский принц, о котором я узнал в школьные годы, читая о великих географических открытиях. Получил он свое прозвище, никогда не принимая участия в морских походах. В течение сорока лет принц снаряжал и посылал многочисленные морские экспедиции. Для этого он основал обсерваторию, открыл мореходную школу и построил верфь для строительства каравелл – своеобразный форпост на юго-западной оконечности Португалии. Отсюда естественно было начинать путь туда, куда направлялись посылаемые им суда, – на юг вдоль атлантических берегов Африки. Детище Генриха Мореплавателя получило название Вилла-до-Инфанте. Он был третьим сыном короля Португалии Жоана I. Вилла стала центром притяжения для видных ученых, картографов и астрономов того времени.

О Генрихе Мореплавателе я вспомнил, когда читал переведенные на русский язык научно-популярные книги по физике. Задумался и решил, что физика, почти как всегда и как во времена Ньютона, находится на берегу океана непознанного. В моем юношеском сознании Генрих Мореплаватель остался одним из тех, кто стремился к знанию. Его помыслы мне были неизвестны. Желая себя проверить, заглянул в интернет. Я не ошибся. Он стремился узнать, что там, где не побывал ни один европеец до отправленных им экспедиций. Его помыслы, как и следовало ожидать, были меркантильны. Им, точнее его экспедициями, были сделаны пер-



вые шаги по пути формирования мощной колониальной империи Португалии. Посланцы Генриха Мореплавателя привозили не только золото, но и первых в истории Европы черных рабов. Но у Генриха Мореплавателя была и жажда знаний. Великие географические открытия, предвестником которых он, несомненно, был, совершались после его смерти. Даже до открытия мыса Доброй Надежды не дожил любознательный инфант.

О Генрихе Мореплавателе, по-моему, не следует забывать, думая о сложном многовековом пути познания Мира человечеством. Поэтому, пытаясь поделиться своими мыслями о проблемах, обозначенных довольно точно названием статьи, я выбрал упоминание Генриха Мореплавателя в виде преамбулы.

* * *

Береговая черта океана непознанного – явное свидетельство существования материка познанного. Современная наука приводит к непрерывному росту размеров этого материка, сдвигает береговую черту и изменяет ее форму. При этом рост материка познанного сопровождается ростом океана непознанного, приводя к пониманию того, *что теперь требуется постичь*. Требование это жесткое, оно ощутимо научным сообществом: *что* на очереди, диктует логика развития науки.

Наука, даже в пределах физики, о которой только и пойдет речь в этой статье, в настоящее время многообразна. Оставаясь в пределах географической аналогии, надо сказать, что отнюдь не все физики участвуют в экспедициях в океан непознанного или даже трудятся вблизи береговой черты. На материке познанного много белых пятен и недостаточно изученных областей. Логика развития науки требует заполнить знанием белые пятна и составить более детальное представление о том, что (иногда неожиданно) проявило непонятные черты. Без ликвидации белых пятен простая картина Мира, создание которой по мнению Эйнштейна есть истинная цель науки, не завершена. Кроме того, по словам того же Эйнштейна, большинство ученых не думают о создании простой картины Мира. Они видят свое призвание в открытии новых явлений и свойств, которые могут помочь развитию техники. Их сфера деятельности – белые пятна и плохо исследованные области на материке познанного.

Наука стала дорогой. Между учеными существует конкуренция. Иногда ученые, прогнозирующие сравнительно скорое техническое использование своих будущих результатов, ополчаются против ассигнований на сооружения дорогих гигантских ускорителей и не менее дорогих приборов для получения надеж-

ных сведений из далеких областей Вселенной, хотя все понимают, что без них нельзя проникнуть в океан непознанного. Думаю, и с Генрихом Мореплавателем спорили, добиваясь, чтобы он выделял деньги не только на морские экспедиции, но и на караваны, следующие известными маршрутами.

Деление физики на области, существующие на первый взгляд независимо, не ликвидирует ее единства. Физика твердого тела невозможна без атомной физики и электродинамики, физическая кинетика служит всем областям физики. Ни одна физическая дисциплина не может обойтись без других. Расположены дисциплины на материке познанного по-разному. Положение дисциплины определяется ее историей, но не всегда. Иногда дисциплина, исторически расположенная в глубине материка познанного, казалось бы, далеко от берега океана непознанного, в своем развитии использует достижения совсем новых дисциплин, место которых либо у самой береговой черты, либо даже в просторах океана непознанного. А бывает, что давно существующая область физики преподносит открытие, место которого вдали от береговой черты – в океане непознанного.

Вот один из примеров. Физика твердого тела и физика магнитных явлений вполне заслуженно давно принадлежат материке познанного, но в каждой есть глава «Ядерный магнетизм», название которой подчеркивает близость к береговой черте. Правда, положение ядерной физики в последние десятилетия определить не так просто. С одной стороны, ядерная физика уже довольно далеко отошла от береговой черты и заняла устойчивое положение на материке познанного, с другой стороны, она не может существовать без физики элементарных частиц. Физика элементарных частиц по идее должна формировать береговую черту. Однако, само понятие *элементарная частица* не неизменно, а следовательно, непросто указать место береговой черты.

Другой пример. Сотрудники американской компании «Белл» Арно Алан Пензиас и Роберт Вудро Уилсон (Вильсон) в начале 1960-х годов исследовали, почему не удается избавиться от шумов радиоаппаратуры (радиофизика давно находится на материке познанного), и открыли реликтовое излучение, заполняющее Вселенную со времен ее возникновения. Исследование реликтового излучения – одна из возможностей получить сведения из далеких областей океана непознанного, понять, какова была Вселенная в первые мгновения ее возникновения. Неудивительно, что Арно Пензиас и Роберт Уильсон за свое открытие были удостоены Нобелевской премии по физике (1978 г.).

* * *

Написанные мною статьи, обзоры, монографии, прочитанные лекции – все, чем я занимался и в чем принимал личное участие, связано с физикой твердого тела: с физикой металлов и физикой магнитных явлений. Начиная с 30-х годов прошлого века использование квантовой механики при решении задач макрофизики стало общепринятым, и тем самым физика конденсированного состояния заняла, похоже навсегда, место на материке познанного. Конечно, это не означает, что в этой области нет белых пятен или недостаточно подробно исследованных областей. Не преувеличивая своих заслуг, могу сказать, что вместе со своими учителями и коллегами я принимал участие в ликвидации нескольких белых пятен в теории металлов и в теории магнетизма. Вопросы, о которых идет речь в этой статье, не слишком занимали меня тогда, когда я решал конкретные задачи. Я не задумывался, ликвидирую ли я белое пятно или только выясняю новые черты недоисследованного явления. Мне очень нравилось то, чем я занимался, а тему старался выбрать так, чтобы в результате выяснить нечто новое.

Мои интересы не ограничивались исключительно теми областями физики, в которые я пытался внести свой вклад. К сожалению, физика столь разнообразна, а методы теоретической физики столь сложны, что глубоко знать всю теоретическую физику я не мог. Похоже, Лев Давидович Ландау и Ричард Фейнман – последние энциклопедисты теоретической физики. Не сравнивая себя с гениями, могу честно признаться, что я знал много физиков-теоретиков, даже в моем непосредственном окружении, с более глубокими и широкими знаниями, чем у меня. Но мне было интересно, *что* происходит и в тех областях, где моего участия вовсе не было. Обзорные статьи и научно-популярная литература помогали знакомиться с тем, что происходило в океане непознанного, а главное, как меняет свои контуры береговая черта материка познанного.

* * *

Хорошо известно, что все окружающее нас состоит из микроскопических частиц. Их научились различать, исследовать, о них накоплено достаточно знаний, чтобы объяснять наблюдаемые явления и существование тел с самыми разными свойствами. Понимание строения материи – одно из основных достижений науки. Микроскопические частицы объединены в структуры разной сложности. Атомы, молекулы, твердые тела – примеры таких структур. Структуры можно расположить по мере их

усложнения. Возникает своеобразная лестница уровней, иерархия. Каждая структура имеет определенное место в иерархии, располагается на определенном уровне, как это условно показано в таблице 1.

Таблица 1



Эта таблица перечисляет объекты, которые изучает физика. Следует заметить, что название *макроскопические тела* выбрано ради стилистического единообразия. Объекты физики – не макроскопические тела или предметы с их устройством, а *вещества*, из которого они состоят (газы, жидкости, кристаллы, аморфные вещества, плазма и даже ядерная материя, из которых состоят некоторые звезды).

По таблице видно, что принадлежащий данному уровню объект состоит из того, что расположено на более низких уровнях. Молекулы состоят из атомов или ионов, атомы – из ядер и электронов, ядра – из протонов и нейтронов. Видно, что не обязательно все объекты нижнего уровня входят в состав объекта с верхнего уровня. Есть тела, состоящие из ионов, а есть тела, в которых ионов в идеале нет совсем, а если случайно там окажется ион, то воспринимается он как примесь. Не всегда для ответа на вопрос, из чего состоит данный объект, надо обращаться к соседнему нижнему уровню. Так, ядерная материя состоит из ядер, а в металлах и в плазме кроме ионов есть электроны, не входящие ни в ионы, ни в нейтральные атомы.

Надо подчеркнуть, что таблица эта не полна. Нет в ней фононов, нейтрино, хотя теперь хорошо известно, что и фононов

и нейтрино во Вселенной очень много. Строго говоря, их надо поместить на нижний уровень. Мною руководило желание зафиксировать здесь те объекты, которые помогают ответить на вопрос, из чего состоит то, что нас окружает, то, что непосредственно мы ощущаем, что используем. Мы убедимся ниже, что опущены не только фононы и нейтрино.

Отсутствие уровней под уровнем «электроны, протоны, нейтроны» означает, что при составлении схемы принято электроны, протоны и нейтроны считать *элементарными*. Как известно, нейтрон нестабилен, время жизни его в свободном состоянии около 15 минут. Нейтрон превращается в протон, электрон и нейтрино (точнее – в антинейтрино). Так как в нерадиоактивных ядрах нейтрон стабилен, а по атомно-ядерным масштабам времени 15 минут это по сути бесконечность, то наравне с протоном его можно считать таким же элементарным, как протон. Нередко сходство протона и нейтрона подчеркивают и называют обе частицы *нуклонами*. Обрыв схемы на нуклонно-электронном уровне уже несколько устарел. Строго говоря, под ним есть еще один – *кварковый*. Но об этом будет сказано потом.

Ядра и ядерная материя выделены в отдельный уровень. Все ядра, кроме ядра атома водорода, – сложные структуры, состоящие из нуклонов. Тяжелые ядра при их субмикроскопическом размере напоминают макроскопические тела. Успех имела глубокая аналогия ядра урана с каплей жидкости, позволившая понять природу распада ядра урана под воздействием нейтронов. Но ядерная материя существует и в поистине макроскопических масштабах. Она заполняет внутренние области звезд. Открыты нейтронные звезды, которые целиком состоят из нейтронов.

Схему завершает Вселенная. В последние десятилетия Вселенная целиком, как некая структура, изменяющаяся с ходом времени, – объект изучения физики.

Не укладываются в приведенную схему пространство и время. До работ Эйнштейна в начале XX века пространство и время не были, строго говоря, физическими объектами. Большинство физиков они воспринимались априорными понятиями, существующими для описания всего, что есть и происходит в Мире. Объединив пространство и время в четырехмерное пространство-время и показав, что его геометрия зависит от существующей в нем материи, Эйнштейн «перенес» пространство и время из умозрительной философии в физику. Заняв в ней прочное место, они стали объектом внимательного анализа, но, как оказалось, на карте науки их постигла необычная судьба.

Экспериментальное подтверждение удивительных предсказаний Эйнштейна, таких как искривление луча света или изменение хода времени, казалось, навечно поместило новые для физики объекты на материке познанного. Но требования к глубине понимания растут неудержимо. Ситуация изменилась: пространство-время сейчас далеко в океане непознанного. Это произошло не потому, что выяснилась ошибочность эйнштейновских теорий. Нет! Они безукоризненно описывают тот круг явлений, для понимания которых были созданы. Однако понимание фундаментальной роли квантовой механики изменили наши требования. Логика развития субатомной физики потребовала построения квантовой теории гравитации. Пока это не удается. И, похоже, что до понимания далеко. Предстоят увлекательные экспедиции по океану непознанного. Но об этом позже...

* * *

Знание того, из чего состоит все в природе, не является самоцелью. Оно *необходимо* для понимания всего, что нас окружает: свойств тел и веществ, из которых они состоят, природных явлений любого масштаба и результатов самых разных экспериментов. Необходимо, но *не достаточно*. Заведомо нужно знать те законы, которые управляют поведением соответствующих объектов. Изучение объектов каждого уровня привело к открытию и/или выводу различных законов и правил, свойственных объектам каждого уровня. Нет договоренности, какие из утверждений, формулировок, правил именовать законами. Законов очень много, пожалуй даже слишком. Одна из трудностей изучения физики (и, признаюсь, преподавания ее) – в необходимости знать их или, что даже важнее, понимать, что они существуют, и при необходимости уметь эти законы вспоминать или выводить, чтобы понимать, как их использовать, и четко знать границы их применимости. Это особенно важно.

Усложнение объектов снизу вверх по схеме подсказывает: физика ставит себе задачу уметь понять (осмыслить) законы, действующие на любом из уровней, на основе свойств частиц, которые принято считать элементарными. Это выделяет законы, управляющие движением элементарных частиц. Они воспринимаются как *основные законы природы*.

Размер статьи не позволяет описать основные законы природы сколько-нибудь подробно. Ограничимся лишь тем, что назовем разделы современной физики, в которых основные законы формулируются и используются. С их помощью описываются элементарные частицы: их движение, превращение и образова-

ние из них всего, что расположено на вышестоящих уровнях. Эти разделы – *квантовая механика* и *теория относительности*, или *релятивистская механика*. Принято отдельно называть *электродинамику*, хотя в применении к элементарным частицам она не столь специфична, как это было, когда механика Ньютона и электродинамика Максвелла исчерпывали основные законы природы. Особняком (надеюсь, только пока) стоит *теория гравитации*. Часто ее называют *общей теорией относительности*. Среди физических объектов есть макроскопические тела, состоящие из огромного количества частиц. Поэтому специфические разделы физики, предназначенные для исследования конгломератов частиц, входят в число основных законов природы. Это *статистическая термодинамика* и *физическая кинетика*. Не удивляйтесь, что мы присоединили их к законам, которые нужны для понимания свойств элементарных частиц. Для этого есть основания. И не только их важность. Оказывается, даже такое, казалось бы, очевидное понятие, как *отдельная частица*, строго говоря, требует пересмотра, когда мы пытаемся добраться до самой сути. И при этом знание законов, управляющих совокупностями частиц, необходимо.

Наверное, у каждого интересующегося устройством Мира есть своя точка зрения на то, какой уровень понимания его удовлетворяет. Я не предполагаю, что все размышляют на эту довольно абстрактную тему, но и интересующихся много. Я принадлежу к их числу. Мне очень хочется, чтобы понимание устройства Мира привело к сравнительно простой картине. Поэтому так заинтересовали меня книги, перечисленные ниже в списке литературы. Все они написаны крупными учеными. Два автора – Стивен Вайнберг и Шелдон Глэшоу – Нобелевские лауреаты по физике. Название книги С.Вайнберга «Мечты об окончательной теории» может служить заглавием ко всему перечню. Обратим внимание, что предполагается одна *окончательная теория* – теория, из которой выводятся все теории, описывающие поведение всех физических объектов на всех уровнях таблицы 1. Забегая несколько вперед, скажу: окончательная теория не создана, хотя, по-видимому, не потеряна надежда на возможность ее построения. Не окажется ли желанная окончательная теория столь неожиданной, что будут утрачены те важные элементы простоты, с которыми мы сроднились, прежде всего – законы сохранения? По-видимому, нет. Современные фундаментальные науки, вопреки такому предположению, не то что опровергают, а обосновывают (выводят) законы сохранения энергии, импульса, заряда.

Выше говорилось, что понимание явлений и свойств *начинается* со знания свойств элементарных частиц. Надеюсь, всем понятно, что использованный глагол «начинаться» здесь не означает, что развитие физики началось с субатомных частиц. Логика структуры современной физики показывает, что, придерживаясь описания от более простого к более сложному, от состоящего из меньшего числа частиц, к более крупным объектам, надо начинать снизу и двигаться вверх по стрелкам.

Свойства частиц в какой-то мере можно описать, используя обычный язык, например сказав, что электрон и протон – заряженные частицы и что их заряды одинаковы по величине и противоположны по знаку. Если еще добавить, что утверждение относится к любой паре электрон-протон, и обобщить сказанное, подчеркнув, что все электроны (как и все протоны) не только имеют одинаковые заряды, но они принципиально неразличимы, то словесное утверждение будет очень важным свойством, не учитывая которое невозможно подняться даже на вторую ступеньку схемы.

Но словесного описания недостаточно. Необходимо знание численных характеристик. Не зная численного значения величины заряда электрона и протона, невозможно построить теорию простейшего атома – атома водорода. Мало того, надо знать значение масс электрона и протона. Построение теории атома – задача квантовой механики. В уравнение квантовой механики (его называют уравнением Шредингера) входит постоянная Планка – еще одно число. Можно построить и релятивистскую теорию движения электрона, но надо при этом воспользоваться уравнением Дирака, а в него, как во все релятивистские формулы, входит скорость света. Но мы еще не перечислили все индивидуальные черты (свойства) электрона. Как ни странно, электрон обладает *собственным* моментом количества движения – спином. Не за счет того, что он движется вокруг какого либо центра, как в атоме водорода, например, а всегда, в каком бы состоянии он ни находился. В таблице 2 приведены все перечисленные в тексте численные характеристики частиц, которые заполняют нижний уровень таблицы 1. Конечно, в эту таблицу мы не поместили постоянную Планка и скорость света. Они, будучи характеристиками современного научного знания, принадлежат не отдельным частицам, а всей физике. Постоянную Планка и скорость света именуют *фундаментальными константами* (см. таблицу 3). До последней четверти прошлого века никто не сомневался, что все электрические заряды в природе равны целому числу элементарного заряда, а электрон и протон явля-

ются носителями элементарного заряда – каждый со своим знаком. В свободном пространстве не были обнаружены частицы с зарядом, меньшим электронного, или с нецелочисленным электронным зарядом, а поисков было предостаточно. Однако на упоминавшемся кварковом уровне дело обстоит не так, но об этом – позднее. А пока будем по-прежнему считать численное значение заряда электрона и протона фундаментальной характеристикой и оставим его в таблице 2.

Таблица 2

	электрон	протон	нейтрон
заряд	$-1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл	$+1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл	0
масса	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг	$1,673 \cdot 10^{-27}$ кг	$1,674 \cdot 10^{-27}$ кг
спин	1/2	1/2	1/2
магнитный момент	$1,01 \mu_e$	$2,79 \mu_p$	$-2,79 \mu_p$

Таблица 3

скорость света c	299792458 м/с
постоянная Планка \hbar	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
гравитационная постоянная G	$6,673 \cdot 10^{-11}$ м ³ · кг ⁻¹ · с ⁻²

Сделаем несколько замечаний к таблицам 2 и 3. В них приведены приближенные значения всех величин. Все они известны с гораздо большей точностью. Обратите внимание: нейтрон чуть тяжелее протона, что обеспечивает возможность распада нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Спин – квантовый вектор, он может ориентироваться в пространстве только двумя способами: либо вдоль оси, либо против. В свободном пространстве направление оси произвольно. Спин, равный 1/2, означает, что величины проекции собственного момента количества движения частицы равны $\pm(1/2)\hbar$. Величины μ_e , μ_p – это значения магнитных моментов электрона и протона согласно теории Дирака без поправок, $\mu_e = (e\hbar)/(2m_e c)$, где m_e – масса электрона, $\mu_p = (e\hbar)/(2m_p c)$, где m_p – масса протона. То, что у нейтрона магнитный момент не равен нулю, хотя он нейтрален, свидетельство того, что нейтрон «состоит» из заряженных частиц.

Глядя на таблицу 2, закрадывается мысль: много непонятного. Например, почему нет среди характеристик частиц их ради-

уса? Оказывается, надо считать, что электрон – точка. Именно так! Хотя, по-видимому, это вносит в теорию много осложнений. Попытки ввести конечный радиус, которые делались разными способами, не увенчались успехом. Значит, точка. Но ведь она крутится! У нее есть собственный момент количества движения – спин. Как же так? А то что точка имеет массу и заряд, меньше удивляет? Посчитать нуклоны точками не удастся: протон и нейтрон занимают некое пространство – сферу радиусом порядка 10^{-15} метра. Значит, протон в 100000 раз меньше атома. Запомним этот факт и обратим внимание, что в таблице 2 есть еще одна строка, согласно которой все три частицы – электрон, протон, нейтрон – магнитики, правда очень маленькие, сверхмикроскопические. Значения их магнитных моментов приведены. И так как мы упомянули уравнение Дирака, то имеем право сказать: теория (квантовая электродинамика) позволила вычислить величину магнитного момента электрона с огромной точностью (с 13 знаками после запятой), и она совпала с экспериментом. Обратите внимание, какой точности достигает эксперимент! Значит, кое-что объяснено.

Однако на данном этапе нашего изложения не это самое важное. При построении теории атомов и молекул не слишком важно, каким путем выяснены численные характеристики элементарных частиц: получены они в результате экспериментов или как следствие более глубокой теории. Для того чтобы подниматься вверх по ступеням лестницы таблицы 1, достаточно знать об элементарных частицах то, что записано в таблице 2, добавив сведения о действующих между частицами силах. Силы, действующие между заряженными частицами, известны. Их описывает закон Кулона, хорошо знакомый по школьной физике. А какие силы действуют между нуклонами? Не зная их, нельзя даже пытаться строить теорию ядер атомов. Ясно, что не электрические силы удерживают протоны и нейтроны в ядре. Ведь достоверно известно, что в ядрах нет отрицательно заряженных частиц. Но есть специфические силы взаимодействия между нуклонами. Их природа понята, они подробно описаны. Их называют *ядерными силами*, а взаимодействие с их помощью – *сильным взаимодействием*. Мы вернемся еще к сильному взаимодействию. Пока только подчеркнем: введи мы в таблицу 2 информацию о ядерных силах – все, что надо для построения грандиозного здания физики, у нас есть.

