

ОБ ОСНОВАНИЯХ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Д.т.н., проф. Эткин В.А.

Показано, что основные результаты квантовой механики можно объяснить с чисто термодинамических позиций

В 1900 году М. Планк, известный своими работами по термодинамике, сконструировал удачную формулу для распределения энергии в спектре абсолютно черного тела. Для этого он ввел понятие о кванте света, энергия которого E пропорциональна частоте ω излучаемых электромагнитных волн. Развивая идеи М. Планка о квантовании излучения, А. Эйнштейн в 1905 году предположил, что квантуется не только процесс излучения, но и сама лучистая энергия, заключенная в каком-либо объеме. При этом он представил квант излучения как частицу с энергией $h\omega$ (где h – постоянная Планка), названную впоследствии фотоном. Основываясь на этом, он дал первое теоретическое объяснение экспериментальных зависимостей фотоэффекта. Вслед за этим Н. Бор на основе модели атома водорода, в которой электрон излучает при «перескоке» с одной устойчивой круговой орбиты на нижележащую, объяснил происхождение спектральных серий Бальмера. Так родилась квантовая механика, которая исходит из того, что законы, которым подчиняются атомы, молекулы и элементарные частицы (т.е. объекты микромира), коренным образом отличаются от классических законов, описывающих поведение макроскопических объектов. Одним из оснований явилась невозможность согласовать существование устойчивых орбит электронов в планетарной модели атома Резерфорда с электродинамикой, согласно которой электрон, движущийся с центростремительным ускорением, должен излучать энергию и потому неизбежно упадет на ядро. Другой причиной, вынудившей исследователей отказаться от классической волновой теории света, явились обнаруженные в ряде явлений (фотоэффект, фотолюминесценция, эффект Комптона) свойства света как частицы. Тем не менее и сейчас остается актуальным вопрос, поставленный еще академиком Вавиловым: действительно ли волновая теория оказалась беспомощной перед квантовыми законами действия света?

Ответ на этот вопрос может быть однозначно отрицательным, если отказаться от построения механики на основе кинематики точки и признать протяженность в пространстве неотъемлемым свойством любого материального объекта. Если в отличие от Н. Бора рассматривать в качестве объекта исследования не одиночный атом, а всю совокупность атомов, находящихся во внешних по отношению к ним силовых полях, то станет совершенно ясным, что на движение отдельных электронов оказывают влияние нецентральные силы, исходящих из этих полей. Последние, как известно, осциллируют с определенными частотами, соответствующими спектру излучения данного сорта атомов. Когда электрон движется навстречу этому полю (т.е. произведение сил поля \mathbf{F} на направление скорости электрона \mathbf{v} отрицательно), он испытывает кратковременное торможение, длительность которого определяется полупериодом электромагнитной волны. Поскольку частота осцилляций этого поля в общем случае превышает полупериод обращения электрона вокруг ядра, электрон успевает претерпеть за это время несколько актов торможения. Напротив, при совпадении направлений поля и электрона (когда $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} > 0$) возникает его кратковременное ускорение. Изменение вследствие этого энергии отдельных атомов приводит к возмущению внешнего поля, которое синхронизируется с движением их орбитальных электронов. При чередовании актов «излучения» и «поглощения» электромагнитной энергии в веществе может наступить состояние динамического равновесия, характеризующееся постоянством средней энергии электрона за определенный промежуток времени. Поэтому утверждения о неизбежном «падении» электрона на ядро атома совершенно необоснованны. Столь же необоснованным с этих

позиций выглядит и постулат Бора о существовании «устойчивых» круговых орбит, что возможно только в отсутствие внешних полей \mathbf{F} . С этих позиций понятие стационарной орбиты становится недопустимой абстракцией, как и допущение о возможности безызлучательного движение электронов по ним. Напротив, становится совершенно ясным, что именно торможение и ускорение электрона нецентральными силами вызывает процесс излучения и поглощения электромагнитных волн, равно как и многократное изменение траектории электрона за каждый виток его орбиты (какова бы она ни была – круговая или эллиптическая, замкнутая или незамкнутая). В связи с тем, что величина и направление внешних сил хаотически меняется с изменением взаимного расположения атомов, само понятие «орбиты» при этом приобретает статистический (вероятностный) характер, что и трактуется в квантовой механике как ее «размытость».

Поскольку процесс торможения или ускорения электронов кратковременен, сопровождающий его процесс излучения и поглощения электромагнитной энергии приобретает дискретный характер. Таким образом, квантовая природа излучения обусловлена самим характером процесса и отнюдь не противоречит классической механике.

С этих позиций становится также ясным, что излучение атома обусловлено не «перескоком» электрона с одной устойчивой орбиты на другую (как это постулировалось Н. Бором), а его многократным торможением на орбите, которая и определяется величиной совершаемой электроном над внешним полем работы dW_e . Эта работа равна произведению преодолеваемой силы \mathbf{F}_e на вызванное ею смещение радиус-вектора центра всей совокупности орбитальных электронов \mathbf{R}_e . Процесс торможения электронов описывается кинетическим уравнением:

$$\mathbf{J}_w = -L \mathbf{X}_w. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{J}_w = m_e \mathbf{v}_e \cdot \mathbf{v}_w$ (кг·м²/с²) – поток импульса электронов, представленный, как обычно, произведением величины Θ_i (импульса $\mathbf{P} = m_e \mathbf{v}_e$ электронов) на скорость смещения центра всей совокупности зарядов \mathbf{v}_w ; \mathbf{X}_w – движущая сила процесса ускорения, которая выражается отрицательным вектор-градиентом поля скоростей электронов $\mathbf{X}_w = -\text{Grad } v_e$ (1/с); L – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность действия (кг·м²/с).

