

КЛАССИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАНКА

Предложено обоснование закона излучения абсолютно черного тела, не опирающееся на гипотезы и специфические законы квантовой теории.

Введение. В 1900 году М. Планк, известный своими работами по термодинамике, нашел формулу, хорошо воспроизводящую плотность излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) во всём диапазоне частот. Для этого ему пришлось выдвинуть гипотезу о дискретности энергетического спектра осцилляторов [1]. Согласно Планку, испускание и поглощение излучения происходит порциями (квантами), названными впоследствии фотонами, энергия которых $\varepsilon_\phi = h\nu$, т.е. пропорциональна частоте ν излучения. При этом атомы вещества представлялись как осциллятор, который мог находиться только в определенных дискретных энергетических состояниях с энергиями $\varepsilon_n = nh\nu$, где $n = 1, 2, \dots$ – целочисленное неотрицательное число, названное впоследствии квантовым. Эти энергетические уровни осциллятора образуют дискретный набор величин, т.е. представляют собой, как говорят, эквидистантный спектр с одной и той же разностью энергий $h\nu$ любых двух соседних уровней. По Планку, распределение энергии по уровням ε_n подчинено классической статистике Больцмана:

$$N_\nu = N_0 \exp(-\varepsilon_n/k_b T), \quad (1)$$

согласно которой отношение числа N_ν осцилляторов с энергией $\varepsilon_n = nh\nu$ к общему их числу N_0 уменьшается экспоненциально с увеличением частоты излучения ν и квантового числа n . Это и предотвращает так называемую «фиолетовую катастрофу», предсказываемую законом излучения Рэлея [2].

Среднестатистические значения энергии осциллятора $\langle \varepsilon_n \rangle$ вычисляются М.Планком путем перехода от интегралов к суммам бесконечного ряда натуральных чисел $n = 1, 2, \dots, \infty$:

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \sum_n \varepsilon_n \exp(-\varepsilon_n/k_b T) / \sum_n \exp(-\varepsilon_n/k_b T). \quad (2)$$

Это среднее значение равно

$$\langle \varepsilon_n \rangle = h\nu / [\exp(h\nu/k_b T) - 1]. \quad (3)$$

Далее Планк предполагает, что спектральная плотность излучения $u(\nu, T)d\nu$ в диапазоне частот $d\nu$ пропорциональна $\langle \varepsilon_n \rangle$ и числу стоячих волн dN_ν , содержащихся в этом интервале частот в полости АЧТ, находящейся в тепловом равновесии с излучающим телом:

$$dN_\nu = (\nu^2/\pi^2 c^3) d\nu. \quad (4)$$

В таком случае произведение $\langle \varepsilon_n \rangle dN_\nu$ приводит к его закону излучения:

$$u(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3) / [\exp(h\nu/k_b T) - 1] \text{ (Дж}\cdot\text{с/м}^3) \quad (5)$$

Хотя эта формула прекрасно описывала экспериментальные результаты, сам по себе этот вывод основан на ряде достаточно произвольных допущений. Во-первых, положенная в ее основу гипотеза Планка входила в явное противоречие с представлениями классической физики о непрерывности энергетического спектра. Во-вторых, в соответствии с классической механикой электрон, вращающийся по круговой орбите, испытывает центростремительное ускорение постоянно и, следовательно, должен был излучать энергию также непрерывно.

В-третьих, М. Планк полагает энергию кванта излучения в (3) пропорциональной частоте $h\nu$ в первой степени и не зависящей от амплитуды волны A_v . Это противоречит известному из акустики, гидродинамики и электродинамики выражению для плотности энергии плоской бегущей волны [4]:

$$\rho E_v = \rho A_v^2 \nu^2 / 2, \text{ Дж/м}^3, \quad (6)$$

согласно которому она пропорциональна квадрату частоты ν [с^{-1}] и амплитуды волны A_v ([м] в случае гидравлических волн).

В-третьих, в выражение закона излучения Планка заложено молчаливое допущение, согласно которому отношение числа испущенных полостью АЧТ фотонов к числу стоячих волн в ней всегда равно единице. Это положение плохо согласуется с представлением о фотоне как пакете волн: становится совершенно непонятным, каким образом за один период колебаний стоячей волны последняя излучает целый цуг волн?

