

## КЛАССИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ(С-И)

Д.т.н. проф. Эткин В.А.

Показано, что понимание ряда положений квантовой механики облегчается, если представить свет как совокупность возмущений электромагнитного поля, распространяющихся в нем в виде солитонов

**Введение.** 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  $\omega$  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 с энергией  $\hbar\omega$  (где  $\hbar$  – постоянная Планка) как частицу (названную впоследствии фотоном). Основываясь на этом, он дал первое теоретическое объяснение экспериментальных зависимостей фотоэффекта, за что впоследствии получил Нобелевскую премию [1]. Вслед за этим Н. Бор на основе квантовой модели атома водорода 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. Одной из причин, вынудившей исследователей отказаться от классической волновой теории света, явились обнаруженные в ряде явлений (фотоэффект, фотолюминесценция, эффект Комптона) свойства света как частицы. Этот дуализм «волна - частица» не получил в то время удовлетворительного объяснения. Другой причиной 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 неизбежно упасть на ядро. Однако в настоящее время все чаще появляются публикации, в которых с позиций классической физики. Поэтому вновь оказывается актуальным вопрос, поставленный еще академиком Вавиловым: действительно ли волновая теория оказалась беспомощной перед квантовыми законами действия света?

В этой статье мы попытаемся рассмотреть эти вопросы с позиций термокинетики, обобщающей классическую термодинамику на нестатические (неравновесные) процессы переноса и преобразования любых форм энергии [2].

**Причины возникновения и квантования процесса излучения.** Согласно принятому в термодинамике принципу классификации процессов по их последствиям (т.е. по особым, феноменологически отличимым и несводимым к другим изменениям состояния, которые они вызывают) следует различать процесс ускорения (или торможения) тел, состоящий в данном случае в изменении кинетической энергии электронов  $E_k = m_e w^2/2$  (где  $w$ ,  $m_e$  – их скорость и масса), и процесс их переориентации, состоящий в изменении направления вектора скорости  $\mathbf{w}$  при постоянстве ее модуля  $w$  (и кинетической энергии  $E_k$ ). Это означает, что модуль скорости электрона  $w = |\mathbf{w}|$  и единичный вектор  $\mathbf{e}$ , характеризующий направление вектора скорости  $\mathbf{w} = w \mathbf{e}$ , являются координатами двух независимых процессов - ускорения и переориентации. С этих позиций равномерное круговое движение электронов нельзя называть ускоренным, поскольку его кинетическая энергия определяется только величиной, а не направлением скорости. Последнее тем более очевидно, что процесс ускорения требует затраты определенной работы, в то время как центростремительная сила  $F_{ц}$  всегда направлена по нормали к вектору  $\mathbf{w}$  и потому не совершает никакой работы ускорения. Поэтому следует скорее признать неудачным введение в механику термина «центростремительное ускорение», нежели считать

противоречащим электродинамике безызлучательное движение электронов по круговой орбите. Напротив, противоречащим физике следует считать противоположную точку зрения, поскольку при равномерном вращении электрона его кинетическая и полная энергия остаются неизменными. В таком случае излучение электрона противоречило бы закону сохранения энергии, а также оригинальным уравнениям Максвелла, которые могут быть выведены именно исходя из этого закона (Здесь). Кстати сказать, вывод об излучении электрона в процессе его центростремительного ускорения следует не из самих Максвелла, а из их волновой формы, предложенной в 1883 году британскими физиками Д. Фицджеральдом и О. Хевисайдом и, как выяснилось впоследствии, не эквивалентной им.