Но в каждом научном поколении из века в век, к счастью, существуют ученые, ощущающие потребность углубиться, выяснить происхождение свойств всего, с чем приходится иметь дело

в процессе создания научной картины Мира. Они готовы пренебречь понятием «элементарные», чтобы попытаться найти ответ на вопрос: почему у частиц, названных элементарными, именно такие свойства, а не какие-то другие?

Хотя по совсем другому поводу, но прекрасно выразил эту эмоцию Борис Пастернак:

Во всем мне хочется дойти
До самой сути....
До оснований, до корней,
До сердцевины.

И поэт понимает, что выполнить желаемое необычайно трудно. Есть один путь:

Свершать открытия.

Пример «свершения открытий» будет приведен. А пока отметим: описание частиц, которое должно служить исходным для понимания структуры и свойств атомов и молекул, может и *должно* содержать не только числа, но и более сложные математические понятия. Как было уже показано, например – *векторы*. Не зная значений спина электрона и его магнитного момента (спин и магнитный момент – векторы), невозможно было бы построить теорию атомов и молекул, понять природу магнетизма атомно-молекулярных частиц.

Думаю, таблица 1, изображающая иерархию объектов, изучаемых физикой, не будет изменена. Возможно, к ней добавятся новые уровни. Об одном – кварковом – уже упоминалось, и мы к нему вернемся. Необходимо будет добавить уровень или даже уровни для темной материи и темной энергии непосредственно под самым верхним уровнем «Вселенная». Но уровни, которые уже есть в таблице 1, не могут быть ни отменены, ни заменены какими-либо другими: ведь атомно-молекулярное строение материи, существование планет, звезд, галактик и их скоплений – объективная реальность.

Наука – одна из наиболее динамичных сфер человеческой деятельности. Физика в этом процессе долгое время лидировала. Сейчас, пожалуй, наиболее быстро развивается молекулярная биология. Но ведь по большому счету молекулярная биология – часть физики. Мы даже укажем ее место в таблице 1.

В сферу научного исследования попадают объекты, ранее недоступные. Иногда они находятся в глубинах материи, иногда бесконечно удалены от Земли. А иногда они создаются: обычные вещества помещают в искусственно созданные условия или

создают объекты, не существующие в природе, например печатные схемы, транзисторы, графен – моноатомную пленку углерода. Экспериментальная техника, теории и вычислительные возможности – все методы исследования совершенствуются с такой быстротой, что ощущение отставания нередко возникает в процессе работы над только что актуальной темой. Часть идей бесследно исчезают, оставаясь, возможно, интересными и важными только дотошным историкам науки. Лишь некоторые идеи навсегда остаются в поле зрения активно действующих ученых. У них завидная судьба: в дальнейшем они приобретают ореол классических.

Но вот что удивительно: основные представления квантовой механики и теории относительности не потребовали изменений. Самые неожиданные открытия удается объяснить, не прибегая к пересмотру основ. Как тут ни удивляться?! Созданные на малютке Земле, они справедливы в просторах Космоса. Для их формулировки, кроме сосредоточенной мысли, потребовались опыты, которые производились приборами, размещавшимися на лабораторном столе, а результаты, которые получены на гигантских ускорителях или с помощью телескопов, вынесенных за пределы Земли, не требуют их пересмотра.

Приведенная схема – структура современной физики – обладает важнейшим свойством, свидетельствующим о достигнутом уровне развития науки о природе. Назовем его условно *научным консерватизмом*. Физика непрерывно развивается и изменяется. Научный консерватизм проявляется в поразительной устойчивости приведенной схемы. Либо новые открытия сдвигают береговую черту материка познанога, либо заполняют белые пятна, существовавшие на материке. Бывает, что к открытию приводит обнаружение белого пятна – возможности существования чего-то ранее неизвестного. На протяжении более полувека приведенная схема при этом не подвергалась сомнению. Не только в том смысле, что не подвергалась сомнению атомно-молекулярная структура материальных тел, но и не возникала необходимость пересмотра основ. Пока. Даже тогда, когда открытие произошло вне материка познанога.

* * *

Важным достижением науки является понимание, на какой уровень следует поместить практически любой объект макромира и из чего, скорее всего, надо исходить в попытках объяснить обнаруженное явление или свойство. Каждый объект неживой природы, каждое явление находит свое место на определенном

уровне. Любая естественно-научная дисциплина (не только раздел физики) имеет свое место на схеме. Место химии – на уровне «атомы, ионы, молекулы», геологии и метеорологии – на уровне «макроскопические тела», геофизики и астрофизики – здесь же. Даже биофизика (физика живого и молекулярная биология) легко находит свое место на схеме – на уровне «атомы, ионы, молекулы».

Как нарисованная схема связана с представлением о материке познанного и об океане непознанного? Согласно более или менее общей точки зрения все, что на всех уровнях, кроме нижнего и верхнего, находится на материке познанного. Это означает, что схема фиксирует: нам известно, из чего состоят объекты (структуры) на всех уровнях, кроме верхнего и нижнего, и, по крайней мере в общих чертах, известны основные законы, которым подчиняется поведение этих объектов. Как мы уже говорили, на карте материка познанного есть белые пятна и достаточно много плохо изученных областей. Почти в каждой из этих областей – свои важные, интересные, специфические задачи.

Граница материка познанного не зафиксирована. Развитие науки расширяет его границы. Например, ядерная физика лишь сравнительно недавно перенесена из океана непознанного на материк познанного. Структура атомных ядер в основном была ясна сравнительно давно. После открытия нейтрона (Джеймс Чедвик, 1932 г., Нобелевская премия 1935 г.) несколько физиков высказали предположение, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Предположение подтвердилось. Однако природа сил, действующих между нуклонами, была понята значительно позже. Думаю, тех, кто посвятит себя исследованию нейтронных звезд и других космических объектов, состоящих из нуклонов, ожидает много неожиданностей. Но, разгадывая загадки, исследователь может опираться на то, что известно о нуклонах. Поэтому-то эти структуры находятся на материке познанного. Остановился на ядерной физике, потому что она одна из последних нашла свое место на материке познанного. Сравнительно недавно она была на нижнем уровне, наряду с нуклонами и электронами. Надо сказать, что, как мы увидим, нуклоны уже тоже можно считать принадлежащими материке познанного. Научно-популярная литература неизбежно отстает от жизни науки. Она всегда в прошлом. Кто-то даже высказал совсем еретическую мысль: энциклопедии содержат то, чем *уже* не занимаются ученые. Но само существование энциклопедий свидетельствует о том, что для движения науки вперед знание того, что наука освоила в прошлом, абсолютно необходимо.

Можно сказать совсем просто: новое открытие либо не отменяет старые, либо указывает, в чем допущена ошибка при открытии или описании установленного. Или, согласно сказанному выше: попавшее на материк познанного не покинет его, пока ученые не убедятся, что на материк попало нечто в результате ошибки. Такое случается относительно редко. Думаю, большинство ученых верят, что *наука накапливает истинные знания о природе*. Поэтому наука консервативна. Нет необходимости с каждым новым открытием пересматривать все полученные ранее результаты. Или, иными словами, открытие нового свойства, явления на одном из уровней (на любом, даже на самом нижнем и самом верхнем) не требует уже для своего объяснения смены или пересмотра *основных законов природы*, а также результатов, полученных на уровнях, расположенных ниже.

В формулировке важно наречие *уже*, т.е. *теперь, в настоящее время*. По масштабам истории (но не истории физики!) недавно, в прошлом веке, произошла научная революция. Рождение квантовой механики и теории относительности – грандиозные завоевания бескровной научной революции.

* * *

Приведем три примера для лучшего понимания термина «научный консерватизм».

Первый пример. Более сорока лет сверхпроводимость была дразнящей загадкой. Казалось, объяснить, почему электроны с понижением температуры начинают двигаться по металлу без сопротивления, удастся, только отказавшись от основ теоретических представлений о металлах. Предполагали даже, что нечто, чего мы пока не знаем, есть в самих электронах, что проявляется только тогда, когда металл переходит в сверхпроводящее состояние. Ныне сверхпроводимость принципиально объяснена. Это не потребовало отмены теории металлов и, тем более, открытия каких-то ранее неизвестных свойств электронов. Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шриффер поняли, что *обычные* электроны, благодаря обычному электрон-фононному взаимодействию – тому самому, которое является причиной температурной зависимости сопротивления в нормальном состоянии металла, – при низких температурах могут образовать пары. И эти пары, как они показали, движутся по металлу без сопротивления. Загадочное явление сверхпроводимости получило объяснение. Авторы заслуженно получили Нобелевскую премию, а Бардин (редчайший случай) – даже вторую (первую премию

вместе с Уильямом Шокли и Уолтером Браттейном Бардин получил за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта). Консерватизм проявился в том, что объяснение загадочного явления не потребовало революционных преобразований в понимании структуры металлов. Надеюсь, это мое утверждение не умаляет заслуг авторов теории. Они проявили не только высокий профессионализм, но и редкую нестандартность мышления. Все знали о существовании слабого электрон-фононного взаимодействия, но не смогли преодолеть привычного представления о том, что слабое притяжение не может быть причиной образования связанного состояния (пары). Оказалось, может.

Второй пример, наверное, более убедителен. В прошлом многим ученым – их называли *виталистами*, или сторонниками *витализма* – казалось, что для объяснения феномена жизни на микроскопическом уровне необходимо обнаружить какие-то особые свойства атомов и молекул. Активность живых организмов для виталиста – результат действия специфической «жизненной силы». Такая точка зрения высказывалась до замечательных успехов молекулярной биологии. Однако для понимания механизма наследственности, скажем, не потребовалось пересматривать известные физические свойства атомов и молекул или дополнять их новыми. Все полученные впечатляющие результаты молекулярной биологии не потребовали обнаружения у молекул и атомов, из которых состоят белки, ДНК, РНК, т.е. у макромолекул, осуществляющих специфические свойства живых организмов, каких-то особых свойств, которые отсутствуют у других атомов и молекул. Конечно, это не означает, что можно произвольно менять в белках, ДНК, РНК одни атомы на другие, не влияя на протекание жизненных процессов. Живой организм предельно чувствителен к составу входящих в него молекулярных структур. Но объяснение любого свойства, характерного для живого организма, насколько я знаю, всегда осуществляется пониманием того, как перемещаются из одной структуры в другую атомы или куски молекул. Происходит это строго по тем же законам физики, что и реакции в неживой природе. И никогда не была обнаружена особая «жизненная сила».

А вот и третий пример, относящийся к самому нижнему уровню. Долгое время существовала загадка β -распада – излучения радиоактивным ядром электрона. Бета-распад – результат распада нейтрона на протон и электрон. В чем была загадка? В том, что при каждом акте распада с несомненностью нарушался закон сохранения энергии. Вопиющее нарушение одного из

наиболее фундаментальных законов природы, к тому же в элементарном процессе, ставило в тупик. Нильс Бор даже высказал крамольную идею, что закон сохранения энергии имеет статистическую природу, выполняется только в среднем, а в каждом отдельном акте может нарушаться. Положение изменилось, когда Вольфганг Паули (в 1930 году неофициально, а в 1933 официально на Сольвеевском конгрессе) высказал утверждение, что вместе с электроном из ядра вылетает нейтральная частица, получившая в дальнейшем название *нейтрино*, уносящая часть энергии – ту, которой не хватало для выполнения закона сохранения. Нейтрино очень сложно обнаружить непосредственно, но в конце концов это удалось. Еще до его обнаружения научный мир согласился с тем, что β -распад сопровождается вылетом трудно уловимого нейтрино. Картина β -распада усложнилась или упростилась? Конечно, упростилась. Признание нарушения законов сохранения энергии и/или импульса в каждом физическом процессе означало бы катастрофу – непоследовательность всей стройной естественно-научной картины природы. Подчеркнем, что открытие нейтрино подтвердило консервативность физических законов: установленный на совершенно других, макроскопических, явлениях, закон сохранения, как выяснилось, не нарушается и тогда, когда в явлении участвуют элементарные частицы.

* * *

Знание строительного материала для всего, что составляет окружающий нас Мир и мы сами, единство законов природы во всем познанном Мире, понимание, что область принципиально понятого непредставимо огромна – все это внушало и внушает чувство, похожее на восторг и на благоговение. Вот как я описал свои ощущения в статье «Из чего все состоит», опубликованной несколько лет назад в журнале «Наука и жизнь»:

«Ночью, когда в небе нет облаков, не видна Луна и не мешают фонари, небо заполнено ярко сияющими звездами. Не обязательно искать знакомые созвездия или стараться найти близкие к Земле планеты. Просто смотрите! Постарайтесь представить себе огромное пространство, заполненное мирами и простирающееся на миллиарды миллиардов световых лет. Только из-за расстояния миры кажутся точками, а многие из них так далеки, что не различимы в отдельности и сливаются в туманности. Кажется, мы – в центре мироздания. Теперь мы знаем, что это не так. Отказ от геоцентризма – заслуга науки. Потребовалось много усилий, чтобы было осознано:

малютка Земля движется в случайном, казалось бы ничем не выделенном, участке необозримого (буквально!) пространства.

Но на Земле зародилась жизнь. Она развилась столь успешно, что сумела произвести человека, способного постигать окружающий его мир, искать и находить законы, управляющие природой. Достижения человечества в познании законов природы столь впечатляющи, что невольно испытываешь гордость от принадлежности к этой щепотке разума, затерянного на периферии заурадной Галактики.

Учитывая разнообразие всего, что нас окружает, поражает воображение существование общих законов. Не менее поразительно то, что все построено из частиц всего трех типов – из электронов, протонов и нейтронов».

К восторгу (оправданному, по-моему) добавим несколько чисел. Они смогут помочь представить себе материк познанного и даже оценить океан непознанного.

Современные телескопы помогают ученым улавливать электромагнитные волны, дошедшие до Земли от источников, расположенных на расстояниях более десяти миллиардов световых лет. Расшифровывая их, умеют получать достоверную информацию, позволяющую сделать вывод, что представляет из себя источник. За год свет проходит приблизительно 9460730472580820 метров. Если чуть округлить, 1 световой год составляет 10^{16} метров. Значит, современная физика обладает информацией, получаемой из сферы, радиус которой около 10^{27} метров. Сколь ни огромен радиус сферы, все же ограничение есть: из более далеких областей Вселенной получить непосредственную информацию пока не удается.

Ограничение есть и в получении информации из глубин материи. Если исходить из таблицы 1, то физике доступна информация об источниках, размер которых приблизительно равен или больше 10^{-15} метра. Таков приблизительно радиус нуклона. Нуклоны признаны элементарными частицами. Теперь представим себе шаровой слой, внешний радиус которого порядка 10^{27} метров, окружающий сферический слой, малый радиус которого в 10^{42} раз меньше радиуса внешней границы слоя. Если вспомнить сказанное обо всем, что расположено на схеме между верхним и нижнем уровнями, то придем к выводу, что шаровой слой – схематическое изображение материка познанного.

Мы подчеркивали, что на материке познанного есть множество белых пятен, т.е. множество фактов, явлений, свойств до сих пор не получили объяснения. В чем же разница между белым пятном и «пространством» вне материка познанного?

Главное отличие в том, что, имея дело с объектом или явлением, заведомо принадлежащем материке познанного, мы уверены: *все* происходящее в неживой природе со *всеми* состоящими из электронов и нуклонов объектами *может быть уже понято на основе известных законов*. Точнее надо сказать так: *до настоящего времени* на материке познанного не обнаружено ничего, что противоречит *уже* установленным законам. А ведь ныне обнаруженных и понятых фактов неописуемо много. Многие факты – явления, свойства – раньше были предсказаны, а потом обнаружены, что особенно важно для уверенности в истинности понимания открытых законов. Конечно, почти каждый новый результат потребовал усилий и удачи. Есть настолько удивительные явления, что для понимания их природы и построения их теории понадобились глубокие идеи и нетривиальные расчеты, но *все они основывались на известных законах и являются их следствием*. Так было, напомним, не всегда, но со второй половины XX века это так.

Многие, а возможно почти все, активно и плодотворно работающие ученые-естественники, исходя из подобных рассуждений, а некоторые, не задумываясь, а следуя традиции, абсолютно уверены, что имеют вполне надежную основу как для получаемых результатов исследований, так и для выводов из них. Эта уверенность не противоречит тому, что все, находящееся на материке познанного, не исчерпывает информацию, которой владеют физики. Будем считать, что для физиков это сигналы из океана непознанного. О чем идет речь? Здесь укажу только на обнаруженные частицы – мюоны и особые мюонные нейтрино. Мюоны похожи на электроны, но тяжелее их приблизительно в 200 раз. Какова их роль в Мире, пока не вполне ясно. Будут и другие примеры.

Но вот что важно: физики, исследования которых относятся к области вне материка познанного, не сомневаясь, пытаются делать выводы, основываясь на тех же законах, которые успешно действуют на материке познанного. Ими руководит такая мысль: сколько раз казалось, что обнаружено нечто необъяснимое, но объяснение удавалось получить, не пересматривая квантовой механики и релятивистской теории. Каждый раз оказывалось, что фундамент надежен и для сомнений нет оснований. Возможно, правда, пока.

Восхищение непредставимыми размерами материка познанного несколько тускнеет, а бывает и исчезает, когда задумываешься, сколь неоднородно исследован материк познанного. Еще более грустные и тревожные мысли приходят в голову, когда

вспоминаешь, как по-разному использует человечество приобретенные им знания. Речь пойдет о двух недостаточно хорошо освоенных областях на материке познанного. Обе они находятся на том уровне, который предоставлен макроскопическим телам, конкретно – о *метеорологии* и *геофизике*. Обе они изучают Землю – место нашего обитания. О заселении других планет идут только разговоры. Судьба человечества пока неразрывно связана с Землей.

Великие географические открытия – далекое прошлое. Шли годы. Корабли избородили все океаны и моря, открыты и исследованы не только все материки, но и любые клочки суши, которые трудно разглядеть на самых подробных картах, люди побывали на обоих полюсах Земли, заселили научными станциями покрытый вечным ледяным покровом самый неприветливый материк Антарктиду, покорили вершину мира Эверест, сделав его доступным альпинистам. Наверное, еще есть места, куда нога человека не ступала, но причина этого не в невозможности туда попасть, а в отсутствии желания, в понимании, что экспедиция туда никакого ценного знания скорее всего не принесет.

Не только в эпоху великих географических открытий, а и в близкие к нам времена усилия, которые тратили люди, достойны памяти. История сохранила навеки имена многих. Хочется вспомнить, например, английских исследователей Африки Давида Ливингстона (1813–1873) и Генри Мортон Стэнли (1841–1904). Ливингстон был первым европейцем, увидевшим водопад Викторию, а Стэнли разобрался с тем, где начинаются великие реки Нил и Конго. Почему я вспомнил именно о них? Потому что они полностью посвятили свои жизни ликвидации белых пятен на мало изученном материке. Описанием их путешествий я зачитывался в юности. И не только: будучи взрослым, с интересом читал их собственные сочинения. Советую.

Понимаю, вы прекрасно знаете, что Земля подробно исследована. Но будем точны: речь идет не о Земле, а о поверхности Земли, о *географии*, а не о *геофизике* и *метеорологии*. Геофизика изучает процессы, которые происходят в толще Земли, а метеорология – в ее атмосфере. Об атмосфере известно много, а о внутренности Земли – меньше, и знания более схематичны. Причина ясна: внутрь трудно заглянуть. Мне показалось, что, скажем, у атомной или ядерной физики накоплен заметно больший запас знаний о подведомственных им «территориях», чем у геофизики и даже метеорологии. Возможно, мое впечатление ошибочно.

Освоенность материка познанного определяется не только накопленным на нем знанием, но и тем, как знание используется. Развитие техники невозможно без научных достижений, а эволюция образа жизни в большой степени определяется техническими возможностями. Особенно ощущается это в последние годы, когда заметные изменения происходят за время, которое зачастую много меньше времени жизни одного поколения, и нетрудно проследить, как и какое научное открытие привело к тому или иному техническому результату, заметно изменив нашу жизнь.

Есть разные точки зрения относительно того, полезно или вредно ускорение прогресса. Не берусь высказывать свое мнение, оно у меня не выработалось. Но есть две сферы человеческой деятельности, неразрывно связанные с наукой, о которых я думал и смогу высказать свое вполне определенное мнение, сравнивая их.

Думаю, все хорошо знают, каких усилий и, прежде всего, концентрации научного интеллекта потребовалось для создания невиданного ранее атомного, или, более точно, ядерного оружия. Ученых, которые создали атомную и водородную бомбы для Соединенных Штатов и их союзников, я знаю по их научным трудам. С некоторыми из основных участников Советского атомного проекта был знаком лично. Исаак Константинович Кикоин, Юлий Борисович Харитон, Яков Борисович Зельдович, Андрей Дмитриевич Сахаров... – все они были не просто очень крупными учеными, они были первыми в тех областях, в которых работали, и они были высокими интеллектуалами. Как и их коллеги за океаном, все свои способности, все свои силы, весь свой интеллект и весьма заметную часть своей жизни они посвятили созданию эффективного способа уничтожения. И государства не жалели затрат, чтобы замыслы ученых были осуществлены. Знаю, что всегда все или почти все, кто работал над созданием супербомб, были уверены, что заняты делом первой необходимости. Не со всеми аргументами согласен, но спорить я не хочу и не имею морального права – хотя бы потому, что сейчас они не могут мне возразить, а тогда, в первые годы после второй мировой войны, аргументы против создания атомной бомбы не приходили мне в голову. Свою задачу я вижу в другом: хочу подчеркнуть, что для решения задачи создания атомного оружия человечество необычайно эффективно, не жалея усилий и трат воспользовалось накопленным на материке познанного знанием, а там, где его не хватало, срочно его добывало.