В-четвертых, переход от выражения (2) к выражению (3) у Планка основан на свойствах бесконечной геометрической прогрессии. Между тем ряд, образованный квантовыми числами n , весьма и весьма ограничен.

В-пятых, если частота излучения ν определяется квантовыми числами исходной и конечной орбиты n_i и n_j , то в соответствии с известным соотношением квантовой механики

$$h\nu = E_i (1 - n_i^2/n_j^2) \quad (7)$$

уже при $n_i = 2$ и $n_j = 10$ электрон будет терять за один акт излучения 96% своей исходной энергии E_i . Это ставит под сомнение не только устойчивость одноэлектронного атома, но и саму идею об излучении путем «перескока» электрона с одной орбиты на нижележащие.

Помимо всего прочего, все попытки вывести из первых принципов величину h , которую Л. Бройль называл «таинственной постоянной», до сих пор не находили своего решения. Подобных вопросов возникает, вообще говоря, множество [3,5]. Все это побуждает к поиску иного обоснования закона излучения Планка, не нуждающегося в специфических квантовых гипотезах.

Новая трактовка закона излучения. В соответствии с методологией энергодинамики рассмотрим в качестве объекта исследования не одиночный атом (как в модели Н.Бора), а всю совокупность атомов вещества, находящихся в переменных внешних силовых полях. Чтобы избежать применения постулатов М.Планка и Н.Бора, воспользуемся законом сохранения энергии для всей совокупности атомов, рассматриваемых как осцилляторы. Согласно этому закону, их полная энергия остается неизменной, если движение орбитальных электронов происходит только под действием внутренних (центральных) сил, удерживающих электрон на орбите (Л. Ландау, Е. Лившиц, 1973). Следовательно, об излучении телом энергии можно говорить только в том случае, когда на его атомы действуют сторонние (нецентральные) силы \mathbf{F} , исходящие от окружающих их электромагнитных полей. Когда направление сил \mathbf{F} совпадает с направлением движения орбитальных электронов ($\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} > 0$), возникает их ускорение. В противном случае ($\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} < 0$) электроны испытывают кратковременное торможение, длительность которого определяется полупериодом электромагнитной волны. При этом возникает единичное возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в нем в виде волны. Последовательность таких волн и образует то, что мы называем излучением. Ввиду того, что процесс торможения или ускорения электронов кратковременен, сопровождающий его процесс излучения и поглощения атомами электромагнитной энергии приобретает дискретный характер. Таким образом, квантовая природа излучения обусловлена самим характером процесса и отнюдь не противоречит классической механике.

Когда период колебания поля больше времени обращения орбитального электрона, торможение наступает в среднем за два, три и более оборота электрона. Такие орбиты остаются в течение некоторого времени невозмущенными (устойчивыми). Однако по мере увеличения частоты ν электроны успевают претерпеть за один виток орбиты уже не один, а множество $(1, 2, \dots, z_e)$ актов торможения или ускорения. Соответствующее число раз происходит и ускорение электронов, т.е. изменяется и траектория электрона (от апогея до апогея). При условном радиусе круговой орбиты порядка 1 \AA и скорости орбитального электрона v_e , равной $1/137$ скорости света в вакууме электрон в конце рентгеновского диапазона частот (10^{19} Гц) успевает претерпеть за время одного оборота порядка $8 \cdot 10^3$ актов ускорения или торможения. Это приводит к «размытости» траектории, которая трактуется в квантовой теории как следствие принципа неопределенности.

В результате указанной последовательности актов излучения и торможения орбитальных электронов равновесие между излучением и веществом приобретает динамический характер. Поэтому ссылки на неизбежность падения электрона на ядро вследствие излучения им энергии, послужившие основанием для отказа от классических представлений, также безосновательны.

Как известно, расхождение между законами излучения Рэлея и Планка усиливается с уменьшением длин волн. Поэтому нас сейчас интересует тот случай, когда $z_e > 1$. Тогда частота излучения атома любого вещества ν оказывается кратной не только числу оборотов орбитального электрона n_e , но и числу z_e актов его торможения за один оборот любой (замкнутой или незамкнутой) орбиты¹.