Нетрудно видеть, что для отдельного акта торможения электрона поток импульса имеет смысл энергии, отданной электроном при его торможении (и соответственно энергии E_ν , излученной электромагнитным полем), а сила \mathbf{X}_w – размерность и смысл частоты следования актов торможения. Если обозначить последнюю через ν , а коэффициент пропорциональности – через \hbar , то мы получим формулу Планка для кванта энергии излучения $E_\nu = \hbar \nu$. Таким образом, гипотеза Планка о пропорциональности кванта света его частоте получает обоснование с позиций классической физики. Этого нельзя сказать о постулате Бора, согласно которому частота излучения ν определяется разностью энергий электрона на исходной и конечной орбите $(E_i - E_f)/\hbar$. Действительно, это выражение ни по форме, ни по смыслу не отвечает общему виду уравнения процесса ускорения. Мы уже не говорим о том, что само предположение об излучении вследствие «перескока» его с одной орбиты на другую ведет к нарушению причинно – следственных отношений. В самом деле, зависимость частоты излучения ν от параметров будущей орбиты (как это предположил Н.Бор) означает, что электрон неведомым образом заранее знает, на какую орбиту он «перескочит». С рассматриваемых позиции излучение происходит в процессе торможения электрона, вызывающего последующий сход его с исходной орбиты, так что не орбиты определяют величину излученной энергии, а наоборот, количество излученной энергии определяет будущую «орбиту».

В свете изложенного резонансная частота излучения «возбужденного» атома оказывается пропорциональной числу актов торможения его электронов нецентральными силами, т.е. произведению числа оборотов (витков) электрона z в единицу времени на

число n актов торможения или ускорения за один «оборот» электрона. В частности, для эллиптических орбит число актов торможения равно удвоенному числу оборотов электрона в единицу времени z , поскольку скорость движения электрона относительно ядра достигает при этом минимума дважды (в апогее).

Число z можно представить как частное от деления модуля средней орбитальной скорости v на длину условной круговой орбиты $2\pi r_0$ (где r_0 - радиус эквивалентной окружности). Тогда частота излучения или поглощения ν определится простым соотношением:

$$\nu = nz = nv/2\pi r_0 = m_e v c / 2\pi m_e r_0 c n^{-1} = p_e c / h_0, \quad (2)$$

где $p_e = m_e v$ - средний импульс электрона; c – скорость света в вакууме; $h_0 = 2\pi m_e r_0 c n^{-1}$ – некоторая постоянная для данной орбиты величина.

Согласно этому выражению, частота излучения ν оказывается пропорциональной импульсу электрона p_e , что согласуется с идеями де Бройля (1926 г). При этом каждому виду атомов соответствуют определенные длины волн излучения (поглощения), зависящие от импульса электронов и радиуса их орбит, т.е. от свойств самого вещества. Это также подтверждает гипотезу де Бройля (1926 г) о том, что волновые свойства присущи всем веществам.

Связь «орбитальной постоянной» h_0 с постоянной Планка несложно установить, сопоставляя импульс электрона $p_e = h_0 \nu / c$ с традиционным представлением импульса фотона $p_\phi = \hbar \nu / c$:

$$h_0 = \hbar p_e / p_\phi. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при равной величине импульсов p_e и p_ϕ орбитальная постоянная и постоянная Планка численно равны.

Понимание многих закономерностей процесса излучения существенно облегчается, если предположить, что единичное возмущение межатомного поля при синхронном торможении группы электронов распространяется в нем в виде уединенной волны (солитона). Солитоном принято называть нелинейную уединенную волну, которая представляет собой устойчивое образование, т.е. сохраняет свою форму и скорость при собственном движении и при столкновении с себе подобными волнами. Свойства солитона, как известно, во многом близки к свойствам частицы. В частности, при столкновении два солитона не проходят друг через друга, как обычные линейные волны, а как бы отталкиваются друг от друга подобно теннисным мячам. Еще одна особенность солитона состоит в том, что его энергия E_c определяется, как и для обычных волн, квадратом амплитуды волны $E_c = K A_c^2$ (где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы волны). Последовательность уединенных волн (солитонов) весьма сходна с группами волн, которые перемещаются с групповой скоростью. Такой (групповой) солитон весьма напоминает амплитудно-модулированные электромагнитные волны. Скорость группового солитона не зависит от амплитуды, а его средняя часть имеет наибольшую амплитуду. Именно такие, а не бесконечные синусоидальные волны наблюдаются в реальности. Поэтому в настоящее время класс объектов, подпадающих под понятие солитона, постоянно расширяется. Солитонная природа процесса излучения проливает новый свет на проблему дуализма «волна - частица», послужившую одной из причин отказа от классических концепций. Сами специфические свойства солитонов объясняют, почему излучение в одних случаях обладает свойствами волны (интерференция, дифракция, поляризация), а в других – свойствами частиц (фотоэффект, эффект Комптона).

