

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 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 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 ω 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:

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

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

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

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

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

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 ω которой (и длина волны λ) 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 ω 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 ω 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) 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) .

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 ν 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).