В последние годы я неоднократно наблюдал ужасные последствия цунами, землетрясений, ураганов, торнадо. Неужели знаний всего научного сообщества не хватает, чтобы ну пусть не ликвидировать стихийные бедствия, а хотя бы вовремя и надежно предупреждать, чтобы была возможность принять адекватные меры? Особенно горько мне было, когда я видел гонящихся за торнадо молодых людей с кинокамерами на автомашинах или мотоциклах, как мне кажется, рискующими своей жизнью не столько в попытках получить необходимое знание о разрушительных явлениях, сколько в поисках сильных ощущений. Вспоминал я о бездне работ по гидро- и газодинамике, по кинетике газов и по неравновесной термодинамике, о теориях зарождения вихрей, т.е. торнадо и ураганов. Теоретики дискутируют между собой... Собрать бы ученых, мечтал я, интеллект которых соизмерим с тем, какой понадобился для создания атомного оружия. Не только был бы найден способ более раннего предупреждения, но удалось бы разработать эффективные меры ослабления кошмарных в настоящее время последствий штормов торнадо. Более того, мне кажется, наука об атмосфере находится уже на таком уровне, что пора задуматься, как воспользоваться накопленным знанием для решения более амбициозных задач, чем увеличение интервала предупреждения штормов и торнадо и даже установка ветряных генераторов электроэнергии. В то же время ощущаю беспокойство, даже, честно говоря, страх, когда по выделению энергии разряд молнии сравнивают со взрывом атомной бомбы. Неужели знания будут использованы не на спасение людей от атмосферных катаклизмов, а на их уничтожение, неужели будут созданы (возможно, уже созданы?!) устройства, которые призваны вызывать атмосферные катастрофы на территории противника?

С геофизикой, похоже, сложнее. В общих чертах строение Земли известно. Но достаточно ли накоплено знаний, чтобы осуждать ученых, которые не создали надежных, своевременных методов оповещения об опасности? Мне кажется, нет, недостаточно. Если так, то почему бы не сосредоточить усилия геофизиков мира с целью — понять, как и где происходит накопление энергии сдвигов тектонических плит? Именно она освобождается с такими катастрофическими последствиями при землетрясении. Процессы в недрах Земли происходят медленно. Только в момент непосредственной близости к неустойчивости процессы идут так стремительно, что подготавливаться к последствиям поздно. Приближение к неустойчивости, думаю, как-то себя обнаруживает. Неужели оно не может быть зафиксировано

и использовано для своевременного предупреждения? Сказанное почти дословно можно переадресовать и вулканологии.

Но вернемся к теме статьи.

Каждый уровень в таблице 1 по смыслу включает не только принципиально познанные объекты, но и исследования всего того, чему на этом уровне полагается находиться. Это относится и к границам материка познанного – к уровням *Вселенная и электроны, протоны, нейтроны*.

Сейчас речь пойдет о нижнем уровне. По идее, он охватывает область физики, в которой объектом исследования служат самые мелкие представители материального мира – элементарные частицы. Название трех из них мы поместили на схеме. Они этого заслуживают: электроны, протоны, нейтроны – строительный материал Вселенной. Все, что расположено и исследуется на более высоких уровнях, построено из них.

Раньше чем приводить список элементарных частиц, выясним, какой смысл физики вкладывают в понятие *элементарные частицы*.

Первое. Считается, что из элементарных частиц все построено, что они – мельчайшие крупинки материи. В разное время претендентами на «звание» элементарных были разные частицы. В конце XIX – начале XX веков элементарными считались *атомы*. Правда, их было слишком много. Издревле казалось, что простейших сущностей, из которых все построено, должно быть немного. А атомов было известно около ста. Сейчас, с изотопами, их открыто значительно больше.

Второе. Предполагается, что элементарные частицы истинно элементарны, другими словами просты, что они – предел дробления материи. Когда выяснилось, что атом состоит из ядра и электронной оболочки, а ядро – из протонов и нейтронов, атомы потеряли титул элементарных. Их титул унаследовали электроны, протоны и нейтроны.

Смена претендентов на элементарность не остановила исследований самых мелких частиц материи. С развитием техники ускорения и всего инструментария экспериментальной физики темп исследования возрос и с необычной быстротой начал приносить плоды: было открыто множество частиц, несомненно имеющих законное право располагаться на том же самом уровне, где находятся электроны, протоны и нейтроны. Второму признаку они заведомо соответствовали. Все новооткрытые частицы так и именовались – *элементарными*.

Открылся целый мир субмикроскопических частиц. Только три из них служат материалом строения составных объектов

материального мира. Систематизация субмикроскопических частиц потребовала новых характеристик открытых и открываемых частиц. Стало модным использовать для наименования этих новых характеристик слова из нефизического лексикона: странность, шарм, цвет, аромат... Появились цветные, странные частицы, с шармом и без. И ко всем частицам, оказалось, надо добавить и их античастицы: античастица электрона – позитрон, протона – антипротон. И позитрон, и антипротон имеют заряды противоположного знака по сравнению с соответствующими частицами. Но есть античастицы и у нейтральных частиц: у нейтрона – антинейтрон, у нейтрино – антинейтрино. Систематизация создает иллюзию понимания, но не только. Как правило, она есть важный шаг на пути к пониманию. Для понимания очень важно привыкание, иногда привыкание заменяет понимание. Но, не будем забегать вперед.

Остановимся и еще раз взглянем на схему. На нижнем уровне всего три хорошо и давно знакомые частицы. Мы к ним привыкли. А того, что мы о них знаем, достаточно для понимания их, пожалуй, главной роли – роли строительного материала всего во Вселенной, всего, что мы разместили *над* нижним уровнем.

Добавим на нижний уровень *фотоны* и *нейтрино*. В мировом пространстве и тех, и других очень много. Не назвав их, мы опустили бы нечто стабильно существующее во Вселенной и, добавлю, давно обнаруженное и хорошо изученное. Фотоны и нейтрино не входят в виде составных частей в атомы, молекулы или в какие-либо другие сложные материальные объекты. Существуют они в виде газов, заполняя мировое пространство. Об этих газах многое известно. Особенно о газе фотонов, именуемом реликтовым излучением (о нем уже упоминалось).

Вот теперь действительно названы все частицы, из которых состоит, построен окружающий нас Мир. Правда, в последние годы все более серьезно изучают нечто, что назвали *темной материей, состоящей из темной массы и темной энергии*, подчеркнув тем самым отсутствие осведомленности о природе этих субстанций. Признаюсь, когда впервые услышал о том, что темная материя составляет более 90% материи Вселенной, я уверенно заявил: «Рассосется!» Но вот в прошлом году Нобелевскую премию по физике получили ученые, своими астрономическими наблюдениями и расчетами предоставившие важный аргумент в пользу существования темной энергии. Существование темной массы, похоже, тоже не вызывает серьезных сомнений. Придется об этом не забывать. Они есть – значит, принадлежат Вселенной. Но куда их отнести? Проще всего считать, что они

находятся в океане непознанного. Когда мы будем заниматься самым верхним уровнем, мы вспомним о темной материи.

Вернемся на нижний уровень. Пока мы рассматриваем его как береговую черту океана непознанного. Повторим. Впечатляющие открытия, происходившие в основном во второй половине XX века, заполнили этот уровень несколькими сотнями частиц и открыли среди них необычные частицы, по-настоящему странные. Стало ясно: все они не могут претендовать на титул элементарных. Их слишком много. Как они появились там? Откуда они взялись?

Метафора «береговая черта океана непознанного» будит воображение. Она напоминает об экспедициях, о Генрихе Мореплавателе. Не знаю, как вы, а я смотрю с восторгом не только на многомачтовое парусное судно, но и на небольшую яхту, когда она маневрирует у совсем неметафорического берега Атлантики, недалеко от которого я живу последние годы.

Конечно, открытие неизвестных до того частиц обходится без плавания по неизведанным морям. Для этого нужно *только* разогнать какие-либо из известных микрочастиц, заставить их столкнуться с другими частицами – подобными или другого сорта. Не только столкнуть, но и посмотреть, что из этого получится. Может ничего нового не получится. Но иногда исследователям сопутствует удача, и им удастся увидеть нечто, чего не видел никто. Из океана непознанного наиболее удачливые исследователи, как и в давние времена их далекие предшественники, привозят золото: открытие новой частицы нередко завершается Нобелевской премией.

Сравнение экспериментов по обнаружению ранее неизвестных частиц с экспедициями прошлого, открывавшими неизвестные земли, кому-то покажется кощунственным. Мне не кажется. В оправдание скажу: недавно в интернете увидел статистику по годам работ с большим числом соавторов. Рекорд принадлежит физической работе, в которой участвовали 2512 человек (2006 г.). Уверен, она была сделана на гигантском ускорителе.

Столкновения атомных и субатомных частиц бывают самые разные. Одни похожи на столкновения упругих шаров: столкнулись и разлетелись. Другие напоминают разбивание каких-либо предметов.

Разрушив молекулу, мы ожидаем, что осколками будут ее части – то, из чего она *состоит*. Молекулу сравнительно легко разделить на атомы или ионы. Следовательно, молекула состоит из атомов или ионов. От атома легче отделить оболочку из

электронов, чем разделить ядро атома. Отсюда: атомы состоят из ядер и электронов. Ядра атомов состоят из нуклонов.

А как обстоит дело с элементарными частицами? Они, как мы думаем, ни из чего не состоят. Значит ли это, что столкновения между элементарными частицами всегда похожи на столкновения бильярдных шаров? Нет! Нет, хотя элементарные частицы и не могут быть разделены на составные части. Удивительное дело. С одной стороны, утверждается, что частица элементарна (т.е. проста, неделима), а с другой – что при столкновении с другой частицей (тоже элементарной!) появляются другие частицы. Любые? Нет, только такие, появление (рождение) которых не нарушает законов сохранения. Конечно, законов сохранения энергии и импульса, но не только. Сохраняются заряды, причем электрический не исчерпывает всех зарядов. Есть барионный и лептонный заряды. Барионный заряд указывает на принадлежность частицы к некому классу частиц, а именно к классу барионов – частиц типа протона и нейтрона. Лептонный заряд указывает на принадлежность к классу лептонов – частиц типа электрона, позитрона. К этому классу принадлежит и нейтрино. У протона и нейтрона барионный заряд равен $+1$, а у их античастиц он равен -1 . Лептонный заряд у всех барионов равен нулю. Аналогично, у электрона и нейтрино лептонный заряд равен $+1$, а у позитрона и антинейтрино он равен -1 . У всех лептонов барионный заряд равен нулю. Существуют у частиц и более экзотические характеристики. Мы их называли: цвет, странность... Некоторые характеристики при реакциях между частицами строго сохраняются, другие могут изредка нарушаться, что приводит к различию в вероятностях появления разных частиц.

Обилие частиц на нижнем уровне, боюсь, плохо увязывается с тем, что Мир, нас окружающий, состоит только из трех частиц. Дело в том, что большинство из сотен новооткрытых частиц нестабильны – они самопроизвольно распадаются. Один пример. Мы уже говорили, что нейтрон в свободном состоянии распадается. Схема его распада такова:

нейтрон \rightarrow протон + электрон + антинейтрино.

У нейтрона и протона барионные заряды одинаковы, их лептонные заряды равны нулю, электрон и антинейтрино имеют лептонные заряды противоположных знаков. Все перечисленные законы сохранения, как и следовало ожидать, выполняются. Раньше, говоря о распаде нейтрона, мы не уточнили, что рождается антинейтрино. Рождалось бы нейтрино, не выполнялся бы закон сохранения лептонного заряда. Заметим, что по

сравнению с сотнями новооткрытых частиц нейтрон живет очень-очень долго, а внутри нерадиоактивных ядер нейтрон и вовсе стабилен. Мы говорим об этом, чтобы вся материя не казалась нестабильной.

Итак, все частицы, кроме трех, распадаются, а фотон и нейтрино, родившись в какой-либо ядерной реакции, улетают в космос или поглощаются веществом. Они не есть строительный материал материи. А как дело обстоит с античастицами? Позитрон, антипротон и антинейтрон столь же стабильны, как электрон, протон и нейтрон. Почему же нет в природе антиматерии? Потому что при встрече частиц и античастиц происходит их аннигиляция. Вопрос, почему же существует материя, не такой праздный, как может показаться. Почему-то при образовании Вселенной, в момент Большого взрыва или в первые мгновения после этого, родилось больше частиц, чем античастиц. Преимущество частиц над античастицами сохранялось, чтобы потом ни происходило. Постепенно античастицы «вымерли». Сохранились только частицы. То, что античастицы – не выдумка, подтверждается экспериментом. Позитрон был открыт при исследовании космических лучей. Не из глубин Вселенной прилетел он, а появился на свет в результате столкновения первичной частицы с каким-нибудь из атомов земной атмосферы. В лабораториях античастицы рождаются при столкновениях и распадах наряду с частицами. Если их уберечь от встречи с частицами, то можно сделать античастицы участниками экспериментов и создать антиатомы. Это сделано! А вот понять, почему при рождении Вселенной нарушилась симметрия между частицами и античастицами, насколько я знаю, не удастся.

То, что мы поместили фотоны на нижний уровень, оправдано тем, что в космическом пространстве существует газ фотонов (реликтовое излучение). Он есть. Есть в космическом пространстве и нейтрино. Фотоны не служат строительным материалом материи, но в возникновении из элементарных частиц структур они играют важную роль – они осуществляют взаимодействие между заряженными частицами.

В этом месте чуть задержимся, чтобы вдуматься. Теория относительности утверждает, что никакой сигнал не может распространяться быстрее, чем свет. Значит, в природе не может быть дальнего действия. А как же закон Кулона, согласно которому сила, действующая между двумя зарядами, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними? Чуть сдвинули один из зарядов, сила между ними изменилась. Получается, второй заряд мгновенно «почувствовал» изменение силы? Такого быть

не может. И такого нет. Дело в том, что закон Кулона, строго говоря, точен для неподвижных частиц. Если частицы движутся, закон Кулона справедлив приближенно – тем лучше, чем скорость движения зарядов друг относительно друга меньше. Сравнивать надо скорости частиц со скоростью света. Говорят так: закон Кулона – нерелятивистский предел более точного выражения, получаемого в *квантовой электродинамике*. Строго и удивительно точно закон Кулона описывает *электростатическое* взаимодействие. «Удивительно» употребил я вполне осознанно. По-моему, несомненно заслуживает удивления существование точного закона, который справедлив и на космических расстояниях, и внутри атомов. Таков закон Кулона.

Как же описывает квантовая электродинамика взаимодействие заряженных частиц друг с другом? Хотя вывод формул требует применения вполне серьезных математических вычислений, понять природу взаимодействия между зарядами не слишком трудно. Квантовая частица не остается в покое, она флуктуирует, т.е. колеблется возле своего положения равновесия. Колебаясь, заряженная частица излучает фотоны. Строго говоря, на это у нее нет энергии, но это ничего. Заряд не только испускает фотоны, но и поглощает. Испущенный фотон почти сразу будет поглощен, и нарушения закона сохранения энергии не произойдет. Фотоны, о которых мы говорим, называют *виртуальными*. Если на некотором расстоянии от одного заряда есть еще один заряд, то поглотить виртуальный фотон может не тот заряд, который его испустил, а другой. Но и он испускает фотон, который может поглотить не он. Происходит как бы обмен виртуальными фотонами. Это вполне реальный процесс, который изменяет энергию системы из двух электронов, причем энергия взаимодействия обратно пропорциональна расстоянию между зарядами, а тем самым сила взаимодействия между ними обратно пропорциональна квадрату расстояния. Вычисления показывают – знак силы такой, как требует закон Кулона: одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Кулоновское (электростатическое) взаимодействие не единственное между субатомными частицами. Нуклоны в ядрах притягиваются друг к другу с такой силой, что преодолевают отталкивание одноименно заряженных протонов друг от друга. Взаимодействие между нуклонами официально назвали *сильным*. Почему же, если оно так велико, оно нами не ощущается? Потому, что сильное взаимодействие вообще не проявляется на макроскопических масштабах. Оно действует только на

ядерных масштабах: если расстояние между частицами порядка 10^{-15} метра или меньше, оно действует, а если расстояние заметно больше, то нет. Казалось бы, мало общего с электростатическим взаимодействием – например, нуклоны только притягиваются. Да, совсем мало общего, но все же есть. Сильное взаимодействие – тоже результат обмена виртуальными частицами. Нет, не фотонами, конечно, а *настоящими* частицами. Настоящими только в том смысле, что масса частиц, ответственных за сильное взаимодействие, не равна нулю, как у фотона. Предсказал их существование японский физик Хидэки Юкава в 1935 году, а в конце 40-х годов его предсказание подтвердилось – предсказанные частицы были открыты и получили названия *π -мезонов*. Греческую букву π добавили, так как ранее был открыт мезон, который обозначали греческой буквой μ , первой буквой древнегреческого слова *μεσοζ* – промежуточный, средний. Почему добавили именно букву π , не знаю. Обе частицы называли мезонами, т.е. промежуточными, средними, так как их массы больше массы электрона и меньше массы протона. Масса μ -мезона приблизительно в 207 раз превышает массу электрона, а π -мезона – в 273 раза, тогда как протон в 1800 раз тяжелее электрона. Часто μ - и π -мезоны называют мюонами и пионами. В 1949 году за предсказание существования мезонов Юкава был удостоен Нобелевской премии по физике.

Массу π -мезона Юкава предсказал довольно точно. Он знал, что сильное взаимодействие затухает с расстоянием экспоненциально, а между радиусом взаимодействия r_n и массой частицы-переносчика m существует простое соотношение: $m \sim \hbar/(r_n c)$. Здесь \hbar – постоянная Планка, а c – скорость света. Если подставить значения величин, окажется, что значение m неплохо совпадет с массой π -мезона. Хотя мезоны притягивают любые нуклоны, а их два – протон и нейтрон, мезонов оказалось три: два заряженных (с зарядами $+e$ и $-e$) и один нейтральный. Массы заряженных π -мезонов несколько больше массы нейтрального.

Все π -мезоны естественно поместить на нижний уровень семы таблицы 1, как фотоны и нейтрино.

Соотношение между радиусом взаимодействия и массой частицы, которая осуществляет взаимодействие, объясняет, почему кулоновское электростатическое взаимодействие так медленно затухает с расстоянием, что проявляет себя в макром мире: у фотона масса равна нулю, а при $m = 0$ радиус взаимодействия равен бесконечности.

Ясно, что если есть *сильное* взаимодействие, то должно быть и *слабое*. Оно действительно есть, и мы о нем уже говорили, не называя его. Оно проявляется себя в описанном нами распаде нейтрона. Понимаю, что звучит несколько странно: взаимодействие проявляется себя в распаде. Но представьте себе, что произошел обратный процесс: столкнулись протон, электрон и антинейтрино и образовали нейтрон. Тут вполне уместно добавить: благодаря слабому взаимодействию.

В далекий 1934 год Энрико Ферми построил теорию β -распада на основе предсказанного им распада нейтрона. Более десяти лет прошло до того, как распад нейтрона был открыт. Согласно теории Ферми, чтобы слабое взаимодействие себя проявляло, все частицы должны находиться в одной точке. Правда, тогда термина *слабое взаимодействие* еще не было. Во второй половине прошлого века слабое взаимодействие привлекало к себе внимание. Теперь теория слабого взаимодействия кардинально изменилась. *Теорию* Ферми даже переименовали в *модель* Ферми, чем понизили ее ранг. Отметим два обстоятельства.

Первое. Слабое взаимодействие обрело радиус действия, и были открыты частицы-переносчики. Их называли *W*- и *Z*-мезонами. Называть их мезонами вроде странно: они почти в 100 раз тяжелее протона. Значит, радиус действия слабого взаимодействия значительно меньше радиуса сильного взаимодействия примерно в 100 раз. Эти *W*- и *Z*-мезоны, естественно, падают на нижний уровень.

Второе. Оказалось, что два таких непохожих взаимодействия – электромагнитное и слабое – есть различные проявления единого взаимодействия. При энергиях выше энергии объединения (она порядка 10^2 ГэВ) оба взаимодействия, электромагнитное и слабое, сливаются в единое *электрослабое взаимодействие*. Между частицами-переносчиками есть распределение обязанностей: переносчики электромагнитного взаимодействия – это фотоны и *W*-мезоны, а слабого – *W*- и *Z*-мезоны. То, что у них есть общий переносчик, демонстрирует единство двух взаимодействий.

Объединение электромагнитного и слабого взаимодействий похоже на хорошо известное со времен Фарадея и Максвелла объединение электрических и магнитных свойств в электромагнитные. В статических условиях электрические и магнитные свойства не связаны между собой. Когда-то и не предполагали, что существуют электромагнитные волны.

Успех объединения электромагнитного и слабого взаимодействий добавляет оптимизма попыткам объединить все фундамен-

тальные взаимодействия в одно, истинно фундаментальное, которое по-разному проявляет себя в разных условиях (при разных энергиях). Всех взаимодействий всего четыре, а теперь стало три: электрослабое, сильное и гравитационное. Похоже, для *великого объединения* – именно так именуют объединение трех взаимодействий без гравитационного – предстоит еще много экспедиций по океану непознанного.

Конечно, создание теории электрослабого взаимодействия – замечательное достижение. Оно в 1979 году отмечено Нобелевской премией по физике, которую присудили ее творцам Шелдону Ли Глэшу, Стивену Вайнбергу (США) и Абдусу Саламу (Индия). Но, должен признаться, на меня более сильное впечатление произвело другое событие: открытие *кварков*. Происходившее в физике элементарных частиц в 60-е – 70-е годы прошлого века волновало многих, даже тех, кто работал в совсем другой области, как и я. Открытие новых частиц вызывало интерес. Выяснилось: новооткрытые частицы, их свойства, взаимодействия, распады упорядочиваются, а нуклоны занимают естественное место в многообразии новооткрытых частиц, если предположить, что нуклоны и новооткрытые частицы не элементарны, а состоят из частиц, которых никогда никто не наблюдал. Их-то и назвали кварками. Естественно, возникли дискуссии: кварки существуют или они лишь удобная математическая модель? К гипотетическим (пока) субнуклонным частицам привлекало все: от никогда не встречавшегося дробного электрического заряда (он кратен $e/3$, где e – заряд электрона) до названия. В 1969 году американский физик-теоретик Мюррей Гелл-Манн получил Нобелевскую премию по физике за открытие классификации новооткрытых элементарных частиц, а также их взаимодействия между собой и с нуклонами. Классификация получила название *восьмеричный путь*, взятое из буддизма. Теоретики (прежде всего Гелл-Манн, но не он один) поняли, что эту закономерность можно обосновать тем, что некоторые элементарные частицы (среди них нуклоны) состоят из более фундаментальных структурных единиц. Их-то Гелл-Манн и назвал кварками.