Представление о квазинепрерывной волне как о последовательности ν солитонов легко объясняет, почему энергия излучения пропорциональна его частоте ν , поскольку она оказывается в этом случае просто пропорциональной потоку солитонов (солитон/с). Поэтому постулат М. Планка о пропорциональности энергии излучения частоте ν , положенный им в основу его знаменитого закона излучения черных тел, вовсе не выглядит противоречащим классической физике.

В то же время солитонная модель процесса излучения позволяет устранить еще одну трудность существующей теории, которой до настоящего времени не уделялось должного внимания. Если излучение фотона с энергией $\hbar\nu$ происходит «одномоментно», а квант энергии излучения $\hbar\nu$ определяется известным соотношением:

$$\hbar\nu = E_i (1 - n_i^2/n_j^2), \quad (4)$$

то в зависимости от значения квантовых чисел n_i и n_j электрон будет терять за один акт излучения от 44,4% (при $n_i = 2$ и $n_j = 3$) до 96% исходной энергии E_i (при $n_i = 2$ и $n_j = 10$). Это ставит под сомнение саму возможность сохранения атома в процессе излучения. В изложенном порядке идей оно осуществляется порциями в ν раз меньшими, так что равная величина энергии излучается в результате последовательности ν актов излучения солитонов. При этом акты излучения могут чередоваться актами поглощения излучения (ускорения электронов), так что в итоге энергия электрона в апогее может оставаться неизменной (а орбита – квазистационарной). Такое излучение не угрожает устойчивости атома.

Далее, замена фотона последовательностью ν солитонов позволяет ввести понятие кванта действия солитона h_0 . Последний имеет простой и ясный физический смысл энергии [Дж], полученной орбитальным электроном благодаря падающему на тело единичному потоку солитонов J_c [солитон/с]. Величина h_0 зависит от характера орбиты – её условного радиуса r и числа участков ускорения (торможения) электронов на этой орбите n . Естественно, что солитон действует на те электроны, которые вращаются вокруг ядра с числом оборотов, кратным частоте следования их ν . Именно поэтому спектры излучения или поглощения содержат в себе данные о характеристиках орбит электронов в атомах. Как будет показано ниже, это позволяет не только вскрыть квантовую природу процесса излучения и поглощения электромагнитных волн, но и путем весьма простых соображений обосновать ряд важнейших положений квантовой теории без привлечения каких-либо специфических постулатов квантовой природы.

Новая трактовка фотоэффекта. В 1887 году немецкий физик Г. Герц при излучении электромагнитных волн в экспериментах с разрядником (парой металлических шаров, помещенных в вакууммированную стеклянную камеру) обнаружил усиление разряда, возникавшего под действием приложенного к ним напряжения $\Delta\phi$, при освещении одного из шаров ультрафиолетовыми лучами. Так был обнаружен внешний фотоэффект.

Первые исследования фотоэффекта, проведенные А. Столетовым (1888), установили следующие его закономерности:

- 1) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от падающего светового потока.
- 2) Количество электронов, вырываемых с поверхности металла в секунду (фототок I), прямо пропорционален мощности светового потока J .
- 3) Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты ν_0 , фотоэффект не возникает. При этом величина напряжения $-V_z$, задерживающего испускание фотоэлектронов (запирающий потенциал) линейно возрастает с частотой излучения ν и не зависит от его интенсивности J . У щелочных металлов эта «красная граница фотоэффекта» лежит в диапазоне видимого света.

Эти закономерности, подтвержденные последующими исследованиями Ленарда (1902), Ричардсона и Комптона (1912), а также Милликена (1916), не укладывались в

рамки волновой теории света. Согласно ей, сама возможность «вырывать» электроны из металла, а также энергия вырванного электрона должны зависеть от амплитуды колебаний в волне, а не от его частоты. Помимо этого, волновая теория предполагает «раскачку» электрона, что требует времени и противоречит наблюдаемой безинерционности фотоэффекта

А. Эйнштейн, развивая идеи М. Планка о квантовании излучения, предположил, что квантуется не только процесс излучения, но и сама лучистая энергия, заключенная в какой-либо полости. При этом квант излучения как носитель этой энергии обладает свойствами частицы (названной впоследствии фотоном). Основываясь на этом, он в 1905 году дал первое теоретическое объяснение экспериментальных зависимостей фотоэффекта, за что впоследствии (в 1922 г.) получил Нобелевскую премию. Закон сохранения энергии при фотоэффекте А. Эйнштейн выразил соотношением:

$$E_k = h\nu - W_e, \quad (5)$$

где E_k – кинетическая энергия фотоэлектрона; $h\nu$ – энергия фотона ($h=1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ν – частота излучения); W_e – работа выхода электрона (энергия ионизации атома E_i).

