

УДК 530.145(09)

DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-86-93

В. ВИН И ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНОВ ТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ

Исаев В.И.*Независимый исследователь (г. Москва)*

Аннотация. В работе рассмотрены теоретические исследования по тепловому излучению немецкого физика В. Вина, в результате которых В. Вин в 1893–1896 гг. открыл законы теплового излучения, а в 1895 г. совместно с немецким физиком О. Люммером сконструировал лабораторный источник теплового излучения.

Ключевые слова: теория теплового излучения, Кирхгоф, Гельмгольц, Вин, Планк.

W. WIEN AND HISTORY OF THE DISCOVERY OF THE LAWS OF THERMAL RADIATION

V. Isaev*Independent researcher (Moscow)*

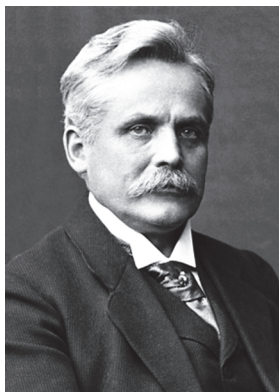
Abstract. We consider theoretical studies of thermal radiation by German physicist W. Wien. As a result of these studies, W. Wien discovered laws of thermal radiation in 1893–1896, and together with German physicist O. Lummer he designed a laboratory source of thermal radiation in 1895.

Keywords: theory of thermal radiation, Kirchhoff, Helmholtz, Wien, Planck.

Настоящая работа является кратким изложением одного из разделов лекционного курса по истории квантовой теории, разрабатываемого автором. Необходимость создания такого курса диктуется тем, что студенты при изучении квантовой теории зачастую испытывают трудности и для облегчения понимания автор предлагает читать студентам одновременно курс истории квантовой теории.

Две работы автора [1; 2] были посвящены описанию основных проблем физики теплового излучения конца XIX века, а также вкладу российских физиков В.А. Михельсона [1] и Б.Б. Голицына [2] в теорию теплового излучения, и, в частности, в решение проблемы определения вида универсальной функции Кирхгофа. После работ Л. Больцмана, В.А. Михельсона и Б.Б. Голицына по тепловому излучению следующим этапом в проблеме определения универсальной функции Кирхгофа стали работы немецкого физика Вильгельма Вина 1893–1896 гг.

Вильгельм Вин родился 13 января 1864 г. в семье фермера Карла Вина и его жены Каролины Герц. В. Вин после окончания гимназии весной 1882 г. поступил в Гёттингенский университет, известный своей математической школой, и про-



В. Вин

слушав там курсы математики и физики в течение одного семестра, осенью 1882 г. продолжил учёбу в Берлинском университете. В Берлинском университете В. Вин учился и проходил лабораторный практикум по физике в 1883-1885 гг. под руководством Г. Гельмгольца. В. Вин окончил в 1886 г. Берлинский университет, защитив диссертацию, тема которой была посвящена экспериментальному исследованию дифракции света и работал с 1890 г. по 1894 г. ассистентом Г. Гельмгольца в Германском физико-техническом институте в Берлине [3].

9 февраля 1893 г. в Берлине Г. Гельмгольд на заседании Академии Наук представил первую работу своего ассистента В. Вина по теории теплового излучения под названием: «Новое о связи между излучением чёрного тела и вторым законом термодинамики», позже эта работа В. Вина была опубликована в Трудах Берлинской Академии наук [4].

В этой работе В. Вин нашел связь между двумя равновесными состояниями излучения абсолютно чёрного тела, характеризующимися двумя значениями температуры. В качестве исходных предпосылок В. Вин принял электродинамику Максвелла, из которой следует известная связь между давлением света $p(T)$ и плотностью электромагнитного излучения $u(T)$, а именно $p(T) = u(T)$, также предполагается существование абсолютно чёрных тел и идеально отражающих тел, из которых конструируется цилиндр, имеющий два подвижных поршня, снабжённых клапанами. В. Вин рассмотрел идеальный тепловой процесс, при котором увеличение плотности теплового излучения достигается либо за счёт повышения температуры, либо за счёт уменьшения объёма. Рассматривая изменение распределения энергии при мысленном эксперименте с движением поршней в цилиндре, В. Вин приходит к соотношению, получившему впоследствии название закона смещения Вина, а именно: «в нормальном спектре испускания чёрного тела при изменении температуры каждая длина волны смещается таким образом, что произведение температуры на длину волны остается постоянным» [4]:

$$\lambda_0 T_0 = \lambda_{\max} T = \text{const.} \quad (1)$$

В. Вин отмечал: «На основании этого закона смещения легко вычислить распределение по длинам волн интенсивности теплового излучения, если это распределение известно для какой-нибудь одной температуры. Законом смещения исчерпываются все выводы, которые могут быть сделаны для теории излучения из чистой термодинамики. Все эти выводы были подтверждены опытом» [5].