Восьмиричный путь, буддизм, кварки... Романтика сопровождала и без того интереснейшие открытия. Начались безуспешные поиски свободных кварков – вне «бывших» элементарных частиц. Где только их ни искали... Но поиски оказались безуспешными. А реальность кварков внутри частиц делалась все более очевидной. Число кварков увеличилось. Их свойства уточнились, выяснилось, что из себя представляют частицы-

переносчики. Их назвали *глюонами*, от английского слова glue – клей. Очень удачное название: они так склеивают кварки, что расцепить их не удастся. Вне частиц они всегда склеены, в частности так, что заряд их равен в точности заряду электрона или протона. Глюоны наблюдать в свободном полете, похоже, тоже не удастся, но есть факты, которые служат, по словам специалистов, строгим доказательством существования глюонов.

Понимание свойств кварков и глюонов позволило создать новую науку. Она названа *квантовой хромодинамикой* – КХД. Основанная на квантово-механических принципах, КХД описывает подавляющее большинство экспериментальных фактов, относящихся к наиболее (на сегодняшний день) глубокому уровню строения материи. Объекты квантовой хромодинамики – частицы, которые в настоящее время принято считать элементарными. Название *хромодинамика* – от древнегреческого *цвет*. Разными цветами называют специфические заряды кварков и глюонов. Цвета кварков не имеют отношения к обычному цвету. Выбор наименований оправдан тем, что смесь цветов трех кварков, составляющих нуклоны, бесцветна. Цветные заряды кварков и глюонов ответственны за сильное взаимодействие, аналогично тому, как заряды электрона и протона ответственны за электрическое взаимодействие.

В целом можно сказать, что кварковая модель и все, что из нее вытекает (в частности, КХД), – наиболее общепринятая теория строения адронов (так называют частицы, подвластные сильному взаимодействию), которая способна объяснить имеющиеся экспериментальные данные. Другой попросту нет.

Кроме кварков и глюонов на новый, ныне самый нижний уровень надо перенести электрон, μ -мезон и новооткрытый τ -мезон вместе со своими нейтрино. У каждого из лептонов *свое* нейтрино. К элементарности лептонов пока претензий нет. Частицы, которые принято считать элементарными, в кварково-лептонной теории – точки. Позже мы упомянем теорию, пытающуюся отказаться от этого предположения.

На рисунке, взятом из статьи в Википедии, обозначены все частицы, которые считаются элементарными. Это шесть кварков, они носят названия *u*, *d*, *c*, *s*, *t*, *b* – по первым буквам английских слов up, down, charm, strange, top, bottom. Протоны, нейтроны, ядра всех атомов – все, что мы видим, чем пользуемся, и мы сами – состоит из самых легких *u* и *d* кварков; остальные рождаются только на короткое время при столкновении частиц на ускорителях при высоких энергиях. Из шести лептонов, которыми являются электрон, мюон, τ -лептон и три

Три поколения материи

	I	II	III	
Масса	24 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
Заряд	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Название	<i>u</i> верхний	<i>c</i> очаровательный	<i>t</i> истинный	γ фотон
	4,8 МэВ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <i>d</i> нижний	104 МэВ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <i>s</i> странный	4,2 ГэВ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <i>b</i> прекрасный	0 0 1 <i>g</i> глюон

Кварки

$< 2,2$ эВ 0 $\frac{1}{2}$ <i>ν_e</i> электронное нейтрино	$< 0,17$ МэВ 0 $\frac{1}{2}$ <i>ν_μ</i> мюонное нейтрино	$< 15,5$ МэВ 0 $\frac{1}{2}$ <i>ν_τ</i> тау- нейтрино	91,2 ГэВ 0 1 <i>Z⁰</i> Z-бозон
--	--	--	---

0,311 МэВ -1 $\frac{1}{2}$ <i>e</i> электрон	103,7 МэВ -1 $\frac{1}{2}$ <i>μ</i> мюон	1,777 ГэВ -1 $\frac{1}{2}$ <i>τ</i> тау	80,4 ГэВ ± 1 1 <i>W[±]</i> W-бозон
--	---	---	---

Лептоны

Бозоны – переносчики взаимодействий

типа соответствующих нейтрино, в обычной материи встречаются только электроны, входящие во все атомы. Заметим, что μ - и τ -мезоны перестали называться мезонами. Они – подобия электронов, только заметно более тяжелые. «Лишние» кварки и лептоны, которые не встречаются в природе, нужны не «для полноты животного царства», они влияют на реальный мир и необходимы для того, чтобы понять, как реальный мир устроен. Правда, чем «занимаются» мюон и тау-лептон, я не знаю. Наверное, истинным специалистам в теории элементарных час-

тиц это известно. Одно мне понятно: вся картина субмикромиира при их участии поражает своей симметрией. В правом столбце приведенного рисунка помещены переносчики электрослабого и сильного взаимодействий. Для гравитационного взаимодействия места пока не нашлось. Большинство физиков-специалистов уверены, что гравитационное взаимодействие переносит особая частица – гравитон, масса которой, как у фотона, равна нулю, а спин равен 2. Но квантовой теории гравитации пока нет, и гравитоны еще не обнаружены.

За сильное взаимодействие ответственны кварки и глюоны. А как же π -мезоны? Их роль во взаимодействии нуклонов может быть *выведена*, исходя из знания строения нуклонов и самих π -мезонов из кварков.

Теперь мы можем окончательно выбрать, кого поселить на нуклонно-электронный уровень: протоны, нейтроны, электроны, фотоны, нейтрино и π -мезоны. Правда, это уже не самый нижний уровень. Под ним – кварковый. Береговая черта материка познанного заметно сдвинулась. Разрешим себе и на ныне самый нижний уровень поместить электроны, нейтрино и фотоны. Ведь мы знаем, что без них не «построишь» электрослабое взаимодействие. На нынешнем втором «этаже» они выступают в другой роли: без электронов нет атомов и, значит, всего сущего, а газы фотонов и нейтрино просто *есть* в космосе.

Картина, которую мы нарисовали (как вы догадываетесь, довольно грубо), носит название *Стандартной модели микромира*.² Она так хорошо описывает эксперименты, что физики-теоретики выражают недовольство: трудно найти, «к чему придраться», что подскажет, как двигаться дальше.

Может возникнуть вопрос: зачем? Маячит более глубокое понимание. Пока не удалось построить великое объединение. Теоретики уверены, что электрослабое и сильное взаимодействия – разные проявления одного более фундаментального. Настолько уверены, что заставили поверить и экспериментаторов, которые упорно ищут следствия великого объединения. В частности, конечности времени жизни протона. Если великое объединение существует, то, как обратил внимание Андрей Дмитриевич Сахаров, протон должен распасться на более легкие частицы. Правда, время распада по оценкам очень велико. Похоже, даже больше, чем согласно сделанным оценкам. Во всяком случае, пока распад протона не обнаружен.

² Эта статья была написана до открытия бозона Хигса, который, по мнению специалистов, должен увеличить надежность Стандартной модели микромира. (*Прим. ред.*)

А ведь есть и более амбициозная цель – *теория всего*. Это официальное название теории, которая призвана объединить все четыре взаимодействия, т.е. с тремя взаимодействиями, действующими в микромире, связать гравитационное, управляющее движением планет, звезд и знакомое нам не по учебникам, а с самого раннего детства по набитым синякам и шишкам. Есть ли возможность представить себе, как далеко в океан непознанного надо продвинуться в надежде достичь желанной цели? Переход от изучения атома к изучению строения нуклона означает переход от объектов размером $\sim 10^{-10}$ метра к объектам размера $\sim 10^{-15}$ метра. О каких масштабах надо думать, если пытаться создавать *теорию всего*?

Будем исходить из того, что теория всего должна строиться, как и все предыдущие теории, на основе теории относительности и квантовой механики. Мы уже отмечали: пока физики не встретились с фактами, которые заставили бы сомневаться в такой возможности. Теория гравитации Эйнштейна, общая теория относительности – релятивистская, но по самой своей сути классическая наука, не учитывающая квантовые эффекты. Но ведь пространство-время – физический объект, значит, и его свойства *должны* быть подчинены квантовым законам. Хотя, несмотря на многие попытки, до сих пор не удалось проквантовать пространство-время, квантовая теория гравитации *должна* существовать, и мы можем даже(!) оценить, на каких масштабах должна проявиться квантовая природа гравитации. В нашем распоряжении три мировые константы: постоянная Планка \hbar , скорость света c и гравитационная постоянная G . Их значения приведены в таблице 3. Из них можно построить комбинацию с размерностью длины – *планковскую длину* $L_P = (\hbar G/c^3)^{1/2}$. По порядку величины планковская длина равна 10^{-35} метра, т.е. на двадцать порядков меньше, чем размер нуклона. В масштабе планковской длины нуклон занимает огромное пространство, в котором находятся кварки и глюоны. Можно ли их с точностью, какой требует планковская длина, считать точками? Не знаю. И, думаю, пока никто не знает.

Параллельно другим направлениям теории элементарных частиц активно развивалась *теория струн*, в которых элементарные частицы – линейные объекты масштаба планковской длины. Бурно развиваясь, теория струн превратилась в самостоятельную дисциплину, не имеющую выхода к эксперименту. Возможно, пока... Признаюсь, я так далек от проблем теории струн, что, строго говоря, не имею права даже на эти несколько

строк о теории, которой занято много талантливых физиков-теоретиков и математиков.

Прежде чем покинуть нижние уровни, подведем нечто вроде итога. В таблице на приведенном рисунке шесть кварков. Два, самых легких, служат «кирпичами». Из них построены протон и нейтрон. Из них и из более тяжелых кварков построены все те сотни частиц, которые называют элементарными. Чему удивляться? Ядра атомов, а их с учетом не только стабильных изотопов, но и радиоактивных, известно более 2000, все построены из частиц всего двух типов – протонов и нейтронов. А кварков в распоряжении природы втрое больше. Но...

Но претерпели изменение, казалось бы, такие вполне очевидные понятия, как *составная часть, состоит из...* Можно ли считать, что нуклоны состоят из кварков, а кварки – составные части нуклонов, если они вне нуклонов или других адронов просто не существуют? Да и что это за строительный материал – четыре тяжелых кварка, если они неустойчивы и почти мгновенно распадаются на более легкие частицы?

Еще одно непривычное обстоятельство: некоторые кварки тяжелее адронов, «частью которых являются». Значит, между кварками притяжение очень велико. Оно, действительно, такое, что *дефект масс* ликвидирует это несоответствие.

Есть в кварково-глюонной теории и технические сложности: не работают в КХД многие методы расчетов, прекрасно зарекомендовавшие себя в электронно-фотонной квантовой электродинамике. Развитие вычислительной техники, думаю, помогает с этой трудностью справляться.

Теория – создание человеческого ума. Она должна нечто объяснять, для этого она создается. Но, как всякое человеческое творение, теория должна к тому же нравиться. Как часто, хваля теорию, произносится: «Она красивая!» Слова эти служат убедительным аргументом в пользу новой теории. При всей эlegantности *Стандартной модели микромира* она не безупречна с эстетической точки зрения: слишком много в ней параметров, *подобранных* так, чтобы нуклоны, электроны, носители взаимодействий – все, что измерено и служит строительным материалом для Вселенной, было следствием этой модели.

Зная, куда в океан непознанного стремится мысль теоретиков, понимаем, что кварково-глюонная теория близка к берегу материка познанного. Если уж здесь открылось столько совсем нового, то что можно ожидать на пути к *теории всего!* Колумб, желая найти путь в Индию, открыл Америку. И не надо

забывать, что руководило им понимание научной истины: он *знал*, что Земля – сфера. Лишь немногие в XV веке могли задумать экспедицию, основываясь на этом научном факте.

* * *

Теперь перейдем к самому верхнему уровню – *Вселенная*.

Добавить какие-либо уровни, примыкающие к самому верхнему, казалось бы, можно только *под* ним: ведь верхний уровень содержит *все*. Будем осторожны с выводами.

Как уже упоминалось, сравнительно недавно я познакомился с научными терминами, которые меня смутили не только тем, что в них присутствует эпитет «темная»: *темная материя*, состоящая из *темной энергии* и *темной массы*. Ясно: обозначенное этими терминами, невидимо, т.е. не излучает и не отражает электромагнитные волны. Конечно, лучше давать название не по отсутствующему свойству, а по свойству, которое есть. Первооткрыватели почувствовали скорее всего, что не понимают, с чем они столкнулись, и хотели откровенно признаться в этом. Мое смущение, а вначале и недоверие вызывало то, что темная энергия и темная масса составляют *подавляющую часть массы-энергии Вселенной*. Как тут не смутиться? Неужели наше знание, которое охватывает столь разнообразные структуры, заполняющие необозримый океан познанного, и которое позволяет понять самые причудливые явления природы, это всего лишь малая доля будущего знания о природе? Может быть, действительно, так. Но не будем забывать, что современная наука консервативна: никто не отнимет и не изменит добытого знания, а темная материя проявляет себя таким образом, что, похоже, никогда человеку не придется вступить с ней в непосредственный контакт. Это не значит, что человечество оставит попытки понять, что из себя представляет темная материя? Нет, конечно!

О темной материи уже можно прочесть не только в оригинальных статьях и научных обзорах, но и в научно-популярных журналах. Я ограничусь несколькими фразами. Темная материя проявляет себя только по гравитационному воздействию в космических масштабах, причем темная энергия и темная масса проявляют себя различно.

Темная энергия заполняет все космическое пространство, и ее носитель по предположению обладает удивительным свойством – антигравитацией, благодаря чему расширение Вселенной ускоряется. Согласно теории, Вселенная возникла в результате Большого взрыва приблизительно 14 миллиардов лет назад и с

тех пор расширяется, при этом разлет всего, что в ней образовалось, происходит со скоростью, пропорциональной расстоянию между космическими объектами. Чем дальше они друг от друга, тем скорость больше. Предполагали, что можно будет обнаружить уменьшение скорости разлета, вызванное притяжением космических объектов. Обнаружили... совсем не то: скорость не уменьшается, а возрастает. Нобелевская премия по физике в 2011 году присуждена трем астрономам – Солу Перлмуттеру, Брайану Шмидту и Адаму Риссу – за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых звезд. Значение открытия подчеркивается тем, что астрономия не входит в перечень наук, удостоивающихся Нобелевской премии. Несомненно, было принято во внимание то, что открытие – очень важный шаг в понимании физической природы истории Вселенной.

Темная масса неоднородно распределена в пространстве. Она есть там же, где и видимые объекты, в виде гало вокруг галактик и их скоплений. Присутствие ее обнаруживается по скорости вращения наблюдаемых объектов. Но не только по вращению. Многие из космических объектов играют роль *гравитационных линз*, искривляя световые лучи – следствие общей теории относительности, предсказанное Эйнштейном. Действие гравитационной линзы зависит от распределения массы – безразлично, видимая она или темная. Гравитационные линзы подтверждают существование гало из темной массы.

Итак, есть все основания считать, что темная материя существует. Куда ее поместить? Казалось бы, ниже верхнего уровня (ведь он должен содержать *все*). Но при этом структура схемы будет нарушена: мы не знаем, из чего темная материя состоит. Оставим темную материю вне схемы. Может быть, пока.

* * *

Есть научные события, которые потрясают даже тогда, когда совершенно не затрагивают твою жизнь, жизнь твоих близких и даже вообще людей. Одно из таких событий (точнее, цепочки событий) – выяснение того, что было время, когда ничего не было, того, что Вселенная возникла в результате Большого взрыва, того, что возможен научный сценарий развития Вселенной, уверенность в том, что есть наблюдаемые следы происшедшего в первые моменты после Большого взрыва, и среди них есть наиболее впечатляющий след – реликтовое излучение. Не знаю, как других, но меня все это потрясло. Даже на того, кому не по силам разобраться в логике научных

посылок и следствий из них, уверен, произведет сильное впечатление книга Нобелевского лауреата Стивена Вайнберга (о нем уже говорилось) «Первые три минуты» с подзаголовком «Современный взгляд на происхождение Вселенной». Аннотация книги заканчивается словами: «Для читателей, интересующихся проблемами космологии». Таких, которые заинтересовались, и не только названием, оказалось много: книга стала мировым бестселлером.

Серьезное обсуждение космологии – за рамками этой статьи. Несколько фраз все же позволю себе.

Так как образовавшаяся Вселенная в первые мгновения невообразимо горяча, возникшие в ней частицы обладают энергиями, которые невозможно достичь на ускорителях и вообще в земных условиях. Частицы сталкиваются, происходят реакции, результаты которых может предсказать теория. Теория, к тому же, может предсказать, как будут развиваться события по мере остывания Вселенной. Какие-то продукты реакции выживут и, синтезируясь, создадут все то, что указано в таблице 1. Свойства этих объектов, явления, которые с помощью современной теории могут быть объяснены, не только показывают, справедливы или нет наши предположения и выводы, но и дают возможность установить, как ведут себя частицы в столь важных для теории экстремальных условиях. *Вселенная стала уникальной лабораторией физики элементарных частиц.*

Произошло это не сразу. Оценки показывают, что должно было пройти время порядка 10^{-35} секунды, прежде чем Вселенная вступила на тот путь, первые три минуты которого описаны в книге Стивена Вайнберга. С трудом я заставил себя употребить обычные слова: *не сразу, прежде и пройти* к столь незначительному интервалу: 10^{-35} секунды! Но лишь мелькнул этот интервал, и все, что происходило дальше, подчинялось законам, которые действуют до сих пор, которые были сформулированы на Земле людьми, совсем недавно ступившими на Луну – на ближайшее к Земле космическое тело, на спутник Земли. Рассмотреть, что происходило в первые мгновения, не удастся не потому, что тогда не действовали земные законы (так, по-моему, не думает никто), а потому, что не умеют пока объединить общую теорию относительности и квантовую механику – создать *квантовую теорию гравитации*. Мы по этому поводу уже сетовали.

Необходимость создания квантовой теории гравитации возрастает. В квантовой теории рождение новых физических объек-

тов – не редкость. Надо, конечно, чтобы были выполнены законы сохранения, но фотон может «дать жизнь» электрону и позитрону, частице и античастице. Откуда они появились? «Из вакуума», – отвечают физики. Для релятивистской квантовой механики *вакуум* не пустота, не ничто в житейском смысле слова, а наинизшее по энергии, основное состояние всех материальных частиц, которые существуют, т.е. *всего*. Согласно идеологии релятивистской квантовой механики, свободный электрон не «падает» в состояния с отрицательной энергией (а они у электрона есть!), потому что все состояния с отрицательной энергией заняты. Они составляют вакуум. Двух электронов в одном состоянии быть не может. Это запрещено одним из строгих следствий квантовой механики – принципом Паули. А вот если какой-нибудь электрон с отрицательной энергией поглотит энергию фотона и будет из вакуума извлечен, то вместе с ним появится свободное место – дырка. Она ведет себя как положительно заряженная частица. Это – позитрон. Такую картину нарисовал Поль Дирак для разъяснения факта стационарного состояния электрона с наименьшей положительной энергией.

Упоминание о рождении электрон-позитронных пар служит для того, чтобы сказать: если рождение Вселенной происходит по квантовым законам, то следует считать, что *родилась Вселенная из вакуума*. Значит ли это, что до рождения Вселенной, тогда, когда реально не было ничего, не существовало ни материи в известных нам формах, ни пространства и времени, *в потенции было все*? А каковы законы, которым *будет подчиняться Мир*, когда он родится и по которым рождается? Они *были* до всего, что произойдет потом?

Я не знаю ответов на эти вопросы. Боюсь, эти вопросы навсегда останутся без ответа. Возможно, каждый будет искать ответ самостоятельно...

С другой стороны, кое-что о квантовом вакууме Вселенной можно считать с большой долей вероятности известным. По-видимому, вакуум – весьма необычная субстанция. В частности, очень вероятно, что она обладает антигравитацией. Если так, то именно *вакуум и есть темная энергия*. Он, вакуум, проявляет себя только тем, что ускоряет расширение. Но если это так, то вакуум наблюдаем! Мне кажется, сейчас такова господствующая точка зрения. А вот о темной массе, по-моему, известно еще меньше. Предположение о сверхтяжелых нейтрино или о каких-то других ни с чем не взаимодействующих частицах представляется фантастичным. Однако, вся история науки убежда-

ет, что необычность, даже фантастичность новой теории не аргумент против нее, а, скорее, доказательство ее правильности. Время покажет.

* * *

Ну вот, я сказал почти все, что хотел. Верю, что читатель вместе со мной побывал на берегах океана непознанного. А вот об иллюзии простоты прямо не сказано. Думаю, несколько слов надо добавить. Простота – не объективное понятие. Конечно, объединение разных взаимодействий упростит картину мира, но какой ценой достигается объединение? У меня закрадывается крамольная мысль: если бы можно было «остановиться» на том уровне, где всего три частицы: протон, нейтрон и электрон, то для меня Мир был бы проще, чем теперь, когда я знаю, что под этим уровнем находятся кварки, глюоны, лептоны, а океан непознанного манит новыми открытиями. А самый верхний уровень?! Как я радовался, что Вселенная – весь Мир – доступен изучению. И такое разочарование: темная материя. Не очень похоже, что вот-вот все станет простым. Оказывается, на материке познанного лишь малая доля того, что есть....

Последнее время я много думал, пытаясь осознать современную картину неорганического Мира. Поэтому, возможно, более часто, чем нужно, использовал в этой статье первое лицо единственного числа. Я излагаю свое видение. У других физиков оно может быть другим.