Согласно этому выражению, фотоэффект не возникает, если энергия фотона $h\nu < W_e$, т.е. недостаточна для ионизации атома (совершения работы выхода). Далее, согласно (5), при увеличении частоты ν фотонов, облучающих фотокатод, кинетическая энергия E_k испускаемых им фотоэлектронов линейно возрастает, что влечет за собой увеличение запирающего потенциала.

Такое объяснение фотоэффекта выглядело настолько привлекательным, что исследователи проигнорировали различие размерностей членов соотношения (5). Действительно, слагаемые E_k и W_e относятся к одному электрону с зарядом e (размерность Дж/электрон), а член $h\nu$ – к одному фотону (размерность Дж/фотон). Для выравнивания размерностей членов уравнения (5) слагаемое $h\nu$ должно быть поделено на величину Y_e с размерностью электрон/фотон, имеющую смысл отношения числа эмитированных электронов к числу поглощенных квантов излучения. Эта величина получила название квантового выхода. Последний, как показали эксперименты, зависит от свойств тела, состояния его поверхности, температуры и энергии фотонов, и для большинства фотокатодов колеблется от $\sim 0,5$ до $\sim 10^{-4}$ (Физическая энциклопедия, 1983). Это означает, что для эмиссии одного фотоэлектрона необходимо до 10^4 фотонов. С учетом квантового выхода выражение (5) примет вид:

$$E_k = h\nu Y_e^{-1} - W_e, \quad (6)$$

Необходимость учета в (5) квантового выхода диктуется еще несколькими обстоятельствами. Во-первых, его отсутствие ведет к нарушению в (5) баланса энергии. В самом деле, несоответствие размерностей не нарушает баланса энергии только в том случае, когда энергии одного фотона $h\nu$ достаточно для ионизации одного электрона. Однако для этого необходимо также еще одно допущение, что этой энергии недостаточно для ионизации нескольких электронов. Более того, необходимо еще предположить, что фотон как частица при «столкновении» с электроном отдает ему всю свою кинетическую энергию (вопреки теории удара). Во-вторых, учет Y_e необходим для выполнения 2-го закона Столетова. Действительно, после деления всех членов (6) на заряд e имеем (Милликен, 1916):

$$-V_z = h\nu/e - W_e/e. \quad (7)$$

Учитывая, что энергия фотона $\hbar\nu$ представляет собой частное от деления лучистого потока J на число поглощенных фотонов J_ϕ , а электрический заряд e – частное от деления фототока I на число эмитированных электронов J_e , представим (7) в форме:

$$I = eY_e / (E_k + W_e) J, \quad (8)$$

где $Y_e \equiv J_e / J_\phi$.

Как следует из этого выражения, 2-й закон Столетова предполагает зависимость коэффициента пропорциональности от квантового выхода Y_e .

В-третьих, как показывает опыт, интегральная чувствительность фотокатода, представляющая собой отношение фототока I (А) к падающему световому потоку J (Вт), зависит от свойств вещества. Согласно (6), эта зависимость имеет вид:

$$\partial E_k / \partial \nu = \hbar / Y_e. \quad (9)$$

Однако из (5) эта зависимость не следует, поскольку в нем $\partial E_k / \partial \nu = \hbar = \text{const}$. Итак, необходимость коррекции выражения (5) следует не только из соображений размерности, но и из необходимости соблюдения баланса энергии при фотоэффекте.

Однако и это еще не устраняет всех противоречий, поскольку учет Y_e приводит к зависимости кинетической энергии фотоэлектронов E_k от числа поглощенных фотонов, т.е. от интенсивности светового потока J . Все это означает, что объяснение фотоэффекта, предложенное А. Эйнштейном, не является исчерпывающим.

Рассмотрим теперь те же явления с позиций энергодинамики. Сделаем достаточно очевидное предположение, что квантовый выход Y численно равен отношению импульсов фотона p_ϕ и электрона p_e . Тогда с учетом соотношения (2) имеем:

$$Y_e = p_\phi / p_e = \hbar / h_0. \quad (10)$$

Отсюда следует, что $h^* = \hbar Y_e^{-1}$, так что уравнение (5) принимает вид:

$$E_k = h_0 \nu - W_e, \quad (11)$$

Это выражение отличается от (5) тем, что в нем постоянная Планка \hbar заменена функцией радиуса условной круговой орбиты $h_0 = h_0(a)$, т.е. энергия падающего излучения выражена через параметры орбитального электрона. Согласно последнему выражению, работа $h_0 \nu$, совершаемая последовательностью ν солитонов над одним из электронов, определяется произведением некоторой постоянной для данной орбиты величины h_0 на число солитонов ν , поглощенных орбитальным электроном за единицу времени.

Таким образом, роль кванта действия солитона в соотношении (11), в отличие от (5), играет орбитальная постоянная h_0 . Величина энергии, передаваемой электрону за один акт «поглощения» солитона, меньше энергии, отдаваемой фотоном, в Y/v раз. Это обстоятельство кардинальным образом изменяет наши представления о «расстояниях» между орбитами электронов, свидетельствуя о том, что его траектория меняется столько раз за один «виток» орбиты электрона, сколько раз электрон испытывает ускорение или торможение внешним электромагнитным полем. При этом сама величина ускорения или торможения определяется амплитудой солитона, которая не остается постоянной во времени. Таким образом, само понятие орбиты приобретает в термодинамике условный (статистический) характер, созвучный понятию ее «размытости» в квантовой механике.