Далее, можно показать, что излучение электрона нельзя объяснить и «перескоком» его с одной устойчивой круговой орбиты на другую. Дело не только в том, что это ведет к нарушению причинно – следственных отношений, поскольку частота фотона  $\omega$  зависит в этом случае и от параметров будущей орбиты (как это и предположил Н.Бор), что равноценно допущению, будто электрон неведомым образом заранее знает, на какую орбиту он «перескочит». Важнее другое, что сход электрона с устойчивой орбиты возможен лишь в результате его торможения. Действительно, согласно закону Кулона сила  $F_e$  притяжения электрона, движущегося по круговой орбите радиусом  $r$ , равна:

$$F_e = kZe^2/r^2, \quad (1)$$

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 уравнивается центробежной силой

$$F_y = m_e w^2/r, \quad (2)$$

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

$$w = e(kZ/m_e r)^{0,5}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при движении с постоянной скоростью  $w$  радиус орбиты остается неизменным, так что электрон не может «соскочить» с нее. Остается показать, что излучение электрона возможно только при торможении его сторонними (нецентральными) силами. Известно, что движение тел (частиц) под действием центральных сил происходит по траектории, образуемой одним из конических сечений, и при этом их полная (кинетическая и потенциальная) энергия остается неизменной [1]. Это означает, что в соответствии с законом сохранения энергии движение под действием только центральных сил также не может сопровождаться излучением.

Таким образом, с термодинамических позиций излучение или поглощение энергии электроном возможно только в случае торможения электрона нецентральными (сторонними) силами, исходящими из внешних для атома силовых полей и изменяющими энергию атома. Последнее означает, что если в качестве системы рассматривать не одиночный атом (как в модели Бора), а всю совокупность атомов, находящихся в поле межатомных сил и внешних силовых полей, то в соответствии с неравновесной термодинамикой в каждом акте торможения электрона нецентральными силами совершается работа против этих сил. В каждом таком акте торможения электрона возникает единичное возмущение внешнего силового поля, которое распространяется в нем в виде солитона (уединенной волны), имеющей в данном случае электромагнитную природу. Процесс торможения электрона ограничен во времени, поэтому энергия и излучается порциями (квантами). В этом порядке идей постулат М. Планка о квантовании

энергии излучения, положенный им в основу его знаменитого закона [1], вовсе не выглядит противоречащим классической физике.

Торможение электрона и является причиной схода его с траектории, которую он имел бы при действии только центральных сил (какова бы она ни была эта траектория – круговая или эллиптическая, замкнутая или незамкнутая). При этом будущая орбита электрона определяется величиной излученной энергии (а не наоборот, как предполагается в модели Бора). Поскольку же величина и направление внешних сил, тормозящих электроны, меняется с изменением взаимного расположения атомов, само понятие орбиты приобретает статистический (вероятностный) характер, что трактуется в квантовой механике как ее «размытость».

Принципиальное отличие солитона от фотона как волнового пакета с энергией  $\hbar\omega$  заключается также в том, что его энергия  $E_c$  определяется не его частотой, а, как обычно, квадратом амплитуды волны  $E_c = KA^2$  (где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы волны). Последовательность таких солитонов и образует квазинепрерывную волну, частота  $\omega$  которой (и длина волны  $\lambda$ ) определяется числом актов торможения электрона (рождения и «испускания» солитона) в единицу времени, а амплитуда  $A$  – величиной изменения скорости электрона. Свойства солитона, как известно, близки к свойствам частицы [4]. В частности, он сохраняет свою форму в процессе распространения и «столкновения» с другими солитонами. Это приближает нас к понимаю природы дуализма «волна - частица». Как и любая волна, он не имеет массы, и это освобождает от необходимости прибегать к СТО для объяснения нулевой массы его покоя.

При чередовании актов излучения и поглощения солитонов в веществе может наступить состояние динамического равновесия, характеризующееся соответствием среднестатистических параметров орбит условиям резонанса с колебаниями окружающих атом электромагнитных полей. При нарушении этого равновесия резонансная частота излучения «возбужденного» атома оказывается пропорциональной числу актов торможения электрона нецентральными силами, т.е. произведению числа оборотов (витков) электрона  $z$  в его орбитальном движении 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). Естественно, что величина ускорения на различных участках траектории (и, следовательно, амплитуда солитона  $A$ ) при этом будут различны.