* * *

Немного о посвящении статьи. Липа Натанович Розенцвейг – мой близкий друг, он умер, когда мы оба были молоды. Талантливый физик-теоретик, он не успел полностью проявить свои способности. Последние годы своей жизни он был занят проблемой красного смещения – эффекту, послужившему доказательством расширения Вселенной. У него была своя точка зрения на красное смещение, она не совпадала с принятой. Он не считал, что Вселенная расширяется. Думал, что при распространении из далеких областей Вселенной фотоны «стареют» – теряют энергию из-за рассеяния на флуктуациях плотности материи в космическом пространстве. Это и приводит к красному смещению. Очень трудоемкий расчет Липа Натанович не довел до конца. В настоящее время, похоже, обнаружены факты, которые противоречат теории старения фотонов. Тогда такие факты были неизвестны.

* * *

Я выражаю искреннюю благодарность А.И.Гордону, З.И.Кагановой, И.М.Кагановой, М.Л.Литинской, которые прочитали статью до публикации и высказали свои замечания. Замечания были мне полезны, и я их постарался учесть.

Рекомендуемые книги

1. *Стивен Вайнберг*. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. – М.: ЭКСМО, 2011.

2. *Стивен Вайнберг*. Мечты об окончательной теории. Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. – М.: Едиториал УРСС, 2004.

3. *Шелдон Ли Глэшоу*. Очарование физики. – М.: ROC Dynamics, 2002.

4. *Брайан Грин*. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – М.: Либроком, 2011.

5. *Брайан Грин*. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. – М.: Либроком, 2011.

6. *Брайан Грин*. Скрытая реальность: Параллельные миры и глубинные законы космоса. – М.: Либроком, 2013.

7. *Алекс Виленкин*. Мир многих миров. Физика в поисках параллельных вселенных. – М.: Астрель, 2010.

ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА – СИМВОЛ КВАНТОВОГО ВЕКА

Введение

Одно из самых важных научных достижений последнего времени это понимание структуры объектов материального мира – от элементарных частиц до галактик и их скоплений. Если считать «строительным материалом» только то, из чего реально состоят атомы и молекулы, то «кирпичей» три: электрон и нуклоны – протон и нейтрон. Необходимо добавить еще фотоны – кванты электромагнитных волн, прежде всего света. Выяснилось, однако, что микромир заметно богаче: открыто много частиц, без которых понять устройство природы невозможно.

Во второй половине XX века была сформулирована *Стандартная модель*, включающая почти все элементы микромира.¹ Похоже, что и слово «почти» скоро можно будет убрать: открытие бозона Хиггса, хочется надеяться, окончательно подтвердилось. Частицы, входящие в Стандартную модель, разно-



образны: у них разные массы, одни заряжены, другие нейтральны, у одних частиц собственный момент количества движения нулевой или целочисленный (их называют *бозонами*), у других – полуцелый (они – *фермионы*). Большинство частиц Стандартной модели неустойчивы. Тяжелые частицы распадаются на более легкие, и в их характеристики входят возможные реакции превращений, рас-

¹ О Стандартной модели микромира подробно рассказывается в статье В.Рубакова «К открытию бозона Хиггса», опубликованной в журнале «Квант» №5–6 за 2012 год.

падов и соответствующие им вероятности. Уже это перечисление с очевидностью показывает, что Стандартная модель, считающаяся шедевром простоты, содержит множество чисел. Подразумевается, что в каждую клеточку с названием частицы можно добавить сведения, без которых модель бессмысленна. Только с ними Стандартная модель – надежная характеристика современной физики микромира.

Исследование Вселенной на больших масштабах, с целью понять ее зарождение и развитие, привело к открытию *темной материи* и *темной энергии* – субстанций, проявляющих себя (возможно, только пока) лишь по гравитационному воздействию на обычную, доступную нашему «видению» материю, на ту, которая описывается Стандартной моделью. В научно-популярных изданиях загадочной материи часто уделяют чрезмерное внимание. Даже в «Успехах физических наук», одном из самых серьезных физических журналов, в одной из статей я прочитал, что *главная задача* современной физики состоит в том, чтобы выяснить природу темной материи и темной энергии. По убедительным оценкам, именно они составляют основную массу всего, что есть во Вселенной. Поэтому автор статьи, возможно, и прав, и спорить с ним бессмысленно. С другой стороны, ясно, что *главная задача* не исчерпывает все задачи. Эйнштейн, говоря о задачах науки, и в первую очередь физики, утверждал, что основная задача науки в создании *картины мира*, простой в своей логической убедительности.

Картина мира... Попытаюсь воспользоваться предложенной метафорой. Картина пишется на холсте. Ценную картину помещают в раму, покрывают стеклом. Может быть, темная материя и темная энергия играют в каком-то смысле роли холста, стекла, рамы? Нельзя ли разобраться в том, что изображено на картине, не зная, из чего сделана рама и какова структура холста? До сих пор удавалось. Не подозревая о существовании темной материи и темной энергии, удалось проникнуть в структуру материи на необозримую глубину и убедиться в справедливости физических законов в необъятном космическом пространстве. Поэтому многих поразило то, что темная материя и темная энергия существуют, а особенно то, что загадочной материи больше, чем той, которую описывает Стандартная модель. Физики сумели понять строение всего *видимого* Мира, даже не подозревая, что изучают не целое, а лишь часть.

Похоже, мы стоим перед новыми открытиями. Самое время готовиться к тому, что новые открытия заставят нас охватить внутренним взором новые образы, постичь новые представле-

ния. Сложный, иногда болезненный процесс. Именно сейчас, может быть, следует оглянуться и постараться углубить свои знания того, *как* происходит смена одной фундаментальной теории на другую. Замечательный пример – *переход от классической физики к квантовой*.

Физика всегда ощущала себя фундаментальной наукой. Фундаментальной в том смысле, что она может и призвана служить фундаментом всего естествознания. На рубеже XIX и XX веков классическая физика накопила огромный багаж сведений. Физика, объединяющая механику, термодинамику и электродинамику, казалось, имеет уже все необходимое для понимания окружающего нас мира. Считалось: то, что не укладывается в законы физики, либо свидетельствует об ошибке, либо требует для своего объяснения еще более глубокого анализа на основе известных законов. Это утверждение было *почти* очевидным. Почти...

Обнаружение *неоспоримого факта*, противоречащего закону природы, ведь может и не оказаться ошибкой. Тогда это – *открытие*. Оно свидетельствует о том, что классическая физика не все может объяснить. И возникает ощущение, что известные законы имеют границы применимости и, следовательно, необходим поиск новых, более общих законов. Необъясненные и необъяснимые явления, конечно, привлекали внимание. Особенно тех исследователей, которые понимали, что *все* средства *классической* физики в попытках объяснения исчерпаны. Физика тогда не именовалась *классической*. Это была *вся* физика. В конце XIX века до Макса Планка и Альберта Эйнштейна, насколько я понимаю, никто серьезно не утверждал, что в неживой природе есть явления, которые существовавшая физика объяснить не может. Одна из тем этой статьи – краткий рассказ о том, как в результате ряда попыток объяснить необъяснимое родилась новая, *квантовая физика*.

Первый осознанный шаг за пределы классической физики сделал Макс Планк, законопослушный сорокадвухлетний профессор Берлинского университета, по всем воспоминаниям очень консервативный. Что же его заставило? На первый взгляд, нечто не слишком важное: невозможность объяснить спектральный состав излучения искусственно созданного *абсолютно черного тела*. Сейчас если и вспоминают об абсолютно черном теле в курсе физики, то только именно в связи с работой Макса Планка. Можно сказать и так: в связи с рождением *постоянной Планка*.

Квантовая физика родилась в первой трети XX века. Релятивистская физика по историческим масштабам родилась одновременно с квантовой. Границы физики, ее возможности необычай-

но расширились. Человечество, несомненно, движется от незнания к знанию, совершенствуя при этом само понятие *знание*. Очевидным свидетельством надежности маршрута служит то, что, переходя с уровня на уровень, приобретенных знаний не отбрасывают. Каждая эпоха привносит в науку нечто, что не забывается. Особенно заметно это со времен Галилея (1564–1642) и Ньютона (1643–1727).

У меня есть пропагандистская цель. Сейчас много (и не всегда честно) говорят об оценке результатов науки, о необходимости инвестиций в науку, но пытаются поставить под сомнение полезность фундаментальных наук. В том, что квантовая механика полезна, сомневаться нет оснований. Очень хочется, чтобы читатели познакомились, а познакомившись, прочувствовали и поняли, пусть на одном примере, *чем руководствовались* создатели новой физики и те, кто давал на их исследования средства.

Первые шаги

19 декабря 1900 года ординарный² профессор Берлинского университета Макс Планк (1858–1947) докладывал результаты своих исследований спектрального состава абсолютно черного тела. Заканчивая выступление докладчик произнес:

«...либо... весь вывод закона излучения был в принципе ложным и представлял собой всего лишь пустую игру в формулы, лишенную смысла, либо же вывод закона излучения опирается на некую физическую реальность, и тогда квант действия должен приобрести фундаментальное значение в физике и означает собой нечто совершенно новое и неслыханное, что должно произвести переворот в нашем физическом мышлении, основывавшемся со времен Лей-



Макс Планк

² Не могу привыкнуть, что *ординарный* профессор – более высокая степень, чем *экстраординарный*. Настоящий профессор – ординарный профессор.

бница и Ньютона, открывших дифференциальное исчисление, на гипотезе непрерывности всех причинных соотношений»³.

В 1900 году Макс Планку 42 года, он уже 11 лет профессор Берлинского университета, из них 8 лет – ординарный. Несомненно, заслуженный и уважаемый ученый. Он понимал, что столь резкое публичное заявление должно иметь серьезные основания. Попробуем разобраться.

На первый взгляд, речь идет об узкой и очень специальной задаче. Абсолютно черное тело – фикция, таких тел в природе нет. Абсолютно черное тело должно поглощать все падающее на него излучение, не отражая его, и при этом оно может излучать. Однако искусственно создать абсолютно черное тело нетрудно (на словах – совсем просто). Для этого надо сделать в любом теле полость с небольшим отверстием. Все ... Абсолютно черное тело готово. Из отверстия понемногу выходит излучение, которое туда попало со стенок полости, разогретых до фиксированной температуры, а то, что входит в отверстие, поглощается в стенках и, если отверстие мало, практически наружу не возвращается.

Излучение абсолютно черного тела стало одной из центральных проблем физики в конце XIX века. Почему? Вспомним: атомная теория еще не принята окончательно. Боюсь, эти слова могут быть восприняты неправильно. Не в том дело, что физики не знали, как устроены атомы. Многие не верили, что атомы вообще существуют и что есть предел делению вещества. Они считали, что атомы *изобретены* физиками, чтобы сделать наглядными рассуждения при выводе законов термодинамики из законов механики. Те же, кто были уверены в существовании атомов и молекул, считали, что микроскопические частицы, как и все изученное в природе, подчиняются законам механики Ньютона. Один из крупнейших физиков XIX века Людвиг Больцман (1844–1906) в докладе «Второй закон механической теории теплоты», создателем которой он был, на торжественном заседании Австрийской Академии наук 29 мая 1886 года высказал следующее:

«...Все наблюдения единогласно доказывают, что существуют тела таких ничтожных размеров, что, только со-

³ Цитирую биографию, написанную В.И. Григорьевым для Википедии. Думаю, не ошибаюсь: Владимир Иванович Григорьев – профессор МГУ, в прошлом мой коллега, в 70-х годах мы оба были профессорами на кафедре квантовой теории МГУ. Обстановка на кафедре, наше общение оставили приятные воспоминания. Рад неожиданной «встрече».

бравшись миллионами, они могут возбуждать наши органы чувств. Мы называем их атомами и молекулами. При исследовании атомов мы часто находимся во многих отношениях еще в более неблагоприятных условиях, чем в астрономии... Удивительным образом нужно и здесь возложить все надежды на успех, на искусство, оказавшееся таким могущественным при исследовании небесных тел, а именно на спектральный анализ...»

Поразительно, как эти слова соответствуют истории рождения квантовых представлений. Сравнение с астрономией показывает, что недостижимость атомов и молекул воспринималась наравне с недостижимостью звезд. До Эйнштейна, похоже, никто не понимал, что еще в 1827 году английский ботаник Роберт Броун, наблюдая случайные блуждания крупиц цветочной пыльцы под микроскопом, просто *видел* результат ударов молекул жидкости по крупичкам пыльцы. Но и понимание того, *что* видел Броун, пришло к Эйнштейну только лет через пять после доклада Планка, а экспериментальное подтверждение эйнштейновской теории броуновского движения, созданной на основе атомно-молекулярной теории жидкости, было получено Жаном Перреном еще через три-четыре года.

Излучение абсолютно черного тела – сравнение теории явления с экспериментом – воспринималось как *experimentum crucis*⁴. Для этого были основания. И именно в той почти всеобъемлющей формулировке, которую высказал уважаемый профессор: если его теория верна, то классическая физика не верна! Попробуем разобратся, чем обусловлена такая «претензия».

Экспериментально излучение абсолютно черного тела было достаточно хорошо изучено, и его принципиальная теория была построена. Было понято, что тепловое излучение это электромагнитные волны, что между электромагнитным полем в полости и телом, которое полость окружает, есть термодинамическое равновесие. Небольшое отверстие, через которое поступает излучение в экспериментальную установку, не может это равновесие нарушить. Изучается именно *равновесное излучение* – само тепло, уровень которого определяет температура.

Крупнейшие физики своего времени Густав Кирхгоф (1824–1887) и Людвиг Больцман объяснили многие свойства наблюдаемого явления. Для своих выводов они использовали термоди-

⁴ *Experimentum crucis* – решающий опыт, критический эксперимент (буквально – *опыт креста*), опыт, исход которого однозначно определяет, является ли теория или гипотеза верной.

намику. Все полученные теоретически *глобальные свойства* излучения соответствовали эксперименту: универсальность излучения абсолютно черного тела (закон Кирхгофа), зависимость интенсивности излучения от температуры (закон Стефана–Больцмана, согласно которому интенсивность пропорциональна четвертой степени температуры).⁵ Загадкой оставалось тщательно измеренное распределение излучения по частотам (по длинам волн) при различных температурах. Вильгельму Вину (1864–1928) удалось, не делая никаких дополнительных предположений (на основе термодинамики), доказать и проверить на эксперименте, что спектральный состав излучения должен описываться универсальной функцией отношения ω/T , где ω – частота излучения, а T – температура. Закон подтвердился. Им был установлен закон смещения, названный законом смещения Вина: при повышении температуры максимум кривой интенсивности, как функции частоты, смещается в сторону бо́льших частот.

Остановимся и спросим себя: почему *начали* активно заниматься равновесным излучением? В то время сделать аккуратные измерения интенсивности излучения, да еще в широком диапазоне температур, было совсем непросто. Это – целая наука. Она носит название *фотометрия*. Для ее развития преуспевающий бизнесмен по фамилии Симменс (знакомая фамилия, не правда ли?) создал специальный институт с хорошо оснащенными по тем временам лабораториями. Некоторые физики (Вин в их числе) совмещали преподавание в Берлинском университете с экспериментальной работой в Институте Симменса. Их работа проходила в тесном контакте с профессором Планком. Все, похоже, очень серьезно. Дело в том, что Симменс успешно пытался развивать производство ламп накаливания самого разного назначения. Необходима была реперная зависимость – зависимость, с которой следовало сравнивать экспериментальные результаты. Для Макса Планка работа по изучению излучения абсолютно черного тела началась с поисков сравнительно простой *подгоночной* формулы. И он ее нашел. Казалось бы, дело сделано: выпиши формулу большими буквами, размножь, пусть экспериментаторы пользуются. Такой финал не соответствовал характеру Планка. Он хотел, он должен был *понять, почему формула такая, какая она есть*.

⁵ Йозеф Стефан (1835–1893) – австрийский физик-экспериментатор.

Казалось, установить, каков *должен быть* спектральный состав излучения, нетрудно. Тепло – проявление возбуждения атомов тела. Источником теплового излучения служат атомы в меру своего возбуждения. В равновесии возбуждение атомов определяется температурой. С ростом температуры неделимые атомы будут двигаться быстрее. Если они закреплены, но имеют движущиеся части, то эти части будут двигаться быстрее относительно друг друга с ростом температуры. Средняя энергия каждого элементарного движения пропорциональна температуре. Именно так утверждает механическая теория теплоты Больцмана. Созданная во второй половине XIX века, теория Больцмана – один из самых важных пунктов рассуждения. Чтобы излучатели и излучение были в равновесии, необходимо, чтобы они имели одинаковые спектральные разложения. Отсюда следует, что спектральную функцию излучения можно вывести, зная равновесные свойства источников излучения. Но как это сделать, если строение атомов неизвестно? На помощь приходит универсальность излучения абсолютно черного тела, доказанная Кирхгофом. Если спектральная функция излучения *универсальна*, то при ее расчете можно использовать любую модель, если только она не противоречит законам физики.

Но... каким образом нейтральные атомы излучают электромагнитные волны? То, что в телах, в атомах и молекулах есть заряженные частицы, было известно. Уже был открыт электрон. Никто не знал строения атомов и молекул. Даже открывший электрон Дж.Дж.Томсон (1856–1940) еще не сформулировал свою потом отвергнутую опытами Эрнеста Резерфорда (1871–1937) модель атома. Но в атомах заряды есть. Следовательно, они могут излучать электромагнитные волны. Модель излучателей придумать было просто. Применить к ней теорию Больцмана тоже было несложно.

Модель, использованная Планком, действительно очень проста: электромагнитные колебания излучают *осцилляторы* с круговыми (циклическими) частотами колебаний от 0 до ∞ . По классической ньютоновской механике (никакой другой тогда не было) энергия осциллятора может быть любой положительной величиной, если, конечно, принять, что наименьшая энергия осциллятора равна нулю. Теперь к каждому осциллятору достаточно применить больцмановский закон равномерного распределения, и все должно получиться. Должно, но не получается...

Планк не знал, что за несколько месяцев до него такую же модель и с той же целью использовали в Англии Рэлей и

Джинс.⁶ Как оценить их результат? Сохранились два выражения, которые следует считать оценкой полученного Рэлеем и Джинсом результата. Первое: *закон Рэля-Джинса*, второе – *ультрафиолетовая катастрофа*. Законом Рэля-Джинса называют формулу для спектральной плотности излучения на малых частотах, которая соответствует эксперименту, а то, что суммарная плотность излученной энергии обращается в бесконечность, трудно не назвать катастрофой, естественно, ультрафиолетовой: суммарная плотность излучения обращается в бесконечность за счет больших частот.

Попытайтесь *усовершенствовать*? Но что? Термодинамику? Или электродинамику и механику? Планк понял, что ни термодинамику, ни электродинамику, ни механику немного подправить, не нарушив всего безукоризненного здания физики, невозможно. И он включил в вывод своей формулы предположение, которое строго противоречило классической физике. Планк предположил, что каждому осциллятору, колеблющемуся с частотой ν , дозволено иметь не произвольную энергию ϵ , а только кратную частоте ν . Частота и энергия имеют различные размерности. Планку пришлось ввести размерный множитель, который он обозначил буквой h . Его размерность эрг \cdot с. Таким образом,

$$\epsilon = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2, \dots - \text{произвольное целое число.} \quad (1)$$

Постоянная h , как вы понимаете, получила название *постоянной Планка*. За меру частоты обращения часто принимают не просто частоту ν , а круговую частоту $\omega = 2\pi\nu$, поэтому наряду с h ввели величину $\hbar = h/(2\pi)$. Ее тоже называют постоянной Планка, а условие (1) принимает вид

$$\epsilon = n\hbar\omega, \quad n = 0, 1, 2, \dots - \text{произвольное целое число.} \quad (2)$$

Мы будем в дальнейшем использовать круговую частоту ω и постоянную Планка \hbar .

Осциллятор с дискретными уровнями энергии, согласно Планку, излучает и поглощает энергию порциями, равными $\hbar\omega$. Порция переданной энергии не может быть меньше $\hbar\omega$.

Коротенькое воспоминание. Сейчас обычно в ходу $\hbar\omega$. Когда я учился, одни употребляли $\hbar\omega$, а другие $h\nu$. Но вот что забавно: употреблявшие $h\nu$ произносили *ха-ню*, а употребляв-

⁶Джон Уильям Рэлей (Стретт) (1842–1919) – английский физик, лауреат Нобелевской премии за 1904 год; Джеймс Хопвуд Джинс (1877–1946) – английский астрофизик.

шие $\hbar\omega$, произносили *аш-омега*. Оба произношения – из немецкого. Буква h называется по-немецки *аш*, а по произношению она близка к русскому x ($ха$). Хотя часто ее переводят как z : Heisenberg – Гейзенберг.

Вернемся к выводу Планком распределения по частотам теплового излучения. Дальше все строго по правилам – так, как требуют законы статистической физики Больцмана. Основан вывод на знании вероятности реализации каждого из возбужденных состояний частицы (в данном случае осциллятора). В соответствии с условием (2) вероятность осциллятору находиться в n -м состоянии равна $A \exp((-n\hbar\omega)/(kT))$, где T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана⁷, A – нормировочная константа, которая обеспечивает естественное равенство: для каждой частицы сумма всех вероятностей должна быть равна единице.

Расчет привел Планка именно к формуле, найденной подбором, которая хорошо описывала кривую распределения теплового излучения. При высоких частотах она соответствовала закону смещения Вина, при низких – закону Рэлея–Джинса. Благодаря экспоненциальному спадаанию кривой к нулю при $\omega \rightarrow \infty$ – никакой ультрафиолетовой катастрофы: суммарная плотность излучения пропорциональна T^4 , как того требует закон Стефана–Больцма (с правильным коэффициентом).

Полная победа! Только никто (включая автора) не знает, откуда возникли у осциллятора выделенные состояния с дискретными уровнями энергии. А ведь без этого формулу вывести невозможно! Отсюда несомненное волнение ординарного профессора Макса Планка, когда он докладывает свой результат Берлинскому физическому обществу.

Пройдет несколько лет, станет абсолютно ясным, что предположение Планка справедливо, что формула Планка – первая формула новой квантовой физики, пригодной для объяснения свойств молекул, атомов и субатомных частиц, населяющих микромир, всех частиц, из которых построен весь макромир – иными словами, есть все, что нас окружает, и мы сами.