Замена фотона последовательностью ν солитонов позволяет объяснить все закономерности фотоэффекта. В частности, если для эмиссии J_e электронов с зарядом e (т.е. для создания фототока I) требуется лучистая энергия $J = h_0 \nu J_e$, то пропорциональность фототока интенсивности светового потока J (2-й закон Столетова)

следует со всей очевидностью. С той же очевидностью следует из (11) линейное нарастание «запирающего потенциала» с частотой излучения ν (1-й закон Столетова); зависимость интегральной чувствительности фотокатода от частоты излучения, а также существование «красного порога фотоэффекта», когда $h_0\nu \leq W_e$ (3-й закон Столетова). Наконец, получает объяснение и «безынерционность фотоэффекта». Дело в том, что солитон – не обычная синусоидальная волна, а «волна возвышения», которая наподобие пульсирующего постоянного тока имеет отклонение одного знака от «невозмущенного» состояния. Поэтому такая волна вызывает не «раскачку» электрона от его положения на устойчивой орбите, а одностороннее ускорение или торможение в те полупериоды его траектории, когда электрон движется соответственно в направлении или навстречу направлению внешнего поля (так что произведение $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ сил поля \mathbf{F} на направление скорости электрона \mathbf{v} соответственно больше или меньше нуля). Характерно, что при таком объяснении нам не понадобилось вводить в физику никаких специфических «квантовых» представлений, в том числе допущения о существовании фотона как частицы, представления об излучении в полости как о совокупности таких частиц, представления о дискретности орбит и энергий электронов в атоме и т.п. Предпринятое рассмотрение проливает новый свет на природу квантования процесса излучения, дуализм волна-частица, пропорциональность энергии электромагнитной волны ее частоте и т.п. В этом порядке идей постоянная Планка \hbar приобретает смысл среднестатистической величины орбитальной постоянной h_0 для сред, которые подобно абсолютно черному телу излучают и поглощают равномерно во всем спектре частот. Это и предопределяет совпадение значений этой постоянной, найденной экспериментально как на основе спектра излучения абсолютно твердого тела, так и другими независимыми методами.

С другой стороны, представление о квантовой природе процесса излучения позволяет устранить противоречия с волновой теорией. Действительно, если бы излучение вызывалось обычной волной, а не последовательностью уединенных волн, энергия вырванного электрона должна была бы зависеть от амплитуды волны, а не от её частоты. Однако если эта частота отражает число актов ускорения электронов на одном витке его траектории, суммарная энергия $h_0\nu$, полученная электроном, определяется как амплитудой, так и частотой колебаний внешнего электромагнитного поля, что снимает отмеченное противоречие.

Термодинамический вывод волнового уравнения. Немалое число исследователей испытывает острое чувство неудовлетворенности существующей в современной физике тенденцией "угадывать уравнения, не обращая внимания на физические модели или физическое объяснение" (Р. Фейнман, 1976). В полной мере относится это и к основополагающему уравнению квантовой механики, явившемуся плодом гениальной интуиции его автора (Э. Шрёдингер, 1926). Тем больший интерес представляет возможность вывести уравнение такого типа из первых принципов энергодинамики. Согласно ей, при протекании в системе какого-либо i -го процесса его обобщенная скорость (поток J_i) определяется всеми действующими в системе термодинамическими силами X_j ($i, j = 1, 2, \dots, n$). Применительно к системе "электрон - ядро" это означает, что при торможении электрона в его орбитальном движении по произвольной траектории кинетическая энергия электрона E_k переходит не только в потенциальную энергию атома как целого, но и частично расходуется на преодоление нецентральных сил, исходящих из внешних по отношению к атому электромагнитных полей. В результате в каждом акте торможения возникает единичное возмущение этого поля, которое распространяется в нем в виде уединенной электромагнитной волны (солитона). В результате совместного действия множества атомов совокупное электромагнитное поле любого вещества осциллирует синфазно движению соответствующей группы электронов, в свою очередь предопределяя осцилляцию их траекторий. Так осуществляется синхронизация всего многообразия орбит электронов данной группы со спектром частот колебаний самого поля. Этот

колебательный процесс описывается известным уравнением пространственной монохроматической волны (Л.Ландау, Е. Лившиц, 1973):

$$\Delta\psi + (4\pi^2/\lambda^2)\psi = 0, \quad (12)$$

где Δ - оператор Лапласа; λ - длина волны; ψ - "волновая функция", т.е. какой-либо параметр системы, являющийся функцией пространственных координат и отклоняющийся в колебательном процессе от своего равновесного значения. В нашем случае под ψ понимается амплитуда электромагнитной волны, возникающей в поле межатомных сил при торможении электрона, движущегося с определенной скоростью по определенной траектории.