В.А. Михельсон дал такую эквивалентную формулировку закона смещения В. Вина: «При изменении температуры лучеиспускающей оболочки, заключающей в себе вполне нестройную радиацию, спектральный состав этой радиации изменяется так, как будто бы длина волны каждой отдельной монохроматической радиации изменялась обратно пропорционально абсолютной температуре.

Это есть так называемый «закон смещения» В. Вина. Он, как и закон Стефана, относится только к радиации вполне нестройной, т.е. к лучеиспусканию идеального-чёрного тела» [6].

М. Лауэ так оценил значение этого закона: «Закон смещения Вина – великое открытие, недостаточно оценённое в современных учебниках, – даёт возможность вычислить распределение энергии при любой температуре, если оно известно при данной температуре. Но даже без этого знания закон даёт объяснение, почему с возрастанием температуры максимум интенсивности в спектре всё больше и больше смещается к коротким волнам; почему, таким образом, тепловое излучение при более низких температурах остается невидимым, а при температурах около 6000° максимум интенсивности становится видимым; если известно его положение, то возможно вычислить температуру источника излучения, например Солнца» [7].

Во второй статье, опубликованной в 1894 г. под названием «Температура и энтропия излучения» [8], В. Вин рассмотрел отдельные монохроматические составляющие компоненты теплового излучения и ввёл для них понятия плотности энтропии и температуры, различные для разных монохроматических составляющих. Плотность энтропии всего излучения определялась как сумма от плотностей энтропии всех монохроматических составляющих и она достигала максимума для равновесного теплового излучения, при этом в состоянии равновесия температура монохроматических компонент излучения была одинакова.

В работе [8] В. Вин дал второе доказательство закона смещения, устранив недостатки первого доказательства этого закона, допущенные в работе 1893 г. В этой работе В. Вин рассмотрел адиабатическое радиальное движение излучения внутри идеально отражающей сферы. При этом излучение уже было направленным, оно радиально распространялось от центра к границе сферы, претерпевало отражения и вновь сходилось в центре и т.д., при этом механизм перемешивания монохроматических компонент оставался тем же, что и в первой работе, т.е. доплеровским. В этой статье В. Вин показал, что спектральная плотность излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ должна иметь следующий вид

$$\varepsilon(\lambda, T) = T^5 \Phi(\lambda T) = \Phi(\lambda T) \text{const} / \lambda^5, \quad (2)$$

где $\Phi(\lambda T)$ – некоторая неизвестная функция произведения температуры и длины волны излучения, или если учесть известную связь между частотой ν и длиной волны λ для электромагнитных волн: $\nu = c/\lambda$, $d\nu/d\lambda = -c/\lambda^2$, то формула (2) может быть записана в эквивалентном виде

$$\varepsilon(\nu, T) = T^3 \Psi(T/\nu) = \nu^3 \Psi(T/\nu) \text{const}, \quad (3)$$

что было отмечено в 1902 г. в обзорной работе В.А. Михельсона [9]. Формулы (2) или (3) представляют собой значительный шаг вперёд в проблеме нахождения вида универсальной функции Кирхгофа, поскольку являются дифференциальными критериями для спектральной плотности теплового излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ и оставляют неизвестным вид только одной функции $\Phi(\lambda T)$ (или $\Psi(T/\nu)$) в выражении для спектральной плотности теплового излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ (или соответственно $\varepsilon(\nu, T)$).

М. Лауэ отмечал: «Закон смещения, выражаясь математически, представляет сведение некоторой функции $\epsilon(\nu, T)$ двух независимых переменных ν и T к функции $\Psi(T/\nu)$ одной переменной. Непосредственно отсюда видно, что как для больших, так и для малых значений аргумента эта функция должна быть исчезающе малой и что она обладает лишь одним максимумом» [10].

Трудности, которые должны были преодолеть физики-экспериментаторы второй половины XIX века были огромными, т.к. в течение 1860–1895 гг. не существовало ни лабораторных моделей абсолютно чёрных тел, ни достаточно чувствительных спектрометров, позволявших провести достаточно точные спектральные измерения потоков энергии. В 1880 г. американский астрофизик Сэмюэл Ленгли сконструировал спектроболометр – прибор, благодаря которому им были получены первые экспериментальные данные по спектральному распределению энергии в спектре раскалённой угольной сажи и Солнца, которые были использованы в 1888 г. В.А. Михельсоном для проверки предложенной им спектральной формулы. Впервые изотермическая полость как источник теплового излучения для создания лабораторной модели абсолютно чёрного тела была использована в 1895 г. О. Люммером и В. Винном [11] в Германском физико-техническом институте, при этом спектроболометр Ленгли использовался как регистрирующий прибор.