В заключение этого раздела выпишем историческую формулу Планка. Она историческая, но не устарела, так как она верна. Итак, формула Планка для спектральной плотности энергии

⁷ Величину, переводящую температуру из градусов в эрги, первым назвал константой Больцмана Планк после трагической смерти Людвига Больцмана. Он покончил жизнь самоубийством в 1906 году – через 6 лет после открытия Планка.

излучения абсолютно черного тела имеет вид

$$u(\omega, t) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / (kT)} - 1}, \quad (3)$$

где c – скорость света.

Признание. Оценка Эйнштейном

19 декабря 1900 года, день доклада Макса Планка, по праву называют днем рождения квантовой теории. Символично, что открытие кванта действия произошло на рубеже между девятнадцатым веком и двадцатым. Первая статья Эйнштейна по теории относительности опубликована в 1905 году. Эйнштейн всегда помнил, что Планк был один из немногих, кто сразу признал теорию относительности. В 1918 году Макс Планк получил Нобелевскую премию по физике «В знак признания услуг, которые он оказал развитию физики своим открытием квантов энергии». К 1918 году значение квантования было осознано, но квантовой механики как логически завершенной науки, пригодной для описания движения микрочастиц, еще не существовало. В 1921 году «За заслуги перед теоретической физикой и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта» Нобелевскую премию получил Альберт Эйнштейн. Теория фотоэффекта целиком основана на гипотезе Планка о квантовании энергии. Релятивистская механика и общая теория относительности, принесшие Эйнштейну мировую славу, не вдохновили членов Нобелевского комитета. В следующем году «За заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения» Нобелевскую премию по физике получил Нильс Бор. Случилось так, что Нобелевские премии и Бору, и Эйнштейну вручались одновременно.

В своей великой «Поэме без героя» Анна Ахматова, вспоминая 1913 год, сказала:

Приближался не календарный –
Настоящий Двадцатый Век.

Она имела в виду, что в следующем, 1914-м, начнется первая мировая война, превратившаяся в Гражданскую... И дальше последуют чудовищные события. Их не могут забыть прожившие *настоящий двадцатый век*, а остальные *должны* их помнить, чтобы события не повторились. А ведь если бы XX век не «прославился» двумя мировыми войнами и кровавыми режимами, то настоящему двадцатому веку можно было бы присвоить двойной титул: *Квантовый-Релятивистский*. Увы...

Мне трудно вспомнить, что и когда я узнал о Планке. Наряду с другими великими, он входил в число тех, кого я почитал как творцов современной физики еще в школьные годы. Но теперь мне кажется, что по-настоящему познакомился с Планком я только тогда, когда прочел о нем у Эйнштейна. Есть четырехтомное Собрание научных трудов Альберта Эйнштейна.⁸ В 4-м томе опубликованы статьи, рецензии, письма. Несколько материалов посвящено Макс Планку. Из примечания к выступлению Эйнштейна на юбилее Планка в 1929 году я вычитал любопытные подробности.

Отмечалось 50-летие докторской диссертации Планка на заседаниях двух немецких физических обществ. На этом заседании впервые вручалась медаль, выпущенная в честь 70-летия Макса Планка (оно было в 1928 году). Первая была вручена Планку. Вторую медаль Планк вручил Эйнштейну.

Приведу буквально несколько слов из выступления Эйнштейна памяти Макса Планка (октябрь 1947 г.). Начинается оно так:

«Человек, которому было суждено одарить мир великой созидательной идеей, не нуждается в похвале потомства. Его творчество даровало ему более значительное благо».

А заканчивается словами:

«Отдавая дань великому человеку, Американская национальная академия наук выражает надежду, что исследования ради чистого познания будут продолжаться и сохранят всю свою силу».

Шел 1947 год. Все ли ученые надеялись на «исследования ради чистого познания»? Многие, среди них и самые талантливые, создавали и совершенствовали ужасное оружие уничтожения... Думать об этом не хочется. А сам сказал, что надо помнить.

Эйнштейн прав: творчество даровало Планку благо – полученные им результаты увековечили его имя. А как прошла жизнь Планка в настоящем двадцатом веке? Странно, но биография Макса Планка у нас в серии «Жизнь замечательных людей» не была издана. Некоторые факты из его биографии трудно обойти молчанием. Приведу довольно длинную выдержку из той биографии, которую цитировал (см. прим.3):

«Последние десятилетия жизни Планка были омрачены трагическими событиями. Его первая жена, урожденная Ма-

⁸ Под редакцией И.Е.Тамма, Я.А.Сморозинского и Б.Г.Кузнецова (М.: Наука, 1967).

рия Мерк, с которой он вступил в брак в 1885, умерла в 1909, оставив четверых детей, трое из которых не пережили первой мировой войны (1914–18). В 1916 был убит воевавший во Франции старший сын Карл, в последующие два года умерли от родов две его дочери-близнецы. От первой жены оставался только один сын Эрвин, но и его пережил Планк. В 1944 Эрвин был вовлечен в заговор против Гитлера и казнен.

Планк воспринял приход фашистов в 1933 к власти в Германии как национальную трагедию. Человек сложившихся взглядов и религиозных убеждений, он открыто выступал в защиту еврейских ученых, изгнанных со своих постов и вынужденных эмигрировать за границу. Будучи президентом Общества фундаментальных наук Кайзера Вильгельма, Планк использовал все возможности, чтобы сохранить немецкую науку, прекратить преследования ученых-евреев. Порой его действия “приводили Гитлера в такой раж, что уже ничего не оставалось, как молча все выслушать и удалиться” <Откуда цитата, не знаю. – М.К.>. В дальнейшем Планк изменил тактику, стал более сдержанным и осмотрительным, хотя нацисты, несомненно, знали о его взглядах.

Макс Планк не дожил несколько месяцев до своего девяностолетия».

Макс Планк – одна из наиболее почитаемых исторических фигур в современной Германии. И до объединения Германии, и теперь. В Германии есть Макс-Планк-институт, объединяющий много физических институтов. Заметны успешные усилия восстановить былую научную славу Германии.

В ГДР в Гумбольдтском университете была создана кафедра имени Макса Планка. На кафедре курсы читали приглашенные профессора. После 70-го года я нередко бывал в ГДР, участвовал в конференциях, семинарах, читал курсы лекций. Меня пригласили прочесть курс лекций по электронной теории металлов на Макс-Планк-кафедре. С удовольствием прочитал курс. От этого события остался на память диплом Макс-Планк-профессора, который мне торжественно вручили после заключительной лекции.

Постоянная Планка демонстрирует свои возможности

С исторической точки зрения, в весьма краткий промежуток времени квант действия приобрел фундаментальное значение в физике. Утверждения Планка представляли собой нечто совершенно новое и неслыханное. Планк произвел истин-

ный переворот в физическом мышлении, которое со времен Лейбница и Ньютона основывалось на гипотезе непрерывности всех причинных соотношений.

Повторил слова Планка, но без кавычек, так как повторил их неточно, а главное – отбросил сомнение. Сомнения отпали, так как физика начала меняться. На кардинальное изменение, т.е. на создание квантовой механики, понадобилась примерно треть века – короткий промежуток времени, короче средней продолжительности жизни одного человека.

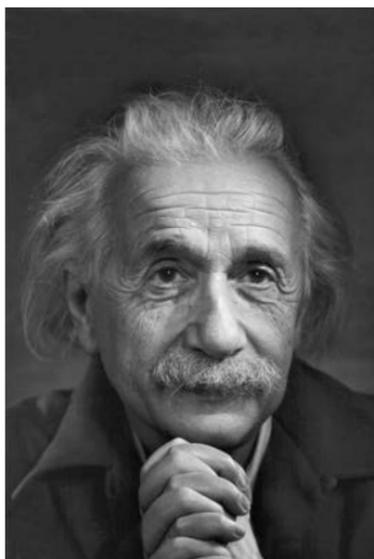
Предыдущий раздел показывает, что первыми, кто воспользовался идеей Планка, были Эйнштейн и Бор. Если уточнить, то первым был Эйнштейн, а вторым Бор. Обоим идея Планка о квантовании энергии понадобилась для решения определенных задач. Попробуем понять, каких задач, и уточним, какую роль сыграло квантование.

Первое десятилетие XX века

Начнем по порядку.

Посмотрев суммарное оглавление Собрания трудов Эйнштейна (в конце 4-го тома), признаюсь, удивился. Знал, конечно, что роль Эйнштейна в создании квантовой механики велика. Все же меня крайне удивило, что *большинство* статей первого десятилетия XX века посвящены в той или иной степени квантованию энергии. Ведь нельзя забывать, что в 1905 году Эйнштейн опубликовал свою первую (и основную) работу по теории относительности. Тогда же Эйнштейном получена самая знаменитая формула XX века: $E = mc^2$, утверждающая эквивалентность массы (меры инерции) и энергии. Но факт остается фактом: работ по атомно-квантовой теории больше, чем по теории относительности. Все они – иногда напрямую, иногда косвенно – связаны с гипотезой Планка.

Эйнштейн, первые работы которого посвящены теории основ термодинамики (1903 г.) и общей молекулярной теории теплоты (1904 г.), не оставил эту



Альберт Эйнштейн

тематику. Его преследовало желание установить величину молекул и атомов, используя статистическую термодинамику Больцмана. Способа увидеть, измерить атомы и молекулы непосредственно тогда не было. В высокой оценке Эйнштейном работы Планка меня озадачило, что о постоянной Больцмана сказано не меньше, чем о постоянной Планка. Дело в том, что постоянная Больцмана в формуле Планка использована впервые не при описании газа, как у Максвелла и Больцмана, а при описании распределения плотности равновесного излучения по частотам. Эйнштейн понял, что постоянная Больцмана имеет универсальный характер и может быть использована при определении размеров молекул по наблюдению броуновского движения. Этому важному вопросу атомной теории в первое десятилетие XX века у Эйнштейна было посвящено несколько работ. Правда, для развития квантовой теории более важны другие работы, в одной из которых Эйнштейн *открыл закон* фотоэлектрического эффекта (так сказано в формулировке Нобелевского комитета).

Объяснение природы фотоэффекта и ряда других эффектов потребовало от Эйнштейна пересмотра, казалось бы, строго установленных взглядов на свет, на электромагнитное поле. Волновую природу света отвергнуть было невозможно: дифракция и интерференция необъяснимы, если свет считать набором корпускул, частиц. Но если Планк прав и атомы излучают свет порциями, квантами, то возможно, электромагнитное поле все же продолжает свое существование в подобном квантованном виде. А вдруг тогда удастся объяснить экспериментальные факты, которые не укладываются в волновую теорию света? И совсем уж еретическое предположение: для объяснения одних явлений надо использовать волновое описание, а для объяснения других – с помощью планковских квантов – корпускулярное.

Шел 1905 год. В ведущем немецком журнале «Анналы физики» выходит статья мало кому известного тогда Альберта Эйнштейна: «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света». Точка зрения названа *эвристической*, потому что обосновать автор ее не может. Он следует гипотезе Планка и показывает, что такая точка зрения не только полезна, но и не противоречит термодинамике.

Приведу два абзаца, которыми заканчивается введение в статью:

«Я в самом деле думаю, что опыты, касающиеся “излучения черного тела”, фотолюминесценции, возникновения катодных лучей при освещении ультрафиолетовыми лучами и других групп явлений, связанных с возникновением и превращением

света, лучше объясняются предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно. Согласно этому сделанному здесь предположению, энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распространяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком.

Ниже я излагаю ход мыслей и факты, натолкнувшие меня на этот путь, в надежде, что предлагаемая здесь точка зрения, возможно, принесет пользу и другим исследователям в их изысканиях».

Пользу, которую принесла эта работа Эйнштейна, переоценить трудно. Родилась, говоря современным языком, *квантовая электродинамика* – важная часть современной физики. Она описывает взаимодействие заряженных частиц между собой и с электромагнитным полем, объясняет устройство атомов, молекул, их свойства, строение различных макроскопических тел и позволяет понять природу неограниченного числа наблюдаемых явлений.

Эйнштейн всегда подчеркивал, что исходным пунктом его рассуждений служит квантование энергии, введенное Планком. В работе, где фактически построена теория фотоэффекта, первый параграф называется «Теория излучения Планка и световые кванты». Заканчивается он следующими словами:

«Изложенные выше рассуждения, по моему мнению, отнюдь не противоречат теории излучения Планка; напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент – гипотезу световых квантов».

В начале XX века выяснилось, что существуют кванты электромагнитной энергии. Как вы понимаете, световые кванты давно не гипотеза. В 1926 году они обрели собственное имя: физико-химик Гилберт Льюис назвал их *фотонами*, и имя прижилось.

Итак, *фотон* – частица с энергией $\varepsilon = \hbar\omega$, где ω – частота света. Причем если частота ω электромагнитного поля не попадает в диапазон, соответствующий человеческому зрению, квант и тогда называют фотоном. Эйнштейн показал, что фотон обладает импульсом $p = \hbar\omega/c$, а так как $\omega = 2\pi c/\lambda$, где λ – длина волны, то $p = 2\pi\hbar/\lambda$. Если «забыть» о волновом происхождении фотона, то фотон вроде бы частица. Нередко фотон называют *квазичастицей* – якобы частицей. Энергия и импульс фотона связаны соотношением $\varepsilon = cp$. Согласно релятивистской

механике, связь между энергией и импульсом у «настоящей» частицы сложнее:

$$\varepsilon = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2},$$

где m – масса частицы. Значит, *фотон – частица с нулевой массой*.

Формула, определяющая зависимость энергии от импульса, демонстрация универсальности скорости света: *зависимость «энергия – импульс» универсальна*. Вне зависимости от массы частицы и других ее свойств формула содержит одну и ту же величину – скорость света в вакууме c .

А как обстоит дело с обычной формулой для энергии частицы, движущейся со скоростью v , которая значительно меньше скорости света c ? В классической механике импульс равен $p = mv$. Нерелятивистский предел осуществляется при $v \ll c$. Умножим это неравенство на массу: $p \ll mc$ – импульс должен быть значительно меньше импульса частицы, летящей со скоростью света. Теперь, думаю, цепочка равенств должна быть очевидной:

$$\varepsilon^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2, \quad \varepsilon^2 - m^2 c^4 = c^2 p^2, \quad (\varepsilon - mc^2)(\varepsilon + mc^2) = c^2 p^2,$$

$$\varepsilon - mc^2 = \frac{c^2 p^2}{\varepsilon + mc^2},$$

$$\varepsilon - mc^2 \approx \frac{p^2}{2m}, \quad \varepsilon - mc^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}.$$

Мы закончили знаком точного равенства, чтобы подчеркнуть: в классической механике полученные формулы точны. Энергию покоя можно вовсе опустить: ведь энергию можно отсчитывать от любого ее значения. Так привычной:

$$\varepsilon = \frac{mv^2}{2}, \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{p^2}{2m}, \quad p = mv.$$

Сказанное, по-моему, полезно как пример перехода от релятивистской механики к классической. Правда, не всей механики, а только одной ее формулы.

Утверждение Эйнштейна об импульсе фотона было встречено с недоверием, которое рассеялось только с открытием Артуром Комптоном (1892–1962) эффекта, названного его именем. В 1922 году (пришлось выйти за пределы первого десятилетия) Комптон, изучая рассеяние электронами рентгеновского излучения, обнаружил изменение длин рентгеновских волн. Объяснение опиралось на предположение, что с электроном сталкивается не волна, а *частица-фотон* с энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar\omega/c$. За

свое открытие в 1927 году Артур Комптон был награжден Нобелевской премией.

Подведем промежуточный итог: после открытия Планка выяснилось, что с помощью введенной им постоянной свет обретает свойства частиц, позволяющие объяснить ряд реально наблюдаемых явлений, противоречащих представлению о свете как о волнах. Надо при этом помнить, что для объяснения другого набора не менее реальных фактов представление о свете как о волнах *необходимо*. К тому же, волновая теория света имела надежное обоснование – электромагнитную теорию Максвелла. А корпускулярная – пока не имела.

Надо подчеркнуть, что Эйнштейн воспринимал ситуацию как трагическую. Он отчетливо это высказывал не раз. Я приведу одну цитату. 1924 год, столетний юбилей со дня рождения Уильяма Томсона, лорда Кельвина (1824–1907). Эйнштейн превозносит заслуги лорда Кельвина, но заканчивает панегирик так: *«Все же в деятельности этого высокого ума есть нечто трагическое»*. И разъясняет свою точку зрения:

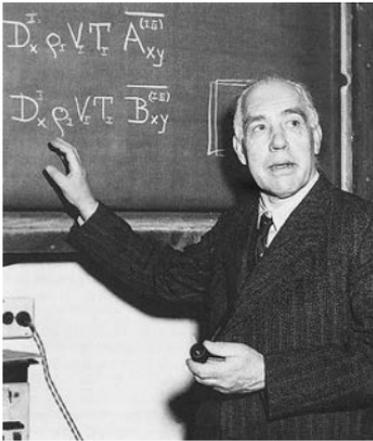
«Фундаментом для всего творчества Томсона была механика Ньютона. Этот стремящийся к единству познания ум глубоко верил, что сущность всех физических явлений сводится к движению и что механика Ньютона дает, в конце концов, ключ к пониманию всего происходящего... Если бы Томсону, которому эти основы физического познания почти до конца жизни казались неизблемыми, удалось вдруг ознакомиться с нашей современной литературой, он бы ужаснулся...»

Десятые годы: планетарная модель атома

Начну этот раздел с высказывания Нильса Бора о многолетней дискуссии с Эйнштейном на темы квантовой механики. Это будет чем-то вроде вступления к данному разделу.

Дискуссии многократно и подробно описаны.⁹ Задача построения логически непротиворечивой, последовательной, завершенной теории микромира, по понятиям Эйнштейна и Бора, имела мировоззренческий, истинно философский характер. Они были правы.

⁹ Недавно вышел из печати перевод книги Манжита Кумара «Квант. Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности» (М.: Corpus, 2013, перевод И.М.Кагановой). В доступной форме, увлекательно описаны многолетние дискуссии между Эйнштейном и Бором. Приведено много интересных фактов об обстановке, в которой проходили дискуссии, о поведении участников.



Нильс Бор

Итак, слова Бора:
«Урок, который мы из этого <из дискуссий> извлекли, решительно продвинул нас по пути никогда не кончающейся борьбы за гармонию между содержанием и формой; урок этот показал нам еще раз, что никакое содержание нельзя уловить без привлечения соответствующей формы и что всякая форма, как бы ни была она полезна в прошлом, может оказаться слишком узкой для того, чтобы охватить новые результаты».

Когда проходили дискуссии, квантовая механика, с логикой которой не мог примириться Эйнштейн и адептом которой был Бор, заменила эклектическую теорию, отличавшуюся тем от классической физики, что в нее, казалось бы совершенно произвольно, было введено квантование. Квантование позволило объяснить эффекты, с позиций классической физики необъяснимые. Эйнштейн сыграл существенную роль во введении квантов в атомную физику. Не вызывало сомнений, что физика движется в правильном направлении. Второе десятилетие XX века это подтвердило. В этом заслуга, прежде всего, Нильса Бора.

Атомное строение материи на грани XIX и XX веков было принято уже почти всеми учеными. В конце XIX века Дж.Дж.Томсон экспериментально открыл атом электричества – электрон и описал, как он представляет себе строение нейтральных атомов. Модель Томсона получила полусутоливое название *пудинг с изюмом*. Томсон представлял себе атом в виде сгустка положительной субстанции, в которую вкраплены отрицательные электроны.

Эрнест Резерфорд, исследуя рассеяние α -частиц на веществе, в 1911 году показал, что предположение Томсона неверно, и предложил другую модель атома. Согласно Резерфорду, положительно заряженные частицы сосредоточены в тяжелом центре атома, в его ядре, а отрицательно заряженные электроны находятся на сравнительно большом расстоянии от ядра. Каждый атом – крошечная модель Солнечной системы. Резерфорд считал, что электроны движутся вокруг ядра по орбитам, подобным орбитам планет. Важное место в его теории играло то, что

кулоновские силы притяжения между разноименными зарядами и гравитационная сила в законе всемирного тяготения подобны друг другу: обе убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между телами.

Было очевидно, что согласующаяся с результатами по рассеянию α -частиц планетарная модель Резерфорда противоречит классической физике, ее двум важным составляющим: электродинамике и механике. Электроны по орбитам движутся с ускорением, следовательно, *должны* излучать электромагнитные волны и тем самым терять энергию. Теряя энергию, они *должны* свалиться на ядро. Легко посчитать, что время жизни электронов на орбитах должно быть ничтожно. Согласно классической физике атомы Резерфорда существовать не могут. Это понимал и создатель модели, но у него было *ощущение*, что каким-то образом противоречие будет устранено.

С 1913 года исследованием возможности описать свойства атомов, используя модель Резерфорда, занялся Нильс Бор. Логически непротиворечиво подправить классическую физику, чтобы с ее помощью объяснить устойчивость атома, как хорошо понимал Бор, невозможно. Он решает дополнить ядерную модель Резерфорда *постулатами*, которые с классической физикой несовместимы. Они, несомненно, – следствия оказавшихся столь полезными квантовых «беззаконий» Планка и Эйнштейна.

Нильс Бор убедился и убедительно доказал, что привнесенные им постулаты могут служить основой теории атома, объяснив в принципе не только устойчивость атомов, но и многие их свойства. Для атома водорода (простейшего из атомов) с одним электроном на орбите Бору удалось вывести формулы, соответствующие экспериментальным данным. Работы Бора сделали ядерную модель Резерфорда общепринятой. Поэтому в историю она вошла как *модель Резерфорда–Бора*. Бор постулирует, что электроны вращаются вокруг ядра по классическим орбитам, чем, казалось бы, утверждает, что движение электронов в атоме подчиняется механике Ньютона. Именно к этому утверждению Бор в виде постулатов добавляет условия квантования, которые, естественно, из классической механики не следуют.

Уже Планк понимал, что дискретные значения энергии осциллятора – результат квантования *действия* колеблющейся частицы. Первый незаконный шаг Нильса Бора – обобщение мысли Макса Планка: *действие* S электрона, двигающегося вокруг ядра, *квантуется*: $S = n\hbar$, где n – произвольное целое

число, большее или равное единице.¹⁰ По значениям действия можно вычислить значения энергии электрона. Как и у действия, естественно, значения энергии электрона дискретны.