Используя предложенный выше механизм возникновения колебательного процесса в поле межатомных сил, найдем в соответствии с (2) связь параметров орбиты электрона с длиной волны излучения $\lambda = c/v$:

$$\lambda = h_0/p_e. \quad (13)$$

Учитывая, что $\lambda^2 = p_e^2/h_0^2$ и $p_e^2 = 2m_e E_k$, где E_k - кинетическая энергия электрона, определяемая разностью между полной энергией атома (его гамильтонианом) E и потенциальной энергией E^n , после подстановки в (12) и простейших преобразований непосредственно приходим к основополагающему уравнению квантовой механики в виде:

$$\Delta\psi + (8\pi^2m/h_0^2)(E - E^n)\psi = 0. \quad (14)$$

Это уравнение отличается от стационарного уравнения Шрёдингера лишь тем, что в нем универсальная постоянная Планка \hbar заменена орбитальной постоянной $h_0 = h_0(r)$. Рассмотренный здесь вывод этого соотношения не опирается на какие-либо гипотезы и постулаты. Это выгодно отличает его от обоснования, данного самим Шредингером, которое всегда представлялось исследователям не вполне убедительным. В особенности это замечание касается физического смысла функции ψ . В его толковании среди наиболее крупных физиков-теоретиков до сих пор отсутствует единодушие. В большинстве своем они трактуют функцию ψ как величину, квадрат которой, будучи умноженным на элемент объема dV , характеризует вероятность $\psi^2 dV$ нахождения частицы в заданной области пространства. Это понятие предполагает индетерминизм даже на уровне элементарных процессов, т.е. утрату квантовой механикой способности предсказывать события (определять последующие значения параметров по предшествующим). Между тем применение понятия вероятности к отдельному атому или отдельной молекуле также довольно бессмысленно, так как последние обладают вполне определенным значением кинетической энергии, находятся в определенном месте и движутся в определенном направлении. В изложенном же порядке идей волновая функция приобретает простой и ясный смысл амплитуды колебаний параметров "орбиты" электрона как функции его кинетической энергии. Так решается, пожалуй, самый принципиальный из физических вопросов, связанных с квантовой механикой.

Уравнение (14) является линейным дифференциальным уравнением второго порядка с переменными (ввиду зависимости E_n от пространственных координат) коэффициентами. Его решения (при наложении на них требования конечности) дают набор возможных стационарных состояний атома с заданной энергией E . Так обосновывается важнейший вывод квантовой механики о том, что энергия системы должна принимать ряд дискретных значений, кратных некоторому квантовому числу. Этот вывод, однако, относится только к консервативным системам ($E = \text{const}$), в частности, к изолированному атому. Однако термодинамика рассматривает не отдельный атом, а всю их совокупность, в которой каждый из атомов не является консервативной

системой. В этих условиях дискретный характер процесса излучения не может быть распространен на энергию как функцию состояния. Известно, что дождь выпадает в виде отдельных капель. Однако это еще не основание утверждать, что из отдельных капель состоит и океан. Необоснованность переноса идеи квантования энергии излучения на энергию в целом становится особенно очевидной с позиций эргодической динамики изолированных систем, для которых вся их энергия является внутренней. Эта энергия, в отличие от внешней, не может быть величиной отрицательной. Применительно к энергии взаимодействия электрона с ядром это означает, что выражение $-Ze^2/r$, определяющее в механике внешнюю потенциальную энергию электрона, должен быть дополнен членом, делающим эту энергию положительной. Этому условию отвечает выражение $U = Ze^2(1/r_0 - 1/r)$, где r_0 – минимальное расстояние, до которого могут сблизиться ядро и электрон. В таком случае и энергия электрона E как величина сугубо положительная выразится суммой той ее части, которая скачкообразно изменяется в процессе излучения, и части Ze^2/r_0 , не связанной с импульсом P электрона и потому не подлежащей квантованию. Исключение из рассмотрения этой «подводной» части айсберга чревато многими недоразумениями и потому недопустимо.

Зависимость h_0 от среднестатистических параметров условной круговой орбиты электрона, излучающего на длине волны λ , позволяет в дальнейшем определять параметры данной орбиты, не решая уравнения (14). В частности, по известной длине волны излучения λ (или волновому числу c/λ) можно найти радиус r условной круговой "орбиты" электронов, излучающих на этой частоте. С этой целью воспользуемся соотношением (2), из которого следует, что для орбиты с числом участков торможения n существует однозначная связь между частотой излучения ν и отношением ν/r :

$$\nu = 2\pi n^{-1}r\nu. \quad (15)$$

Раскроем вид функции $\nu = \nu(r)$ для случая, когда невозмущенное движение электрона осуществляется по окружности радиуса r . Если движение электрона осуществляется только под действием центральных сил, то согласно закону Кулона сила F_e притяжения электрона равна:

$$F_e = kZe^2/r^2, \quad (16)$$

где $k = 8,98756 \cdot 10^9$ – электрическая постоянная, Z – атомный номер элемента, соответствующий числу протонов в его ядре; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