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

$$\omega = nz = nw/2\pi r = m_e w c / 2\pi m_e r c n^{-1} = p_e c / h^* , (4)$$

где  $p_e = m_e w$  - средний импульс электрона;  $h^* = 2\pi m_e r c n^{-1}$  – некоторая постоянная для данной орбиты величина.

Согласно этому выражению, частота излучения  $\omega$  оказывается пропорциональной импульсу электрона  $p_e$ . 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 соответствует гипотезе де Бройля (1926 г) о том, что волновые свойства присущи всем веществам, и приближает нас к пониманию природы дуализма “волна – частица”. Не противоречит такая точка зрения и представлению Эйнштейна о том, что лучистая энергия в полости имеет дискретный (квантовый) характер (с той лишь оговоркой, что ее носителем являются не фотоны, а

солитоны, сохраняющие свою форму и обладающие свойствами как волны, так и частицы).

Исходя из этого, оказалось возможным дать классическое обоснование всех закономерностей фотоэффекта <a

href="http://zhurnal.lib.ru/editors/e/etkin\_w\_a/otractovkefotoeffecta.shtml



href="http://zhurnal.lib.ru/editors/e/etkin\_w\_a/ttrmodinamicheskiiyyvoduravneniyashredingera.shtml">(Здесь)</a> и получить поддающиеся экспериментальной проверке

выражение для спектральных серий Бальмера, Лаймана, Пашена <a

href="http://zhurnal.lib.ru/editors/e/etkin\_w\_a/oproishogdeniispektralnyxseriy.shtml

" > (Здесь)</a> .

Однако предлагаемый подход позволяет не только дать классическое объяснение квантовой природы процесса излучения, но и рассчитать параметры орбиты электрона. Из (4) следует, что для орбиты с числом участков торможения  $n$  существует однозначная связь между частотой излучения  $\nu$  и отношением  $w/r$  :

$$w = 2\pi n^{-1}r\omega. \quad (5)$$

Раскроем вид функции  $\omega = \omega(w/r)$  для случая исходного движения электрона по круговой орбите. Рассматривая (5) и (3) совместно, находим:

$$r = (kZ e^2 n^2 / 4\pi^2 \omega^2 m_e)^{1/3}. \quad (6)$$

Это соотношение позволяет для каждой орбиты с известным числом участков торможения  $z_0$  находить её радиус  $r$ , средний импульс электрона

$$p_e = m_e w = e(kZ m_e / r)^{0.5} \quad (7)$$

и среднюю кинетическую энергию электрона

$$E_k = p_e^2 / 2m_e. \quad (8)$$

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  $\omega = 2,379 \cdot 10^{15}$  Гц (длина волны  $\lambda = 1,261 \cdot 10^{-7}$  м).

В соответствии с (6) имеем:

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

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

$$w = e(kZ/m_e r)^{0.5} = 1,602 \cdot 10^{-19} (8,9875 \cdot 10^9 \cdot 1,0 / 9,1095 \cdot 10^{-31} \cdot 1,04 \cdot 10^{-10})^{0.5} = 1,56 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1},$$

что соответствует импульсу электрона

$$p_e = m_e w = 9,1095 \cdot 10^{-31} \cdot 1,56 \cdot 10^6 = 1,421 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}$$

и его кинетической энергии

$$E_k = p_e^2 / 2m_e = (1,421 \cdot 10^{-24})^2 / 2 \cdot 9,1095 \cdot 10^{-31} = 1,108 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

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  $z_o$ . Возможность нахождения этих параметров выходит за рамки задач, решаемых квантовой механикой. Это вселяет надежду, что и другие выводы квантовой механики окажутся следствием корректного обобщения классической физики на объекты микромира.

### **Источники информации**

1. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика, Т.1. Механика. – М.: Наука, 1973.
2. Эткин В.А. Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии) Тольятти, 1991.
3. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – Москва: Наука, 1990. – 288 с.
4. Эткин В.А. Классические основания квантовой механики ( <http://www.n-t.org/tp/ng/kokm.htm>, 22.09.2001).