

ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ ЗАКОНА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАНКА

Д.т.н., проф. В.Эткин
(Институт интегративных исследований)

Предложен новый взгляд на процесс излучения как следствие торможения орбитальных электронов внешним полем излучения. Дано обоснование закона излучения Планка, не опирающееся на гипотезы и постулаты квантово-механического характера. Вскрыт смысл постоянной Планка и показано, что истинными квантами излучения являются волны, дискретные в пространстве и времени.

1. Введение. В 1900 году М.Планк нашел формулу, хорошо воспроизводящую плотность излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) во всём диапазоне частот ν [1]. При этом он, как и его предшественник Дж. Рэлей, предполагал существование теплового равновесия между телом с температурой T и воображаемой полостью с абсолютно отражающими стенками и свойствами абсолютно черного тела (АЧТ), в которой образуется система стоячих волн. Число этих волн N_ν на единицу объема V полости определялось выражением

$$dN_\nu = (\nu^2/\pi^2 c^3) d\nu, \quad (1)$$

где c – скорость света. Однако в отличие от закона излучения Рэля (1900)

$$u(\nu, T) = (8\pi\nu^2/c^3) k_b T, \text{ [Дж/м}^3] \quad . \quad (2)$$

предполагавшего объемную плотность излучения $u(\nu, T)$ пропорциональной определенной доле $k_b T$ тепловой энергии АЧТ (где k_b – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура), закон Планка предусматривал более сложную связь излучения с тепловой энергией. Для этого ему пришлось выдвинуть гипотезу о дискретности энергетического спектра осцилляторов. Согласно Планку, испускание и поглощение излучения происходит порциями (квантами), названными впоследствии фотонами, энергия которых $\epsilon_\phi = h\nu$, т.е. пропорциональна частоте излучения. При этом атомы вещества представлялись как осцилляторы, которые могут находиться только в определенных дискретных энергетических состояниях с энергиями $\epsilon_n = n h\nu$, где $n = 1, 2, \dots$ – натуральные числа, названные впоследствии квантовыми. Эти энергетические уровни осциллятора представляют собой эквидистантный спектр с одной и той же разностью энергий $h\nu$ любых двух соседних уровней. Далее, Планк допустил, что распределение энергии по уровням ϵ_n подчинено классической статистике Больцмана:

$$N_\nu = N_0 \exp(-\epsilon_n/k_b T), \quad (3)$$

согласно которой отношение числа N_ν осцилляторов с энергией $\epsilon_n = n h\nu$ к общему их числу N_0 уменьшается экспоненциально с увеличением частоты излучения ν и квантового числа n , что было необходимо для предотвращения так называемой «ультрафиолетовой катастрофы» вследствие неограниченного возрастания $u(\nu, T)$ с увеличением частоты ν , в законе излучения Рэля (2).

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

$$\langle \epsilon_n \rangle = \sum_n \epsilon_n \exp(-\epsilon_n/k_b T) / \sum_n \exp(-\epsilon_n/k_b T) . \quad (4)$$

Это среднее значение равнялось

$$\langle \varepsilon_n \rangle = hv / [\exp(hv/k_b T) - 1]. \quad (5)$$

По Планку, спектральная плотность излучения $u(\nu, T)d\nu$ в диапазоне частот $d\nu$ принималась пропорциональной $\langle \varepsilon_n \rangle$ и числу стоячих волн N_ν . В таком случае произведение $\langle \varepsilon_n \rangle N_\nu$ приводит к его закону излучения:

$$u(\nu, T) = (8\pi h\nu^2/c^3) / [\exp(hv/k_b T) - 1] \text{ (Вт/м}^3\text{)} \quad (6)$$

Хотя эта формула прекрасно описывала экспериментальные результаты, сам по себе этот вывод был основан на ряде достаточно произвольных допущений. Дело не только в том, что положенная в ее основу гипотеза Планка входила в явное противоречие с представлениями классической физики о непрерывности энергетического спектра. Далее, Планк полагал энергию кванта излучения $\varepsilon_\nu = h\nu$ пропорциональной частоте ν в первой степени и не зависящей от амплитуды волны A_ν . Оба этих предположения противоречили известному из акустики, гидродинамики и электродинамики выражению для плотности энергии плоской бегущей волны [2]

$$E_\nu = \rho_\nu A_\nu^2 \nu^2 / 2, \text{ Дж/м}^3, \quad (7)$$

согласно которому она пропорциональна квадрату амплитуды волны A_ν [м] и ее частоты ν , а также спектральной плотности ρ_ν (числу осцилляторов в единице объема, колеблющихся на частоте ν).