Число оборотов n_e определяется, как известно, отношением средней скорости электрона v_e на орбите к ее длине L , так что за один «оборот» электрона излучение происходит $z_e n_e$ раз:

$$\nu = z_e n_e = v_e / l_e = p_e / m_e l_e, \quad (8)$$

где $p_e = m_e v_e$ – модуль усредненного импульса электрона на орбите; $l_e = L / z_e$ – средняя длина «тормозного пути» электрона.

В соответствии с (8), на одной и той же частоте ν излучают энергию все атомы, орбиты которых имеют одинаковую длину «пути торможения» электрона $l_e = \text{const}$. Такие орбиты мы в дальнейшем для краткости будем называть *подобными*. При этом частота излучения ν оказывается пропорциональной среднему импульсу p_e электронов на всех подобных орбитах. Это согласуется с идеями де Бройля о связи частоты волны с импульсом частицы. Более того, согласно (8) каждому виду атомов с подобными орбитами соответствуют определенные длины волн излучения (поглощения). Это также подтверждает гипотезу де Бройля о том, что волновые свойства присущи всем веществам.

Далее, поскольку частота излучения ν связана с длиной волны λ простым соотношением $\nu = c / \lambda$, из (8) следует:

$$c / \lambda = v_e / l_e. \quad (9)$$

Таким образом, длина излучаемой волны определяется средней длиной «пути торможения» электрона l_e и его средней скоростью v_e . Это соотношение объясняет, почему на длине орбиты L_e укладывается целое число волн де Бройля с длиной λ .

Определим теперь понятие потока излучения J_i как частного случая потока носителя любой i -й формы энергии \mathbf{J}_i . В энергодинамике любой из таких потоков выражается произведением переносимой величины Θ_i (массы k -го вещества M_k , его импульса $M_k v_k$, заряда Θ_e , энтропии S и т.д.) на скорость её переноса v_i . Соответственно плотность этого потока $\rho \mathbf{J}_i$ оп-

¹ Последнее подтверждается тем известным из квантовой теории фактом, что длины борзовских орбит L оказываются кратными длине волны де Бройля.

ределяется произведением плотности $\rho\Theta_i$ на ту же скорость. При этом величина Θ_i может быть найдена из выражения элементарной упорядоченной работы i -го рода dW_i^e , которая равна убыли $-dE_i$ энергии данного рода E_i и может быть представлена в виде произведения переносимой величины Θ_i на изменение сопряженного с ней потенциала ψ_i [3]. В случае волновой формы энергии ($E_i \equiv E_B$; $\Theta_i \equiv \Theta_B$; $\psi_i \equiv \psi_B$; $v_i = c$) согласно (6) имеем:

$$dW_B = -dE_B = -\rho\Theta_B d\psi_B = -\rho A_B v d(A_B v), \text{ Дж/м}^3. \quad (10)$$

Отсюда следует, что $\rho\Theta_B = \rho A_B v$, так что

$$\Theta_B = A_B v = h_0 v, \text{ Дж} \quad (11)$$

где $h_0 = A_B$ (Дж·с) – некоторый коэффициент пропорциональности, подлежащий экспериментальному определению и имеющий смысл действия, производимого атомом в единичном акте торможения его орбитальных электронов.

Как видим, первой степени частоты ν пропорциональна не энергия волны E_B , а её энергоноситель Θ_B (носитель лучистой формы энергии). Понимание этого обстоятельства существенно облегчается, если представить излучение в виде последовательности солитонов. Солитоном принято называть нелинейную уединенную волну, отличающуюся сохранением своей формы при движении и 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. Последовательность уединенных волн (солитонов) весьма сходна с группами волн, которые перемещаются с общей скоростью, не зависящей от их амплитуды. Такое представление об излучении легко объясняет, почему поток излучения J_L пропорционален его частоте ν , поскольку последняя приобретает в этом случае смысл потока испускаемых солитонов (солитон/с). Во всяком случае, сам по себе этот факт пропорциональности J_L частоте ν не противоречит классической физике. При этом и коэффициент пропорциональности h_0 приобретет простой и ясный смысл энергии, переносимой единичным потоком солитонов, а частота ν – количества солитонов, испущенных в единицу времени. В таком случае под плотностью ρ в выражении (10) следует понимать число N_ν волн (солитонов) с частотой ν , «умещающихся» в единице объема излучающего тела или поля излучений. Согласно теории волн, это число определяется выражением $N_\nu = (8\pi\nu^3/3c^3)$, так что их спектральная плотность $\rho_\nu = dN_\nu/d\nu = 8\pi\nu^2/c^3$.

