

# Как квантовая механика описывает микромир

М.КАГАНОВ

*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, объединя-



Иллюстрация Н.Суворовой

ясь, 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.<sup>1</sup>

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 рознь.

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 сущностей, 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».

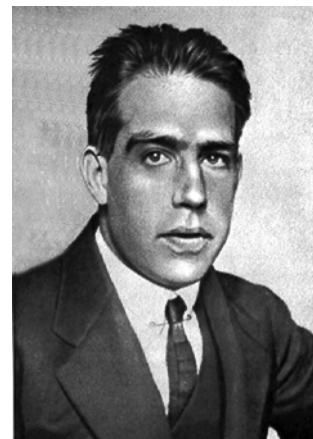
На официальном языке два последних абзаца можно заменить одной фразой: «Физика и математика обогащают друг друга».

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 – дело будущего. Есть уверенность, что будущая теория среди прочих своих достижений объяснит, в чем причина успеха перенормировок.

### Атом 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



Нильс Хенрик Давид Бор

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

понять строение атома и облечь понимание в формулы, допускающие убедительное 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,



Макс Планк

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 зернистость энергии осциллятора, и принял, что энергия осциллятора равна  $E = n\hbar\omega$ , где  $n$  – целое

число и ноль<sup>2</sup>,  $\omega$  – 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 равно<sup>3</sup>  $1,0546 \cdot 10^{-27}$  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 назвали *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 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  $\omega$ , то и частота волн будет  $\omega$ . Волны унесут часть энергии электрона, он приблизится к ядру, скорость его возрастет (!), частота увеличится. Так, постепенно приближаясь к ядру и

<sup>2</sup> Может ли энергия осциллятора быть равной нулю, мы обсудим позже.

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

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  $\pi$ , 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

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

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  $\omega_0$ , 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 рассеянию 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  $\epsilon$  и импульс  $\vec{p}$  фотона определяются его частотой  $\omega$  и волновым вектором  $\vec{k}$ :

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

причем частота и величина волнового вектора связаны между собой соотношением  $\omega = ck = 2\pi c/\lambda$ , где  $\lambda$  – 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  $\theta$  – 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  $\Omega$  и волновой вектор  $\vec{K}$  определяются так:

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

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 выяснить, 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 премией.

Теоретические представления нередко опережают опыт. У них своя логика развития. В 1926 году Эрвин Шрёдингер (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 Шрёдингер 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.

(Продолжение следует)