В-третьих, согласно постулату Планка, энергия кванта излучения становится неограниченно большой по мере увеличения частоты. Это делало его энергию во многих случаях избыточной. Действительно, когда энергия фотона превышает энергию возбуждения атома, он просто не может быть поглощен. Такое замечание было сделано еще А.Эйнштейном, который обратил внимание на то, что отношение энергии фотона ε_ν к средней энергии резонатора для длины волны 0,5 мкм ($T = 1700$ К) составляет огромную величину $\approx 6,5 \cdot 10^7$, которая едва ли соответствует его возможностям [3].

Еще одним произвольным допущением М.Планка было предположение, что число испущенных полостью квантов равно числу стоячих волн в ней [4]. Это допущение никак не согласуется с последующим представлением о фотоне как пакете волн: становится совершенно непонятным, каким образом за один период колебаний стоячей волны последняя излучает целый цуг волн? Подобных вопросов к М. Планку возникает, вообще говоря, множество [4]. В течение XX столетия исследователи обнаружили целый клубок противоречий и в самом методе Планка. Да и сам М.Планк до конца жизни считал задачу о квантах нерешенной. Поэтому то обоснование закона излучения, которое дал М. Планк, относится к тем «нередким в истории науки случаям, когда из явно ложных предпосылок получаются следствия, количественно подтверждаемые фактами» [5]. Это побуждает к поиску иного обоснования закона излучения Планка, не нуждающегося в специфических квантовомеханических постулатах. Здесь мы изложим концепцию, обоснованную и развитую в единой теории процессов переноса и преобразования любых форм энергии, названной для краткости энергодинамикой [6].

2. Новый взгляд на процесс излучения. Согласно закону сохранения энергии, полная энергия атома остается неизменной, если движение электронов и любых других частиц в нем происходит только под действием внутренних (центральных) сил [7]. Следовательно, об излучении телом энергии можно говорить только в том случае, когда на его атомы действуют сторонние (нецентральные) силы \mathbf{F} , исходящие от окружающего его поля излучений (эфира). Силовой характер их взаимодействия показан в [8]. При таком под-

ходе становится ясным, что если сила \mathbf{F} , исходящая из этого поля, направлена в сторону движущейся со скоростью \mathbf{v} частицы (т.е. $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} > 0$), то возникает ее ускорение, которое заканчивается, когда $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = 0$. Если же $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} < 0$, частицы испытывают кратковременное торможение, длительность которого определяется полупериодом их встречного орбитального движения [6]. Этот процесс подчиняется всем законам классической механики. При этом возникает кратковременное возмущение внешнего поля излучения и в виде волн «возвышения», следующих друг за другом через промежуток времени в полупериод. Такого рода «уединенные» волны получили название «солитонов». Они отличаются частицеподобными свойствами, которые проявляются в сохранении их формы при взаимодействии, подобно столкновению бильiardных шаров. На начальной стадии изучения солитонов считалось, что структурная устойчивость солитонов обусловлена явлением дисперсии (зависимости скорости распространения волны от ее амплитуды), благодаря которой «расползание» волны вследствие диссипации ее энергии компенсируется увеличением крутизны ее фронта. Однако в поле излучений, в котором отсутствует как дисперсия, так и рассеяние энергии, структурная устойчивость ее волн является его «врожденным» свойством [9]. Поэтому понятие солитона применимо к волнам как электромагнитной, так и неэлектромагнитной природы.

В результате взаимодействия тел с полем излучений последнее модулируется излучаемой волной. Такое представление об излучении позволяет трактовать частоту ν как поток солитонов J_c – количество солитонов, испущенных в единицу времени [10].

Ввиду того, что процесс торможения или ускорения электронов или других частиц кратковременен, сопровождающий его процесс излучения и поглощения атомами энергии волн приобретает дискретный характер. Таким образом, квантовая природа излучения обусловлена самим характером процесса и отнюдь не противоречит классической механике. Однако в этой концепции истинным квантом излучения становится не частица, а волна, дискретная как в пространстве, так и во времени.

Раскроем теперь связь потока солитонов J_c с другими параметрами волнового процесса. В энергодинамике, как и в других дисциплинах, поток носителя любой i -й формы энергии \mathbf{J}_i выражается единым образом как произведение переносимой величины Θ_i (массы k -го вещества M_k , его импульса $M_k \mathbf{v}_k$, заряда Z , энтропии S и т.п.) на скорость её переноса \mathbf{v}_i . Для волновой формы движения величина Θ_i может быть найдена из выражения элементарной работы i -го рода dW_i , которая равна убыли энергии i -го рода E_i и может быть представлена в виде произведения переносимой величины Θ_i на изменение $d\psi_i$ сопряженного с ней потенциала ψ_i [6]. В случае волновой формы энергии ($E_i \equiv E_\nu$; $\mathbf{v}_i = c$) эта работа dW_ν в расчете на единицу объема определяется убылью плотности энергии волны E_ν :

$$dW_\nu = -dE_\nu = -\rho \Theta_\nu d\psi_\nu = -\rho A_\nu v d(A_\nu v), \text{ Дж/м}^3. \quad (8)$$

Отсюда следует, что потенциал бегущей волны $\psi_\nu = A_\nu v$ (м/с) имеет смысл скорости волны, как и ее координата $\Theta_\nu = A_\nu v$, являющаяся аналогом удельного импульса волны. При этом энергия бегущей волны предстает как разновидность кинетической формы движения, что обуславливает силовой характер взаимодействия излучения с веществом и объясняет происхождение давления света.