Согласно (11) поток J_L пропорционален амплитуде волны A_B , так что в случае её постоянства он неограниченно возрастал бы с увеличением частоты ν . Поскольку это противоречит опыту, следует признать вслед за М.Планком, что с ростом ν отношение числа осцилляторов N_a с амплитудой A_B , излучающих на частоте ν , к общему их числу N уменьшается, подчиняясь при этом той же максвелл-большцмановской статистике:

$$N_a = N \exp(-h_0\nu/k_b T), \quad (12)$$

где k_b – константа Больцмана.

В таком случае среднестатистическое значение $\langle J_L \rangle$ лучистого потока J_L определится подобным (2) образом:

$$\langle J_L \rangle = \sum_z h_0\nu \exp(-h_0\nu/k_b T) / \sum_z \exp(-h_0\nu/k_b T), \quad (12)$$

и для бесконечного ряда натуральных чисел $z_e = 1, 2, \dots, \infty$ может быть найдено путем аппроксимации (12) тем же выражением (3):

$$\langle J_{\text{л}} \rangle = \langle h_0 \rangle v / [\exp(\langle h_0 \rangle v / k_b T) - 1], \quad (13)$$

где $\langle h_0 \rangle = \langle A_{\text{в}} \rangle c$ – среднестатистическое значение коэффициента h_0 , отражающее среднестатистическое значение амплитуды волны $\langle A_{\text{в}} \rangle$. Однако теперь эта операция значительно более обоснована, чем у М.Планка, поскольку здесь суммирование осуществляется по ряду, достигающему многих тысяч членов, а не по весьма ограниченному набору квантовых чисел.

В соответствии с (11) произведение ρ_v на среднестатистическое значение лучистого потока $\langle J_{\text{л}} \rangle$ определяет спектральную плотность излучения АЧТ $u(\nu, T)$, т.е. энергии, излучаемой единицей его объема V на частоте ν :

$$u(\nu, T) = \rho_v \langle J_{\text{л}} \rangle = (8\pi \langle h_0 \rangle \nu^3 / c^3) / [\exp(\langle h_0 \rangle \nu / k_b T) - 1] \text{ (Дж}\cdot\text{с/м}^3\text{)}. \quad (14)$$

Это выражение отличается от закона излучения Планка (5) лишь тем, что в нем вместо постоянной Планка h фигурирует среднестатистическое значение $\langle h_0 \rangle$ величины h_0 . На этом основании выражения величины $\langle h_0 \rangle$ и h можно считать тождественными.

Обсуждение результатов. Предложенное обоснование закона излучения Планка не опиралось на какие-либо положения квантовой теории. Вместе с тем оно открывает возможность новой интерпретации ряда известных опытных фактов. Прежде всего, становится совершенно ясным, что именно торможение и ускорение электрона нецентральными силами вызывает многократный процесс излучения и поглощения атомом электромагнитных волн. С этих позиций утверждение о неизбежном «падении» электрона на ядро атома выглядит совершенно необоснованным, поскольку при чередовании актов «излучения» и «поглощения» электромагнитной энергии в веществе вполне может наступить состояние динамического равновесия, характеризующееся постоянством средней энергии электронов. Столь же необоснованным с этих позиций выглядит и постулат Бора о существовании «устойчивых» круговых орбит, что возможно только в отсутствие действия на них внешних сил \mathbf{F} . Одновременно становятся недопустимой идеализацией и предположение Н.Бора о возможности безызлучательного движения электронов. С энергодинамических 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. При этом направление движения орбитальных электронов также многократно меняется в связи с изменением взаимного расположения атомов, что также способствует «размытости» орбиты.