При равномерном движении электрона по круговой орбите эта сила уравновешивается центробежной силой

$$F_{ц} = m_e v^2/r, \quad (17)$$

так что орбитальная скорость электрона v оказывается связанной с радиусом круговой орбиты r соотношением:

$$v = e(kZ/m_e r)^{0,5}. \quad (18)$$

Рассматривая (15) и (18) совместно, находим:

$$r = (kZ e^2 n^2 / 4\pi^2 v^2 m_e)^{1/3}. \quad (19)$$

Это соотношение позволяет для каждой орбиты с известным числом участков торможения n находить её радиус r , средний импульс электрона

$$p_e = m_e w = e(kZm_e/r)^{0,5} \quad (20)$$

и среднюю кинетическую энергию электрона

$$E_k = p_e^2/2m_e. \quad (21)$$

Рассмотрим теперь, насколько соответствует реальности предложенная зависимость частоты излучения от параметров орбиты. Найдем, например, условный радиус орбиты электрона ($m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг) атома водорода ($Z=1, n = 1$), излучающего на частоте аргонового лазера $\nu = 2,379 \cdot 10^{15}$ Гц (длина волны $\lambda = 1,261 \cdot 10^{-7}$ м). В соответствии с (19) имеем:

$$r = [(8,9875 \cdot 10^9 \cdot 1,602^2 \cdot 10^{-38} / 4 \cdot 3,14159^2) \cdot (2,379^2 \cdot 10^{30} \cdot 9,1095 \cdot 10^{-31})]^{1/2} = 1,04 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Эта величина имеет порядок радиуса атома водорода (10^{-10} м). Соответствующая средняя скорость орбитального движения электрона имеет порядок

$$v = 1,602 \cdot 10^{-19} (8,9875 \cdot 10^9 \cdot 1,0/9,1095 \cdot 10^{-31} \cdot 1,04 \cdot 10^{-10})^{0,5} = 1,56 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1},$$

что соответствует импульсу электрона $p_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \cdot 1,56 \cdot 10^6 = 1,421 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с и его кинетической энергии $E_k = (1,421 \cdot 10^{-24})^2 / 2 \cdot 9,1095 \cdot 10^{-31} = 1,108 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Таким образом, не только спектр излучения и поглощения любого атома, но и средний импульс p_e и энергия E_k его электронов определяются геометрическими характеристиками их орбит r и n . Возможность нахождения этих параметров выходит за рамки задач, решаемых квантовой механикой, поскольку последняя исключает из рассмотрения ненаблюдаемые величины (положение электрона на орбите, его скорость, тип орбиты и т.п.). Это вселяет надежду, что и другие выводы квантовой механики окажутся следствием корректного обобщения классической физики на объекты микромира.

Альтернативное описание спектральных серий.

Известно, что задачей квантовой механики является не раскрытие физической картины явлений, а точное «предвычисление» наблюдаемых на опыте величин, каковыми являются спектральные линии. В этом плане важную роль играет найденная выше зависимость орбитальной постоянной h_0 от параметров орбиты и естественное в условиях резонанса влияние частоты осцилляций межатомного электромагнитного поля на движение определенной группы орбитальных электронов рассматриваемой системы. Это позволяет получить формулы, описывающие спектральные серии Лаймана, Бальмера, Пашена и т.п., исходя лишь из характера их орбит.

Предположим, что какой-либо электрон движется под действием центральной силы $F_{ц} = -Ze^2/r_0^2$ по одной из замкнутых орбит с эквивалентным радиусом r_0 , испытывая при этом n_0 актов ускорения или торможения. В частности, если эта траектория является гиперболой или параболой, она имеет один участок торможения ($n_0 = 1$). Если это эллипс, $n_0 = 2$. В более сложных случаях, когда орбита электрона охватывает два и более ядер, число участков торможения может быть еще большим ($n_0 = 3, 4, 5$ и т.д.). При действии на орбитальный электрон дополнительных нецентральных сил F_n его траектория изменяется, а радиус-вектор электрона r приобретает значение, соответствующее новой результирующей силе $F = F_{ц} + F_n = -Ze^2/r^2$. Таким образом, сторонние силы $F_n = F - F_{ц}$ в данный момент времени определяются выражением:

$$F_n = Ze^2(1/r_0^2 - 1/r^2). \quad (22)$$

Чтобы связать эту силу с траекторией электрона, рассмотрим интегральный импульс $\mathbf{P} = \int \mathbf{F} dt$, приобретенный электроном под действием результирующей силы \mathbf{F} за время τ , в течение которого $\mathbf{F} \cdot \mathbf{r} > 0$, т.е. сила направлена в сторону движения электрона. Учитывая, что интегрирование начинается от точки, где $\mathbf{F} \cdot \mathbf{r} = 0$, найдем, что этот импульс равен $\mathbf{P} = \int \mathbf{F} dt = \mathbf{F}_c \tau$, где \mathbf{F}_c – среднее значение силы. Предположим теперь, что за время движения электрона в данном направлении сила \mathbf{F} претерпела n осцилляций длительностью τ , так что электрон успел претерпеть не один, а n актов ускорения за один оборот электрона. Тогда в условиях сохранения средней величины силы \mathbf{F}_c приобретенный электроном импульс $\mathbf{P} = \mathbf{F}_c n \tau$, а также скорость электрона \mathbf{v} и радиус условной круговой орбиты увеличатся в n раз. Это означает, что радиусы r и r_0 рассматриваемых орбит будут соотноситься между собой как