Как и в термодинамике необратимых процессов [11], в энергодинамике скорость изменения энергии dE_ν/dt (Вт/м³) определяется скалярным произведением удельной движущей (термодинамической) силы $\mathbf{X}_\nu = -\text{grad}\psi_\nu$ (с⁻¹) и плотности $\mathbf{j}_\nu = \rho A_\nu \mathbf{v}_\nu$ потока $\mathbf{J}_\nu = \Theta_\nu \mathbf{v}_\nu$, характеризующего обобщенную скорость рассматриваемого процесса, где \mathbf{v}_ν – скорость переноса носителя данной формы энергии Θ_ν (равная в нашем случае скорости света в вакууме c). В поле излучений \mathbf{j}_ν приобретает смысл плотности потока импульса солитонов, модуль которого j_ν , естественным образом пропорционален потоку солитонов $J_c = \nu$:

$$j_\nu = \rho_\nu A_\nu c v = h_\nu J_c \text{ (Дж/м}^3), \quad (9)$$

где $h_\nu = \rho_\nu A_\nu c$ (Дж с/м³) – подлежащий экспериментальному определению коэффициент пропорциональности, имеющий смысл действия, оказываемого полем излучения на тело единичного объема при единичном потоке солитонов.

Как видим, первой степени частоты ν пропорциональна в действительности не энергия кванта излучения, а поток импульса, измеряемый в тех же единицах. Более того, энергия фотона может даже уменьшаться с ростом частоты, если при этом изменяется амплитуда волны A_ν . Чтобы убедиться в этом, представим амплитуду волны A_ν [м] через ее длину λ [м] некоторым коэффициентом формы волны $k_\nu = A_\nu/\lambda = A_\nu\nu/c$. Тогда

$$A_\nu = k_\nu c/\nu, \quad (10)$$

Отсюда следует, что если форма волны устойчива (что свойственно солитонам), т.е. $k_\nu = \text{const}$, то амплитуда волны A_ν действительно уменьшается с ростом ν . При этом потенциал волны

$$\psi_\nu = A_\nu \nu = k_\nu c^2, \text{ Дж/кг} \quad (11)$$

остаётся неизменным.

Именно это, по-видимому, и предотвращает «ультрафиолетовую катастрофу», вытекающую из закона Релея. В соответствии с (7), это может быть вызвано только уменьшением амплитуды волн A_ν этой частоты и их спектральной плотности ρ_ν , т.е. коэффициента h_ν . Логично предположить, что функция $h_\nu(\nu)$ подчиняется тому же нормальному закону распределения (3), что и N_ν :

$$h_\nu(\nu) = h_\nu(\nu_0) \exp(-h_\nu \nu/k_T T). \quad (12)$$

Здесь для обеспечения безразмерности выражения $h_\nu \nu/k_T T$ постоянная Больцмана k_B заменена константой $k_T = R_\mu/V_\mu$ (Дж/м³К), где R_μ – универсальная газовая постоянная, V_μ – объем одного моля; ν_0 – некоторая частота, принимаемая за исходную.

Учитывая, что число осцилляторов (а, следовательно, и ρ_ν) определяется рядом натуральных чисел $1, 2, \dots, N_0$, и повторяя с учетом этого рассуждения М.Планка, приходим к выводу, что среднестатистическое значение $h = \langle h_\nu \rangle$ и $j_\nu = \langle j_\nu \rangle$ величин $h_\nu(\nu)$ и $j_\nu(\nu)$ определяется аналогичным (4) выражением:

$$j_\nu = h\nu/[\exp(h\nu/k_T T) - 1], \text{ (Дж/м}^3\text{)}. \quad (13)$$

Произведение j_ν на поток солитонов $J_c = \nu$ с точностью до постоянного множителя $8\pi/c^3$ соответствует найденной ранее спектральной плотности излучения (6) и отличается от него лишь тем, что в нем в качестве постоянной Планка h фигурирует среднестатистическое значение переменной h_ν , определяемая экспериментально наряду с величиной множителя $8\pi/c^3$.