Далее, при выводе закона излучения (14) мы не прибегали к специфическим постулатам квантово-механического характера, о которых говорилось выше. Что же касается представления об электромагнитной волне как о последовательности солитонов, то оно не является обязательным. Однако оно существенно облегчает понимание дуализма «волна-частица», послужившего одной из причин отказа от классических концепций. 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. Таким образом, сами специфические свойства солитонов объясняют, почему излучение в одних случаях обладает свойствами волны (интерференция, дифракция, поляризация), а в других – свойствами частиц (фотоэффект, эффект Комптона).

Предпринятое обоснование закона излучения Планка проливает также новый свет на структуру и физический смысл постоянной Планка. Её статистический характер объясняет весьма точное совпадение величины h , найденной различными методами в экспериментах с реальными телами (в частности, из данных о спектре излучения АЧТ, из измерений фотоэффекта в ряде металлов, из эффекта Джозефсона и т.п.). Получает также объяснение зависимость энергии волны от её амплитуды.

Наконец, коренным образом изменяется и представление о величине кванта энергии излучения. Если по Планку таким квантом являлась величина $h\nu$, то теперь она уступает место в ν раз меньшей величине энергии солитона. Это объясняет, почему атом сохраняет устойчивость в единичном акте излучения фотона, когда квантовая теория предсказывает потерю более 90% его энергии [8]. Более того, замена фотона последовательностью ν солитонов легко объясняет обнаруженную еще в 1967 году интерференцию фотона с самим собой. В данном случае интерферируют солитоны, последовательность которых образует квазинепрерывную электромагнитную волну. Наряду с возможностью классического объяснения происхождения спектральных серий [7], новой трактовки фотоэффекта [8], уточнения данного ранее классического вывода уравнения Шрёдингера [9] и т.д. предложенное обоснование закона излучения Планка открывает возможность синтеза классической и квантовой механики. Однако еще более важным следствием пересмотра оснований квантовой механики с позиции эргодической динамики является возможность вычисления на базе выражения (8) среднестатистических параметров орбиты электрона (эквивалентного радиуса круговой орбиты $\langle r_e \rangle = \langle L_e / 2\pi z_e \rangle$, средней скорости электронов $\langle v_e \rangle$, их импульса $\langle p_e \rangle = m_e \langle v_e \rangle$ и энергии $\langle E^k \rangle = \langle p_e^2 \rangle / 2 m_e$), что выходит за рамки возможностей современной квантовой теории [2].

Все это подтверждает правоту академика Вавилова, выразившего сомнение в беспомощности волновой теории перед квантовыми законами действия света.

Литература.

1. Планк М. Теория теплового излучения – Л.-М 1935.
2. Шпольский Э.В. Атомная Физика. Том 1. Изд.6-е.-М. 1974.
3. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). С.-П., «Наука», 2008, 409 с.
4. Крауфорд Ф. Берклеевский курс физики. Т.3: Волны. М.: Мир, 1965. 529 с.
5. Эткин В.А. О законе излучения Планка. / Вестник Дома Ученых Хайфы, 2008.- Т.16, с.12-17.
6. Эткин В.А. Об основаниях квантовой механики. / Вестник Дома Ученых Хайфы, 2006.- Т.10, с.19-27.
7. Эткин В.А. Классическое объяснение спектральных серий (<http://sciteclibrary.ru/rus/6079.html> .-16.09.2003).
8. Эткин В.А. Классическая интерпретация фотоэффекта (<http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5905.html>. - 26.08.2003).
9. Эткин В.А. Термодинамический вывод уравнения Шрёдингера (http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/shtml).

Переработана 1.04.2010 г.

Последовательность уединенных волн (солитонов) весьма сходна с группами волн, которые перемещаются с групповой скоростью, не зависящей от их амплитуды. В настоящее время класс объектов, подпадающих под понятие солитона, постоянно расширяется. , если предположить, что единичное возмущение внешнего поля при торможении каждого электрона распространяется в нем в виде уединенной волны (солитона). Солитоном принято называть нелинейную уединенную волну, отличающуюся сохранением своей формы при собственном движении и столкновении с себе подобными волнами.

К тому же дискретность процесса излучения энергии вовсе не означает, что и сама энергия состоит из отдельных квантов и потому не может изменяться непрерывно в каких-либо иных процессах. Никому же не придет в голову утверждать, что океан состоит из отдельных капель, коль скоро такова природа дождя.