$$r/r_0 = n/n_0. \quad (23)$$

Подставляя (23) в (22), находим, что нецентральная сила \mathbf{F}_n , а также приобретенный за счет ее импульс $\mathbf{P}_n = \mathbf{F}_n \tau$ определяется выражением:

$$\mathbf{P}_n = (Ze^2/r_0^2)(1 - n_0^2/n^2) \tau. \quad (24)$$

Согласно этому выражению, равенство числа актов ускорения (торможения) электронов на какой-либо орбите n их числу n_0 на орбите, где действуют только центральные силы, свидетельствует об отсутствии сторонних (нецентральных) сил, что вполне естественно. Это непосредственно приводит к формуле для частоты колебаний поля нецентральных сил $\mathbf{v} = 1/\tau$ в виде:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0(1 - n_0^2/n^2), \quad (25)$$

Здесь $\mathbf{v}_0 = Ze^2/r_0^2 \mathbf{P}_n$ – некоторая постоянная для данного вещества величина, которая может быть найдена экспериментально. Выражение (25) адекватно закономерности $\lambda = \lambda_0(n^2 - n_0^2)/n^2$, установленной Бальмером в 1885 г. по экспериментальным данным спектра водорода. Согласно (25), частоты излучения дискретны и по мере увеличения n сходятся к своему верхнему пределу \mathbf{v}_0 , определяющему название серии: Лаймана ($n_0 = 1$), Бальмера ($n_0 = 2$), Пашена ($n_0 = 3$), Брэкэта ($n_0 = 4$), Пфунда ($n_0 = 5$) и т.д. Оба этих положения отлично согласуются с опытом (особенно для водорода и водородоподобных атомов ($n = 2$)).

Как видим, формулы для вычисления спектральных серий Лаймана, Бальмера, Пашена и т.д., считавшиеся “пробным камнем” квантовой теории, могут быть объяснены и с позиций классической физики. Преимущество предложенного подхода к изучению спектральных серий заключается в его физической ясности и наглядности. Это касается прежде всего физического смысла величин n_0 и n , определяющих характер орбиты. В модели Н. Бора связь квантовых чисел с геометрией орбиты далеко не столь очевидна. В квантовой же механике это понятие, как известно, отвергается вовсе.

Обращает на себя внимание подкупающая простота объяснения ряда наблюдаемых закономерностей. В частности, вполне естественно, что электроны, движущиеся по траекториям, более удаленным от атомного ядра, имеют и больший период обращения. Поэтому они успевают претерпеть за этот период большее число актов торможения и ускорения электрона, и соответственно имеют более высокую частоту излучения. Это объясняет, почему с увеличением потенциальной энергии электрона частота излучения в любой спектральной серии повышается.

Далее, число актов ускорения (торможения) электрона не может быть дробным – отсюда и закон целых чисел, отраженный в соотношениях (25). В этом порядке идей наличие нескольких серий у атомов одного и того же вещества (в том числе у одноэлектронных атомов) объясняется различием характера «центральных» орбит у

различных атомов этого вещества (т.е. траекторий, возникающих под действием центральных сил). Заметим, что такое объяснение было бы несостоятельным при рассмотрении изолированного одноэлектронного атома в концепции Н. Бора. Несколько худшие результаты для щелочных металлов (наличие у них главной, резкой, диффузионной и бергмановской серий) в этом порядке идей могут быть объяснены приближенным характером соотношения (25) для сложных орбит.

Заключение

Представление об электромагнитной волне как о последовательности солитонов, излучаемых с частотой ν [солитон/с], дает непротиворечивое объяснение всех закономерностей фотоэффекта и спектральных серий. С этих позиций не только снимаются отмеченные выше противоречия в объяснении фотоэффекта, но и проливается новый свет на квантовый характер процесса излучения, дуализм волна-частица, пропорциональность энергии электромагнитной волны ее частоте и т.п. Наряду с этим благодаря раскрытию структуры индивидуальной постоянной h_0 выводится ряд новых соотношений, которые позволяют по известным спектроскопическим данным находить средний импульс, кинетическую энергию и средний радиус орбиты, не прибегая к решению волнового уравнения Шрёдингера.

Возможность получения основных результатов квантовой механики как следствий эргодинамики делает излишним использование ряда постулатов специфического квантово-механического характера. Наиболее принципиальным из них является правило частот, согласно которому частота излучения ν зависит от уровня энергии как начальной, так и конечной орбиты, и, следовательно, остается неопределенной до тех пор, пока электрон не достигнет последней. В таком случае приходится признать, что электрон каким-то непостижимым образом заранее “знает” о своей будущей орбите. Это явилось поводом к отрицанию в квантовой теории причинно-следственных отношений.

Представление об излучении как о последовательности солитонов изменяет и наши представления о роли квантовой механики в структуре современного знания. Становится ясным, что замена законов классической механики и электродинамики квантовыми обусловлены не принципиальной неприменимостью самих этих законов к объектам микромира, а дискретной природой протекающих в них процессов. Это позволяет высказать осторожную надежду, что постепенное выявление классических оснований квантовой физики поможет преодолеть ее излишний индетерминизм и отсутствие наглядности (см. материалы сайта <http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a>).