Последуем за Бором и рассмотрим движение электрона в атоме водорода. Так как протон – ядро атома водорода – почти в 2000 раз тяжелее электрона, можно считать, что протон неподвижен. Потенциальную энергию электрона вдали от ядра (формально, на бесконечности) примем равной нулю. Тогда потенциальная энергия электрона отрицательна и равна $-e^2/r$, где $e > 0$ – величина электронного и протонного зарядов (величина заряда по модулю), а r – расстояние электрона от протона. Сила притяжения электрона к ядру равна $-e^2/r^2$. Знак «минус» указывает, что сила направлена к началу координат. Она сообщает электрону центростремительное ускорение, равное v^2/r . Известно: если энергия электрона отрицательная, то в общем случае классическая траектория электрона – эллипс. Движение по окружности – частный случай. Его и рассмотрел сначала Бор.

Из второго закона Ньютона находим связь скорости v с радиусом круговой орбиты a : $m_e v^2 = e^2/a$, где m_e – масса электрона. Энергия электрона – сумма потенциальной и кинетической энергий – есть $-e^2/(2a)$. Это пока все, что можно извлечь из утверждения, что электрон вращается по классической круговой орбите.

Эксцентриситет орбиты зависит от момента импульса вращающегося тела – планеты вокруг Солнца или электрона вокруг ядра. При вращении по окружности момент импульса равен $M = e^2 \sqrt{m_e/(2|\epsilon|)}$. Видно, что, даже если пренебречь излучением, классическая механика не может объяснить, чем определяется размер атома. Классическая механика, объяснившая законы Кеплера и столь полезная в мире макроскопических тел, не может ответить на простейший вопрос: «Почему атомы водорода одинакового размера?»

Но мы пока не использовали квантование. Как говорилось, в результате квантования *действия* квантуется и энергия электрона. Квантованные значения энергии таковы:

$$\epsilon_n = -\frac{E_i}{n^2}, \text{ где } E_i = \frac{m_e e^4}{2\hbar^2}, \text{ а } n \geq 1. \quad (4)$$

¹⁰ Ниже будет сформулировано более наглядное правило квантования.

Самое низкое значение энергии электрона соответствует $n = 1$. Опуститься ниже электрон не может.¹¹ При $n = 1$ атом находится в *основном* состоянии. В *возбужденном* состоянии атома электрон имеет энергию из дискретного набора (4) с $n > 1$. С ростом n расстояния между уровнями энергии делаются все меньше, уровни сгущаются, приближаясь к нулю.

Согласно классической механике электрон с равной нулю энергией движется по параболе, а с положительной – по гиперболе. Непериодическое движение не квантуется. Значит, если $\epsilon > 0$, энергия у электрона может быть любой. Из выражения (4) мы приходим к выводу, что *все атомы водорода в основном состоянии имеют один и тот же радиус орбиты электрона, равный* $a_B = \hbar^2 / (m_e e^2)$. Его называют *радиусом Бора*. Индекс «В» этому соответствует. Порядок величины радиуса Бора $0,5 \cdot 10^{-8}$ см. Он неплохо совпадает с истинными размерами атома водорода.

Из одного состояния в другое электрон переходит, демонстрируя выполнение закона сохранения энергии: при переходе электрон должен либо поглотить, либо отдать разность энергий между двумя уровнями. Если изменение состояния происходит за счет поглощения или излучения фотона с частотой ω , то, в согласии с гипотезами Планка и Эйнштейна, закон сохранения энергии принимает вид

$$\hbar\omega = \epsilon_n - \epsilon_m, \text{ причем } n > m. \quad (5)$$

Равенство (5), возведенное Бором в ранг постулата, противоречит электродинамике Максвелла, согласно которой, двигаясь по орбите с ускорением, электрон должен *непрерывно* излучать электромагнитные волны с частотой обращения по орбите. Вместо этого электрон излучает порции электромагнитной энергии, перепрыгивая с орбиты на орбиту.

Спектроскопия в начале века – одна из наиболее точных физических дисциплин. Частоты, длины волн излучения и поглощения атомами, многими молекулами не только измерены. В некоторых случаях удавалось найти формулы для описания полученных результатов. Приведем *формулу Бальмера*, которая описывает спектр атомарного водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m, n \geq 1, \quad m > n, \quad (6)$$

¹¹ Если бы мы рассматривали и эллиптические орбиты, результат не изменился бы.

где λ – длина волн света в спектре, n и m – целые числа, R – константа Ридберга.¹² Численное значение константы Ридберга было известно.

Если рассуждения Бора (его постулаты) верны, то формула (6) – это запись в других терминах закона сохранения энергии (5) и следствие выражения (4). Так как $\omega = 2\pi c/\lambda$, то должно быть

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{1}{2} \pi \hbar c \right) E_i \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad E_i = \frac{m_e e^4}{2 \hbar^2}, \quad m, n \geq 1, \quad m > n, \quad (7)$$

т.е. для константы Ридберга должно иметь место следующее выражение:

$$R = \frac{1}{2} \pi \hbar c E_i = \frac{m_e e^4}{4 \pi \hbar^3 c}.$$

Обратим внимание: в выражении для R скорость света появилась из-за того, что мы выразили частоту ω через длину волны λ . В формулах механики скорость света c может появиться только тогда, когда скорость движения порядка скорости света. Для электрона в атоме водорода это не так (см. ниже). Приведенное в справочниках значение константы Ридберга $R = 109677,593 \text{ см}^{-1}$ согласуется с выписанной формулой.

Давно задумывался, что переживал Нильс Бор, поняв, как устроен атом. Для уверенности в своей правоте он должен был убедиться, что полученные им формулы отвечают данным опытов. Иначе не могло быть никаких оправданий для введения предположений (постулатов), противоречащих классической механике. Каждый, делающий нечто новое, естественно, получает радость, когда это *нечто* ему удается. И все же очень трудно себе представить остроту переживания человека, из-под пера которого впервые возникло правильное значение константы Ридберга. Не измеренное, а вычисленное, причем вычисленное на основании выведенной *им* формулы. При этом надо помнить, что основанием служили не апробированные проверенные практикой нескольких веков законы классической физики, а *сформулированные им же постулаты, противоречащие классической физике*.

Проследив последовательность рассуждений при выводе формулы для константы Ридберга R , я понял: Бор не мог сомневать-

¹² Иоганн Якоб Бальмер (1825–1898) – швейцарский математик и физик, Иоганнес Роберт Ридберг (1854–1919) – шведский физик-спектроскопист.

ся в правильности вывода. Вся картина была столь красивой, что не могла быть неправильной. Думаю, это только усилило его радость.

Формула годится не только для водорода. Например, если у атома с зарядом ядра $+Ze$ в результате ионизации остался только один электрон, то спектр такого иона должен быть подобен водородному, но с константой Ридберга, равной Z^2R . Это предположение подтвердилось. Так, для иона гелия с одним электроном константа Ридберга в 4 раза больше, чем для водорода. Более того: руководствуясь значением константы Ридберга, по спектру рентгеновского излучения уточнили связь атомного номера элемента с зарядом ядра.

В качестве подтверждений правильности подхода, основанного на квантовании энергии электрона, в Нобелевской лекции Бор привел перечисленные факты. И другие – весьма убедительные. Два примера:

- правильная оценка потенциала ионизации как работы, которую надо затратить, чтобы «оторвать» электрон от ядра;
- непосредственное наблюдение атомных уровней – по неупругому рассеянию электронов на атомах.

«За заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения», – сказано в постановлении Нобелевского комитета, который в 1922 году вручил Нильсу Бору высшую научную награду – Нобелевскую премию по физике. 11 декабря 1922 года Нильс Бор прочитал традиционную, обязательную для каждого лауреата лекцию. Он назвал ее «Строение атома». Читая эту лекцию, пытаюсь представить себе впечатление, которое она произвела на современников, я понял, что не могу, не получается. Ведь я уже знаю, как естественно объясняет свойства атомов современная квантовая механика. Построения Нильса Бора я воспринимаю как материал для научно-популярной лекции. Но есть нечто, что меня поистине поражает: объяснение структуры периодического закона, таблицы Менделеева (как у нас принято говорить). Нильс Бор обладал лишь намеками на устройство электронных оболочек, но ему хватило интуиции, удивительного чутья, чтобы установить типы электронных орбит элементов. Бор понимал, что его постулаты не обоснованы, но имел смелость использовать выводы эклектического подхода для построения теории периодического закона. Смелость принесла успех. В частности, было правильно предсказано положение найденного впоследствии атома (гафния), а основные черты объяснения сохранились до сих пор.

Да, Арнольд Зоммерфельд (1868 – 1951) со своими учениками и сотрудниками обобщил результаты Бора на эллиптические орбиты и учел релятивистские поправки. Но еще не был открыт спин электрона, не был сформулирован принцип запрета Паули, казалось бы, абсолютно необходимые для понимания структуры электронных оболочек. Знание экспериментальных результатов и интуиция помогли Бору. Результат превзошел все ожидания: *химия обрела основу в физике*. Была объяснена природа отличия одних элементов от других. Физика самым серьезным образом подтвердила свою роль фундаментальной науки.

Повторю: боровская эклектическая теория – классическая механика плюс квантовые постулаты – формально пригодна только к водородоподобным атомам. Даже теорию атома гелия, с двумя электронами, построить Бору не удалось. И все же теория Бора вызвала огромный интерес и была не только усовершенствована, но и развита во многих направлениях. Последовали закономерные уточнения: были учтены эллиптичность орбит электронов, отличие эффективной массы электрона от истинной за счет массы ядра, релятивистские поправки. Но самое важное то, что подход Бора, связавшего структуру спектров излучения и поглощения атомов с характером движения электронов по орбитам, удалось распространить на любые атомы. Орбиты потом будут «отменены», но сохранятся характеристики состояний отдельных электронов в атоме. Чисто квантовое понятие *спин* было введено, чтобы объяснить расположение спектральных линий. В частности, объяснить существование дуплетов – двух близко расположенных линий. И принцип запрета был сформулирован Паули до того, как была построена логически строгая, непротиворечивая квантовая механика.

Что проще?

В Нобелевской лекции Бор о многом из того, что произошло в прошедшее десятилетие, подробно рассказывает, подчеркивая сделанное другими. Но не мог он, конечно, предсказать того, что его теория послужит стимулом Вернеру Гейзенбергу (1901–1976) к созданию матричной квантовой механики, логически безупречной, как и волновая квантовая механика Эрвина Шредингера (1887–1961). Но мы-то знаем, что так и было. И всего через несколько лет эклектическая теория Бора ушла в прошлое.

Физика претендует на открытие законов природы. Не вдаваясь в метафизическую проблему познаваемости Природы, отметим одно из ее свойств, одно из тех, которые и делают Природу

познаваемой. Это свойство называть не принято. Не знаю, имеет оно наименование или нет. Но есть *методологический принцип*. Он – следствие этого, неназываемого, но, уверен, важнейшего свойства Природы: *принцип достаточного основания*, или *бритва Оккама*¹³. В кратком виде он гласит (по Оккама): «Не следует множить сущее без необходимости». Или более современно: для объяснения требуется *минимум средств – только необходимые*.

Подход Бора демонстрирует использование лишь самого необходимого. К классической механике добавлены всего два квантовых постулата – и столько результатов! Правда, в попытках описать свойства атомов пришлось опираться на экспериментальные данные, а не на теорию. Несмотря на простоту созданной им теории, даже Бор, боюсь, должен был ощущать: принцип Оккама нарушен. Прежде всего потому, что теория не обща. Необходима общая теория, применимая ко всем атомам и молекулам, а не своя к каждой микрочастице.

Подвиг Нильса Бора включает его трезвую оценку сделанного. Он понимал эклектичность использованного подхода: введенные им постулаты не следуют из классической механики, а по его же постулату электроны в атоме движутся по законам классической физики. Один постулат противоречит другому.

Убедившись, что его подход не применим к многоэлектронным системам, Бор оставляет попытки усовершенствовать эклектичную теорию, а вместе с более молодыми физиками-теоретиками активно участвует в создании истинно новой физики – *квантовой механики*.

Аппарат квантовой механики создал не Бор. Основной вклад внесли Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер, Поль Дирак. Но роль Нильса Бора переоценить нельзя. Она никогда и не умалется. Хотя каждый из перечисленных творцов квантовой механики работал самостоятельно, думаю, все они ощущали влияние Бора. Я бы даже сказал чуть иначе: присутствие Бора. Они знали, Бор *есть*. Если получишь новый результат, то о нем следует рассказать Бору. А значит, необходимо продумать все до конца.

Нильс Бор – один из создателей квантовой механики. Принятая большинством интерпретация новой механики получила

¹³ «Бритва Оккама» (иногда «лезвие Оккама») – принцип, получивший название от имени английского монаха и философа Уильяма Оккама (ок. 1285–1349). Не кажется ли вам, что доказательством важности принципа служит то, что фамилию того, кто его сформулировал (пусть не вполне точно), помнят более шести столетий?

название *копенгагенской*. В ее формулировке и во внедрении принятого подхода сыграли выдающуюся, а нередко определяющую роль бесконечные дискуссии с участием Бора в созданном для него институте в Копенгагене.

А как с бритвой Оккама? Ведь, несомненно, квантовая механика сложнее классической. Не только своим математическим аппаратом, но и своей структурой на уровне теории познания: квантовая механика *как бы* ставит предел познаваемости. Многие ответы, полученные с помощью квантовой механики, менее определенные, чем в классике: вместо привычного в классической механике ответа, чему равна та или иная характеристика движения частицы (скорость, координата), *окончательный* ответ согласно квантовой механике таков: данная характеристика с определенной вероятностью имеет то или иное значение.

Для сравнения результатов квантовой теории с экспериментом во многих случаях надо, чтобы эксперимент был многократно повторен. Только тогда можно убедиться, верен квантовомеханический ответ или нет. Ответ верен, если значение вероятности, вычисленное с помощью уравнений квантовой механики, соответствует эксперименту. При этом уравнения квантовой механики *как бы* описывают поведение *отдельной* частицы. Никогда не было обнаружено несоответствия между экспериментом и квантовой механикой. При этом продолжаются жаркие споры вокруг трактовки причины необходимости использовать аппарат теории вероятности для формулировки результатов квантово-механических расчетов.

Все же, думаю, можно утверждать, что квантовая механика удовлетворяет принципу Оккама. Она описывает свойства всех частиц микромира и, похоже, не может быть упрощена. Логическая структура квантовой механики детально анализировалась: в ней нет ничего лишнего. Оценивая теорию, надо думать и о ее месте в научной картине Мира. Место квантовой механики на материке познанного очень велико. Она необходима не только для описания свойств атомных и субатомных частиц. Без квантовой механики невозможно постичь большинство явлений в макромире, различие свойств веществ от таких самых привычных, как, скажем, проводимость металлов, до таких непредставимых, как сверхпроводимость и сверхтекучесть.

В настоящее время эклектические теории Планка, Эйнштейна и Бора уже не в действующей физике – они перешли в историю физики. Но в истории физики их роль очень велика и, по моему мнению, весьма поучительна.

Частицы и волны

Заговорив о квантовой механике, особенно о создании Шредингером волновой механики, я явно нарушил хронологию.

Волновая механика была создана в «борьбе» с теорией, которая утверждала, что в микромире происходят скачки с одного уровня на другой. Эрвин Шредингер пытался вернуть атомную физику в мир Ньютона и Лейбница с их *дифференциальными уравнениями*, описывающими непрерывное движение частиц. Построив волновую механику и тем дав способ, решая дифференциальные уравнения, получать ответы на вопросы, которые физик задает Природе, Шредингер поставленную себе задачу не решил. Скачки отменить не удалось, как и вероятностную трактовку, которая так отличает квантовую механику от классической. Но произошло нечто другое: была строго доказана эквивалентность матричной механики Гейзенберга и волновой механики Шредингера.

Для подавляющего большинства физиков сказанное – дополнительное доказательство справедливости обеих форм квантовой теории.

Примером для Шредингера послужила идея, высказанная Луи де Бройлем в 1924 году. По предположению Луи де Бройля, *движение каждой частицы сопровождается волновым процессом*. Корпускулярно-волновой дуализм сейчас привычен. Выделенные курсивом слова даже удивления не вызовут. У тех, кто интересуется физикой, уж точно. Тогда же большинство восприняло идеи Луи де Бройля как выпад, эпатаж.

Луи де Бройль много занимался оптикой. Именно разные формы описания движения света навели его на введение волн материи. Не могу изложить цепочку рассуждений де Бройля. Но, по-моему, то, что я сейчас напишу, может помочь понять ход мыслей Луи де Бройля.

Выпишем сформулированные Эйнштейном уравнения для фотона:

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad p = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}.$$

Перепишем их, разделив на постоянную Планка \hbar :

$$\omega = \frac{\varepsilon(\vec{k})}{\hbar}, \quad \vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}, \quad \lambda = \frac{2\pi}{k}. \quad (8)$$

Мы получили уравнения, которые описывают *волну де Бройля* – волну с длиной волны λ (\vec{k} – ее волновой вектор) и с круговой

частотой ω . Для этого, правда, следует признать, что $\varepsilon(\vec{p})$ – это значение энергии частицы с импульсом \vec{p} . Обратите внимание, что импульс \vec{p} и волновой вектор \vec{k} – векторы.

Каков физический смысл волн де Бройля, было неясно, но в 1927 году Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер обнаружили дифракцию электронов на решетке кристалла, причем дифракционная картина описывалась волнами де Бройля. Тем самым, выяснилось, что волны де Бройля это физическая реальность, имеющая непосредственное отношение к электронам, но какое – оставалось загадкой.

Волны де Бройля помогают сделать постулаты Бора весьма наглядными. Действительно, давайте примем, что на классической орбите электрона, летящего вокруг ядра, помещается целое число волн де Бройля. Несколько строк, и мы легко получим квантованные (дискретные) значения энергии электрона. Те, что были приведены. Значит, и дальнейшие формулы будут прежними.

Простые вычисления предлагаю проделать читателям самостоятельно. Вычисления, действительно, просты. Чтобы получить формулы, выведенные впервые Бором, надо использовать *нерелятивистские* формулы.

Постоянная Планка – число

Я всматриваюсь в вас, о, числа...

Велемир Хлебников

*Навсегда – не слово, а вправду цифра,
чьи нули, когда мы зарастем травой,
перекроют эпоху и век с лихвою.*

Иосиф Бродский

Построение картины мира без знания численных значений физических величин невозможно. Некоторые числа – значения определенных физических величин – носят титул *фундаментальных констант*. Пять ниже выписаны. Несомненно, это фундаментальные константы. Даже более того: если кто-то решится добавлять к ним еще числа, я, наверное, не буду спорить, но, перефразируя Оруэлла, отмечу: «Те, что выписаны здесь, все же *более* фундаментальны!»

Итак, пять чисел и, конечно, их наименования и принятые обозначения:

постоянная Планка $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг · с = $1,05 \cdot 10^{-27}$ г · см² · с⁻¹,
масса электрона $m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-28}$ г ,

заряд электрона $e \approx 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ,

скорость света $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с,

гравитационная постоянная $G \approx 6,7 \cdot 10^{-8}$ см³ · г⁻¹ · с⁻².

Подчеркивая качественный характер нашего рассмотрения, привожу приближенные значения. Фундаментальные константы известны со значительно большей точностью.

Физический смысл всех выписанных констант ясен. Четырех – по названию, а постоянная Планка \hbar , как мы упоминали, это *квант действия*. Точное определение *действия*, как понятия механики, нам не понадобилось. Мы знаем, как постоянная Планка входит в важнейшие формулы атомной физики, знаем ее размерность. За квантом действия вполне заслуженно закрепилось имя Макса Планка. Ведь именно он первым ввел постоянную \hbar в физику. А вот дали постоянной Планка первое место в списке мы потому, что постоянная Планка – тема этой статьи. Она – королева. Все остальные константы здесь – ее свита.

Что такое планковская длина

В год «рождения» постоянной Планка все выписанные числа и их смысл были известны. У некоторых физиков уже было понимание, что они, эти числа, – фундаментальные константы. Мы пока не упоминали самую древнюю из фундаментальных констант – гравитационную постоянную G . В микромире она (во всяком случае, пока) не играет никакой роли: гравитационная сила неизмеримо меньше сил, действующих между атомными и субатомными частицами. Сфера действия гравитации – макромир. Но, несомненно, придет время, и постоянная гравитации будет фигурировать в теории субмикроскопического мира. Вместе с постоянной Планка.

В последнее время физики поставили перед собой амбициозную задачу: убедиться, что *все* существующие силы в природе – различные проявления единой *суперсилы*. Среди *всех* сил, естественно, есть и гравитационная сила. По мнению тех, кто занят этими проблемами, гравитация не просто проявляет себя в микромире, а без нее невозможно построить *теорию всего* – теорию, о которой мечтают физики-теоретики.

Попытки создания всеобъемлющей теории заставляют физиков-теоретиков заглянуть в недоступные физикам-экспериментаторам (возможно, пока) глубины материи и пространства, где, оказывается, гравитационная сила должна играть существенную роль. В научных статьях, и даже в научно-популярных, все чаще

встречается термин *планковская длина* – мера желанного проникновения в структуру пространства. Какова она и как ее оценить?

Фундаментальные константы имеют размерность. Каждая – свою. Из трех – из \hbar , c и G – легко «построить» величину размерности длины. Обозначил ее l_P . Можно убедиться, что

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см.}$$

Это и есть *планковская длина*. Заглавное P в индексе (латинский шрифт), конечно, в честь Макса Планка (Max Planck). Что обозначает величина, на 20 порядков меньшая размера нуклона, пока не вполне ясно. Но по фундаментальным константам, которые входят в ее определение, ясно: физический смысл планковской длины позволит понять *квантовая теория гравитации* – будущая теория, долженствующая объединить с квантовой механикой релятивистскую теорию гравитации. Пока это не удастся.