3. Обсуждение результатов. Данное здесь обоснование закона излучения Планка открывает возможность новой интерпретации заложенных в нем предпосылок. Прежде всего, становится совершенно ясным, что именно многократное торможение и ускорение частиц вещества внешним полем порождает процесс излучения и поглощения атомом лучистой энергии, а не лишенный длительности «перескок» электрона с одной устойчивой орбиты на другую (как это постулировалось Н.Бором¹). При этом не нарушаются никакие

¹ В противном случае длина фотона могла бы достигать многих тысяч метров, что несовместимо с представлением о нем как о частице.

законы классической механики, что вынудило отказаться в квантовой механике от понятий силы и ускорения.

Далее, при выводе закона излучения (13) мы не прибегали к каким-либо постулатам квантово-механического характера, о которых говорилось выше. Напротив, мы с самого начала показали, что дискретность процесса излучения энергии обусловлена самим характером волнового движения.

Солитонная природа процесса излучения проливает новый свет на проблему дуализма «волна – частица», послужившую одной из причин отказа от классических концепций. Сами специфические свойства солитона как частицеподобной волны объясняют, почему излучение в одних случаях проявляет свойства волны (интерференция, дифракция, поляризация), а в других – свойства частиц (фотоэффект, эффект Комптона).

Предпринятое обоснование закона излучения Планка проливает также новый свет на структуру и физический смысл постоянной Планка, которую де Бройль называл «таинственной» [12]. В действительности она оказывается среднестатистической величиной, которая, судя по ее структуре, остается постоянной и равной измеренной в экспериментах величине лишь для тел, подчиняющихся нормальному распределению (12).

Однако главным результатом предложенной концепции является коренное изменение представлений о кванте излучения. Если по Планку им являлся фотон, то теперь в роли истинного кванта излучения предстает солитон как единичная структурно устойчивая волна, обладающая свойством частицы. Эта ее структурная устойчивость и объясняет отмеченное выше уменьшение амплитуды волны A_v с частотой ν .

Изменяются и представления о величине энергии этого кванта, которая становится меньшей энергии фотона на число солитонов в его волновом пакете. Это снимает многочисленные противоречия, связанные с отмеченной выше избыточностью энергии фотонов сверхвысокой частоты.

Значительно меньшая протяженность солитона в пространстве, чем у фотона, объясняет, каким образом они отдают «импульс» мишени, размер которой на несколько порядков меньше, чем длина пакета волн, именуемого фотоном.

Замена фотона солитоном легко объясняет обнаруженную еще в 1967 году в двухщелевом эксперименте интерференцию фотона с самим собой. В действительности в этом случае интерферируют солитоны одного и того же пакета волн, который фиксируется детектором как испускание одиночного фотона.

Появляется также возможность классического объяснения происхождения спектральных серий [13] и фотоэффекта [14], классического вывода уравнения Шрёдингера [15] и синтеза классической и квантовой механики [16].

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. Крауфорд Ф. Берклеевский курс физики. Т.3: Волны. М.: Мир, 1965. 529 с.
3. Эйнштейн А. О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения. В кн.: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.- М.: Наука, 1966. Т. 3. С. 181-195.
4. Эткин В.А. О законе излучения Планка. // Вестник Дома Ученых Хайфы, 2008.- Т.16, с.12-17
5. Вавилов. С.И. Исаак Ньютон. 2-е изд. М.-Л., 1945.
6. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). С.-П., «Наука», 2008, 409 с.
7. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Механика. Т.1 – Механика. –М.,1973.

8. *Эткин В.А.* О потенциале и движущей силе лучистого энергообмена. // Вестник Дома Ученых Хайфы, 2010.-Т.2, с.2-6.
9. *Эткин В.А.* От фотонов – к солитонам.
<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11812.html>. 19.02.2012.
10. *Эткин В.А.* Классическое обоснование закона излучения Планка.
http://samlib.ru/e/etkin_w_a/klassicheskoeobosnovaniezakonaizlucheniya planki.shtml. 11. 4. 2009.
11. *Хаазе Р.* Термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1967.
12. *Л. де Бройль.* Обзор моих научных работ // *Л. де Бройль.* По тропам науки. — М.: Изд-
13. *Эткин В.А.* Классическое объяснение спектральных серий (<http://sciteclibrary.ru/rus/6079.html> .-16.09.2003).
14. *Эткин В.А.* Классическая интерпретация фотоэффекта.
(<http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5905.html>. - 26.08.2003).
15. *Эткин В.А.* Термодинамический вывод уравнения Шрёдингера.
([http://zhurnal.lib.ru/e/ etkin_w_a/shtml](http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/shtml)).
16. *Эткин В.А.* Об основаниях квантовой механики. / Вестник Дома Ученых Хайфы, 2006.-Т.10, с.19-27.