Надежда на то, что столь обыденная (хотя бы в связи с набитыми при падениях шишками) гравитационная сила поможет разобраться в структуре фундаментальной теории, действующей на субмикроскопических расстояниях, до сих пор кажется фантастической. Поэтому хочу обратить внимание: есть знакомый пример сил, проявляющих себя и на микроуровне, и в макромире. Это – электромагнитные силы. Кулоновская сила действует между протоном и электроном в атоме водорода и между космическими объектами, если они заряжены. Особенно убедительной микро-макро-природа электромагнитных сил стала после того, как выяснилось, что электромагнитная сила – лишь проявление единой *электрослабой силы*, а ее вторая составляющая проявляет себя на субатомных масштабах.

Принято считать, что между атомными частицами действует гравитационная сила с той же константой G , которая ответственна за притяжение космических объектов друг к другу и за падение на землю легендарного ньютоновского яблока. Правда, сравнение показывает, что гравитационная сила баснословно мала по сравнению с электромагнитной.¹⁴ Однако, если «добраться» до планковских глубин материи, что означает исследовать структуру материи и пространства–времени на масштабах планковской длины, то ситуация, считают, должна кардинально

¹⁴ Убедитесь в этом, сравнив силу кулоновского отталкивания двух протонов друг от друга с их гравитационным притяжением.

измениться. Во всяком случае, не исследовав умопомрачительные глубины, хотя бы лишь теоретически, не удастся осуществить мечту: *построить теорию всего*.

Наука всегда готовится к новым путешествиям. Одна из задач, которые ставят перед собой «путешественники», – добраться до упомянутых недоступных физикам-экспериментаторам (возможно, пока) глубин материи и пространства. Впереди много тяжелых путешествий. Неизвестно, когда донесется очередной радостный крик: «Земля!» Мы даже не можем себе представить, какие вычурные теории предстоит создать, какие новые приборы изобрести, построить, а потом освоить полученные на них результаты – все это, чтобы расширить материк познанного. Планируя новые «путешествия», исследователи просторов океана непознанного, насколько я знаю, не расстаются со всем, что символизируют выписанные константы e , c , \hbar , G и m_e . Во всяком случае (по меньшей мере, пока), то знание, которое они представляют, не только надежно служит для объяснения буквально бесконечного количества явлений и свойств на материке познанного. Оно, как считают многие, может послужить существенному расширению и углублению понимания Мира, открыть нечто новое в океане непознанного.

Размерности и безразмерные комбинации размерных величин

В предыдущем разделе мы использовали размерность фундаментальных констант, не обсудив сделанный выбор единиц. Выбрал я, как видно, сантиметр, грамм и секунду. Трех достаточно. Все физические величины могут быть указаны, если использовать эти три. Правда, полагается вместо сантиметра использовать метр, а вместо грамма – килограмм. Как-то мне странно такие большие единицы использовать для описания атома. Шучу, конечно: и сантиметр примерно в сто миллионов раз больше диаметра орбиты электрона в атоме водорода, а назвать во сколько раз грамм тяжелее атома водорода не умею. Могу только записать: грамм приблизительно в 10^{24} раз тяжелее атома водорода. Просто я привык к сантиметру (см), грамму (г) и секунде (с), а перевести так просто! Есть и педагогический замысел: демонстрация того, что выбор условен.

Условность выбора системы единиц измерения волновала Макса Планка. Ему казалось, что вместо случайных величин следует ввести систему единиц, основанную на фундаментальных константах – на скорости света c и на гравитационной постоянной G , к которым он присоединил постоянную Планка \hbar

и константу Больцмана k_B .¹⁵ В 1906 году Планк предложил физикам использовать вместо грамма планковскую массу

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ г},$$

вместо сантиметра – планковскую длину l_P , которая, выраженная через m_P , выглядит очень просто:

$$l_P = \frac{\hbar}{m_P c}.$$

Секунды предлагалось заменить планковским временем t_P . Определение его очевидно:

$$t_P = \frac{l_P}{c}, \text{ или } t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}.$$

Подставляя значения констант, получим $t_P = 5,39 \cdot 10^{-44}$ с.

На первый взгляд, кому может понадобиться такая система единиц?! Оказалось, при описании первых мгновений Вселенной после Большого взрыва удобна именно планковская система единиц.

Представляю, как удивился бы Планк...

После размышлений над столь современными проблемами вернемся в доквантовую эру. Одно из важных достижений теории Бора – вычисление размера атома водорода, получившего наименование боровского радиуса. А ведь для того чтобы определить размер атома водорода, по крайней мере по порядку величины, похоже, не нужна никакая теория. Зная размерности фундаментальных констант m_e , e и \hbar , легко проверить, что другой комбинации фундаментальных констант, которая имеет размерность длины, кроме определяющей радиус Бора

$$a_B = \frac{\hbar^2}{m_e e^2},$$

нет. Значит, построив соответствующую комбинацию, мы по порядку величины узнаем размер атома. Что, теория вовсе не нужна? Конечно, нужна! Прежде всего теория необходима, чтобы выяснить, какие из фундаментальных констант *могут* входить в нужное выражение, а кроме того, из теории следует многое, чего не угадаешь из соображений размерности. Но самое главное, теория и ее результаты должны быть частью логически

¹⁵ Постоянная Больцмана k_B была введена, чтобы можно было использовать размерности механики в термодинамике: $k_B T$ – температура в эргах.

безупречной картины природы. Теория Бора этому условию не удовлетворяла, но она оказалась важным этапом на пути к настоящей теории, указав, что должна объяснить логически последовательная теория. Подчеркнем еще раз: большая заслуга Бора в том, что, не остановившись на полученных результатах, он принял определяющее участие в создании *квантовой механики*, ставшей истинной теорией, описывающей движение и структуру атомов, молекул и, как оказалось, даже тех микрочастиц, которые долгое время считались элементарными: нуклонов и мезонов.

Очевидно, что сравнивать можно только величины одной размерности. Постоянная Планка имеет ту же размерность, что и момент импульса. Пусть однограммовая дробинка вращается со скоростью 1 см/с по окружности радиусом 1 см. Ее момент импульса равен $1 \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$, а постоянная Планка в 10^{27} раз меньше. По сравнению с макроскопической величиной постоянная Планка баснословно мала. Не удивительно, что квантовые явления в движении макроскопических тел не проявляются. Хотелось бы написать: не проявляются в макромире. Но это не так. Нельзя забывать, что стабильность атомов и молекул, из которых состоят тела, не может быть объяснена без помощи квантовой механики. Кроме того, многие свойства макроскопических тел нельзя понять, не привлекая квантовой механики.

В микромире постоянная Планка обычно ведет себя как очень маленькая величина, а бывает и очень большой. Иногда, чтобы исследовать явление, мы предполагаем, что постоянной Планка можно распоряжаться, меняя ее величину, даже устремлять ее к нулю и к бесконечности. Сейчас мы покажем, когда и как это делается.

Сначала вернемся к атому водорода. Выпишем три результата теории Бора. А именно, радиус n -й круговой орбиты электрона:

$$a_n = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} n^2,$$

его энергию:

$$\varepsilon_n = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

и скорость:

$$v_n = \frac{e^2}{\hbar n}.$$

Добавим разность энергий между соседними уровнями:

$$\Delta\varepsilon = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{(n+1)^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{2n+1}{(n+1)^2 n^2}. \quad (9)$$

В теории Бора большую роль играет возможность «вернуться» к классической механике. Для этого надо, казалось бы, просто в квантовых формулах положить $\hbar = 0$. Однако прежде надо зафиксировать то, что электрон в атоме имеет какую-то определенную энергию. Значит, надо принять $m_e e^4 / (2\hbar^2 n^2) = |\varepsilon|$. После замены и для радиуса орбиты, и для скорости электрона на ней получим правильный результат: их классические значения. Не слишком интересно.

А как обстоит дело с расстоянием между энергетическими уровнями?

Сделав предписанную замену в формуле (9), запишем ее в таком виде:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{2n+1}{(n+1)^2}.$$

Таким образом, при $n \gg 1$ расстояния между уровнями малы, и они тем меньше, чем номер уровня больше. Уровни сгущаются. Это мы уже упоминали. Но в классике электрон может иметь любую энергию. Должно быть для любой энергии: если $\hbar = 0$, то $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 0$. Выразив n через $|\varepsilon|$, видим, что $n \rightarrow \infty$ при $\hbar \rightarrow \infty$. Как и следовало ожидать, при этом $\Delta\varepsilon/\varepsilon \rightarrow 0$, и энергия может принимать любое значение.

Приравнять постоянную Планка к нулю можно только умозрительно. В данном случае – для проверки преемственности квантового и классического подходов. Эклектический подход Бора выдержал испытание. Но постоянная Планка такая, какая она есть. Маленькая. С макроскопической точки зрения, заведомо.

Бывают парадоксальные (на первый взгляд) ситуации: выражение описывает чисто квантовое явление, но не содержит постоянной Планка. Как такое может быть? Вот как. Расчет искомой величины предполагает выполнение неравенства, в котором есть величина, содержащая \hbar в числителе. Она *больше* величины, которая вовсе не содержит планковской постоянной. На каком-то этапе расчета отношение этих величин принимается равным нулю. Можно считать, что обращение в ноль произошло за счет обращения \hbar в бесконечность, ведь из ответа постоянная Планка выпала вовсе.

Приведу не пример, а укажу целую область физики, где описанная ситуация встречается нередко. Это – электронная теория металлов. Важной характеристикой электронов проводимости, т.е. тех электронов, которые осуществляют многие свойства металлов (проводимость и теплопроводность, в частности), служит так называемая энергия Ферми

$$\epsilon_F = \left(\frac{3N_e}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{(2\pi\hbar)^2}{2m_e},$$

где N_e – число электронов проводимости в единице объема металла. Энергия Ферми ϵ_F – энергия *реально действующих* электронов, остальные – неэффективны. Чем ниже температура, тем утверждение точнее. Температуру металла при всех оценках и расчетах надо сравнивать с температурой Ферми

$$T_F = \frac{\epsilon_F}{k_B},$$

где k_B – постоянная Больцмана. Удивительно, но квантовая по своей природе температура Ферми T_F для большинства металлов порядка $10^4 - 10^5$ К. Часты случаи, когда ее можно считать равной бесконечности, а иногда температуру металла можно (для упрощения расчета) положить равной нулю.

Из трех фундаментальных констант \hbar , e и c можно получить безразмерную комбинацию $e^2/(\hbar c)$, которая приблизительно равна $1/137$. Ее формальное название (из-за ее роли в спектроскопии) – *постоянная тонкой структуры*, но чаще ее называют просто *одна сто тридцать седьмая*. То, что $e^2/(\hbar c) \ll 1$, важно для формирования наших представлений о структуре не только микромира. Но и всего мира, который нас окружает, да и нас самих. Неравенство $e^2/(\hbar c) \ll 1$ можно трактовать как утверждение о малости электрического заряда, которое означает сравнительно слабую связь между веществом и электромагнитным полем. Благодаря этому в мире полно фотонов – от тех, которые помогают нам всем видеть, до реликтового излучения, которое помогает нам понять, что представлял из себя наш мир в первые мгновения после образования Вселенной в результате Большого взрыва. А для физиков-теоретиков $1/137$ -я просто подарок. Ее малость обосновывает теорию возмущений при расчетах по формулам квантовой электродинамики.¹⁶

¹⁶ См. книгу Р.Фейнмана «КЭД – странная теория света и вещества» (вып. 66 серии «Библиотечка «Квант»).

Большое впечатление производит при первом знакомстве с атомной физикой осознание того, что атомы, из которых все построено, сами почти полностью «состоят из пустоты». Сначала напомним, что размер ядра, как выяснил еще Резерфорд, приблизительно в сто тысяч раз меньше размера атома. Есть, где двигаться электронам. Можно ли приписать какой-либо размер электрону? В Стандартной модели электрон – точка с массой, зарядом, спином. Не только электрон, все элементарные частицы – точки, включая кварки. Раньше, в те времена когда зарождалась квантовая теория, обсуждалась модель, в которой электрон – заряженный шарик, а его масса имеет электромагнитное происхождение. Тогда радиус шарика (электрона) должен быть порядка $e^2/(m_e c^2) \sim 10^{-13}$ см. Размер атомов – порядка радиуса Бора, т.е. в $(137)^2$ больше размеров электрона. Даже если в атоме не один, а несколько электронов, они находятся относительно далеко друг от друга.

Самая большая скорость электрона в атоме – на ближайшей к ядру орбите. В атоме водорода

$$v_1 = \frac{e^2}{\hbar}, \text{ или } \frac{e^2}{\hbar c} c = \frac{1}{137} c,$$

т.е. скорость электрона значительно меньше скорости света. Тем более на орбитах, далеких от ядра. Я обещал показать, что движение электрона по орбитам в атоме водорода, если использовать классическую механику, можно описывать формулами механики Ньютона, а не Эйнштейна. Релятивистские поправки в этом случае действительно малы. Это «заслуга» $1/137$ -й.

С постоянной Планка связана еще одна важная характеристика электрона – комптоновская длина волны, равная

$$\frac{\hbar}{m_e c} = \frac{e^2}{m_e c^2} \frac{\hbar c}{e^2} \sim 137 \frac{e^2}{m_e c^2}.$$

И она велика по сравнению с размером электрона из-за малости одной сто тридцать седьмой.

Последние абзацы демонстрируют, как важны безразмерные комбинации фундаментальных констант. Они – истинные характеристики нашего мира.¹⁷

¹⁷ Рекомендую обзор Л.Б.Окуня «Фундаментальные константы в физике» (УФН, 161, в. 11, с.177 (1991)). Уверен, он будет во многом доступен читателям «Кванта», интересующимся современной физикой.

Встречи, которых не было, и встреча, которая была

Физика теперь развивается в таком темпе, что трудно уследить за происходящими переменами. Не успеваешь знакомиться со всеми новинками. Целые области, приходится признать, оказываются совсем неизвестными, а для того чтобы с ними познакомиться, приходится «садиться за парту». Иногда не в переносном смысле слова. Когда Ландау впервые читал курс квантовой электродинамики, то вместе со студентами и аспирантами Московского университета за партами сидели ведущие физики-теоретики. Всех, кто посещал лекции, не знаю, но знаю, что Я.Б.Зельдович и А.С.Компанеев аккуратно ходили.

Когда-то мне понравилась фраза из введения в обзорную статью в американском журнале: *«Это было так давно, что в Беркли еще не было ни одного ускорителя»*. Для американских физиков, занятых ускорителями, время, когда в Беркли не было ускорителей, ощущалось далеким прошлым.

Закончил университет я в 1949 году. Трудно сейчас себе представить. *Было это так давно, что феймановские диаграммы только появились и были редкой экзотикой*. Из действующих лиц, основных героев истории возникновения квантовой механики, описанной в этой статье, в живых не было только Планка. Он умер в 1947 году.

Хорошо запомнил ощущение потери, когда прочитал в газете о смерти Эйнштейна: «Ну вот, теперь я не современник Эйнштейна...»

Бор приезжал в Советский Союз в 1961 году. Был не только в Москве. В Москве Бор много времени проводил с Ландау. Вместе они были в МГУ на празднике Архимеда. Сохранились и хорошо известны фотографии: Бор и Ландау на празднике. Знаю, что Бор и Ландау много разговаривали. Были разговоры и наедине. По собственной глупости, я Бора не видел, хотя он выступал с публичными лекциями. Тогда я еще не был сотрудником Института физических проблем. Жил и работал в Харькове. Не получилось быть в те дни в Москве. Жалко очень. Корю себя: если бы подумал, как потом буду огорчаться, то был бы в Москве в дни пребывания там Бора.

Из творцов квантовой механики видел Дирака. В 70-х годах он был гостем Петра Леонидовича Капицы, читал публичную лекцию в ИФП, провел час-полтора в теоретическом отделе, которым в те годы руководил Илья Михайлович Лифшиц. Фотография, которая запечатлела пребывание Дирака у нас в теоретическом отделе, теперь висит над моим письменным столом. Из тех,



П.Дирак у теоретиков Института физических проблем (1973 г.). Рядом с Дираком (в центре) сидят: слева – М.И.Каганов и руководитель теоротдела И.М.Лифшиц, справа – Е.М.Лифшиц.

Стоят (слева направо): Л.Питаевский, Т.Сахарова, Б.Меерович, А.Меервич, А.Андреев, М.Либерман, Д.Компанеец, писатель Д.С.Данин

кто сидит на первом плане, жив, увы, я один. И Даниила Семеновича Данина уже нет.

Мне вспомнилось, что в теоротделе Дирак, великий молчальник, не сказал почти ни одного слова, выпил кофе с рюмкой коньяка и, когда кто-то решился задать ему вопрос, вежливо извинился, сказав, что ему вот-вот читать лекцию и он боится забыть, что он должен рассказать. Посидели, потом пошли фотографироваться во двор. Перед этим он расписался и поставил дату на доске в кабинете. Узнал, что доска с подписью Дирака, к сожалению, не сохранилась.

Может быть, даже такое почти бессодержательное воспоминание полезно. Не хочется, чтобы классики бронзовели. Они были и в чьей-то памяти остаются живыми людьми. Закономерно, но грустно: с каждым годом все меньше тех, кто видел или мог видеть творцов современной физики.

Заключение

В моем детстве по улицам Харькова, где оно прошло, ездили извозчики, автомобиль был редкостью. На него заглядывались не только мы, малолетки, но и многие взрослые. Редкое появление в небе аэроплана (слово «самолет» еще было не в ходу) заставляло задирать головы всех. Не помню, когда я первый раз поговорил по телефону, помню первый радиоприем-

ник, первый компьютер увидел в конце своей научной карьеры, а научился (весьма поверхностно) им пользоваться уже здесь, в Соединенных Штатах, выйдя на пенсию. Телевидение, современные средства связи вплоть до скайпа, мобильные телефоны, интернет, самолеты, приблизившие друг к другу материки, фотографии с планет Солнечной системы и многое другое, к чему мы уже привыкли, но чего не было менее ста лет тому назад, преобразовали наш мир. Вспоминать современные средства массового уничтожения людей у меня нет желания, но они созданы и, боюсь, вопреки всем надеждам, ждут своего часа (как хочется ошибиться!). Все или почти все – *результат практического использования физических знаний*. В большой мере тех знаний, которые привнесли квантовая механика и теория относительности.

Практическое использование физических знаний беспредельно. Все же хочу закончить словами Эйнштейна: пусть «исследования *ради чистого познания* будут продолжаться и сохранят всю свою силу».

И помните: прочитанное – рассказ всего лишь о «начале того конца, которым оканчивается начало»¹⁸. Самое интересное – впереди! Уверен, океан непознанного хранит много тайн, они ждут своих первооткрывателей.

Желаю удачи!

Приложение

В Физико-техническом институте АН Украины в Харькове, где прошли более 20 лет моей научной работы, был у меня коллега Г.Т.Николаев (Жора)– экспериментатор, приятный общительный человек. Среди харьковских физиков были весьма популярны его шуточные стихи, основанные на использовании физической терминологии. Мне кажется уместным привести здесь одно его стихотворение. Написано оно было перед войной. Видно, сколь актуальны были те понятия, которые встречаются в тексте статьи.

ЛЮБОВЬ ФИЗИКА–ТЕОРЕТИКА

Любил я физики эгиду,
Ее законов строгих нить.
Я не давал себя в обиду

¹⁸ Надеюсь, Козьма Прутков не обидится, что я чуть перефразировал его бессмертный вопрос.

И думал, что мою орбиту
Никто не сможет возмутить.

Я по инерции катился
Почти евклидовой прямой,
Но вдруг твой образ мне явился.
И путь мой в эллипс искривился,
А ты в нем фокус золотой.

С тех пор вокруг тебя вращаюсь
Я по законам площадей,
И до сих пор, как ни стараюсь,
Я не сумел еще, признаюсь,
Преодолеть твоих полей.

Я бросил все: и электрон,
И Бором писанные строчки,
Меня уж не влечет нейтрон
И ни один ядра закон,
Раз я дошел уже до точки.

С тех пор как силу притяженья
В твоем я поле испытал,
И сердца тензор напряженья
Напомнил в первом приближеньи
Мне сильно сжатый кристалл,

Я в деформациях души
Отметил новые явления.
На смену формулам Коши
В сердечной сумрачной тиши
Явились новые стремленья.

Эмиссия твоих очей
Мне сердце ионизовала
И в протяженности ночей
Твоя краса в миллион свечей
Мне спать подолгу не давала.

И начались в моей крови
Лишь турбулентные движенья.
О гений Бора, не зови!
Я трансцендентности любви
Не дам за атомов вращенье.

Любовь... одним лишь этим словом
Могу я точно описать
Все то, что ныне в сердце ново,
И почему не тянет снова
Меня, как прежде, квантовать.

Скажи, жестокая, доколе
Ты муки не поймешь мои,
Не исцелишь душевной боли?
О, неужель в любовном поле
Не применим Мопертю?!

Я дней твоих украшу круг
В волшебный блеск спектральных линий.
Наполню волнами досуг
И подарю тебе, мой друг,
Лантан, диспрозий, гадолиний.

Волшебной формулой желанной
Войдешь в моих мечтаний дым.
И будет нежность беспрестанной,
И меньше Планка постоянной
Мое влечение к другим.

Не веришь? В качестве ответа,
Чтобы к нулю сомненья свести,
Могу взамен речей обета
Меж линий натрия дуплета
Я в доказательство пролезть.

О, не страшись ты душу ввергнуть
В пространство лучших грез и снов!
Эйнштейн и тот не мог отвергнуть
И даже критике подвергнуть
Поняты старое – любовь.

Моисей Исаакович Каганов

ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА

Часть 2

Библиотечка «Квант». Выпуск 130
Приложение к журналу «Квант» №2/2014

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *М.Н.Грицук, Е.А.Митченко*

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская
Печать офсетная. Объем 6,5 печ.л. Тираж: 1-й завод 900 экз.
Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: math@kvant.ras.ru, phys@kvant.ras.ru

Отпечатано «ТДДС-СТОЛИЦА-8»

Тел.: 8(495)363-48-86, <http://capitalpress.ru>

Индекс 90964



Библиотечка КВАНТ

М.И. КАГАНОВ

Часть 2



ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА



ВЫПУСК

130