В 1896 г. в немецком физическом журнале «Annalen der Physik» В. Вин опубликовал свою третью теоретическую статью «О распределении энергии в спектре испускания чёрных тел» [12], которая явилась вершиной его исследований теплового излучения. В этой статье В. Вин сформулировал закон для спектральной плотности энергии теплового излучения, получивший впоследствии название закона излучения В. Вина.

Отметим, что по структуре физических гипотез и полученных математических соотношений эта статья представляет собой по существу исправленный и дополненный учёт принципа Доплера критический пересмотр главных идей статьи В.А. Михельсона 1887 г. [13], с учётом ранее полученного закона смещения (1) и дифференциального критерия для спектральной плотности (2). Отмечая ошибочность предшествующих попыток отыскания функции Кирхгофа вследствие принятия неверных гипотез о природе излучения, В. Вин отметил [12], что единственной «счастливой идеей» в данной проблеме была работа В.А. Михельсона. [13], в которой В.А. Михельсон применил статистический метод распределения Максвелла для расчета спектральной плотности излучения к гипотетической модели атомных колебаний твёрдого тела.

В. Вин предположил, что равновесное излучение, заключённое в замкнутую полость с идеально отражающими внутренними стенками, можно представлять в виде некоторого молекулярного газа, к этому газу естественно применимо распределение Максвелла по скоростям молекул.

При этом В. Вин предполагает, что между скоростью ν и периодом колебаний τ выполняется соотношение $\tau = \frac{4r}{\nu^2}$, которое следует из закона смещения (1) и максвелловской пропорциональности в законе распределения скоростей газа $Kt \approx mv^2$.

В обзорной статье по теории теплового излучения в 1902 г. В.А. Михельсон отметил: «Первая попытка выяснить форму этой функции Кирхгофа на основании свойств нестройных колебаний была сделана мною в 1887 году [13]. Исходя из закона Максвелла о наивероятнейшем распределении скоростей между частицами и пользуясь подстановкою $v = \frac{c}{\tau}$, где τ – период колебания, я получил

некоторое общее соотношение между периодами и соответственной энергией, дававшее возможность в известных частных предположениях и принимая во внимание закон Стефана, – определить функцию, удовлетворявшую всем требованиям, которые мы тогда могли предъявить к функции Кирхгофа $\varepsilon(\lambda, T)$.

Впоследствии в 1896 г. В. Вин [12] несколько видоизменил мой вывод, заменяя подстановку $v = \frac{c}{\tau}$ следующей $v^2 = \frac{c}{\tau}$. Другими словами: между тем как я

полагал число колебаний в секунду для кадой радиации $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ пропорциональным скорости движения испускающих её атомов, В. Вин полагает число колебаний пропорциональным квадрату скорости» [9].

Далее Михельсон отмечает: «Считая недозволительным применять закон Квелла к атомам твёрдого тела, В. Вин представляет себе в качестве лучеиспускающего тела некоторый «идеальный» газ. Затем радиация испускаемая таким газом, делается вполне чёрной тем, что его заключают в замкнутую вполне зеркальную оболочку. Для того, чтобы найти состав этой чёрной радиации, В. Вин допускает, что плотность энергии $\varepsilon(\lambda, T)d\lambda$ для волн, заключающихся между λ и $\lambda + d\lambda$ пропорциональна:

1) числу (Максвелла) молекул, испускающих радиацию такого периода, т.е. величине $v^2 \exp\left(-\frac{v^2}{\alpha^2}\right)dv$, в которой согласно уравнению $v^2 = \frac{c}{\tau}$, v^2 следует заменить величиной $\frac{k}{\lambda}$; α^2 как пропорциональную средней живой силе (т.е. кинетической энергии) молекул положить равной,

2) некоторой пока неизвестной функции скорости v , а стало быть и длины волны λ . Эту функцию, в которую В. Вин включает и множитель $\lambda^{3,5}$, получающийся при замене dv через $d\lambda$, обозначим через $f(\lambda)$. Таким образом В. Вин находит

$$\varepsilon(\lambda, T)d\lambda = f(\lambda) \exp\left(-\frac{c}{T\lambda}\right)d\lambda \quad (4)$$

Вид функции $f(\lambda)$ он определяет из условия, что полная энергия должна удовлетворять закону Стефана-Больцмана $\int_0^{\infty} f(\lambda) \exp\left(-\frac{c}{T\lambda}\right)d\lambda = \text{const } T^4$.

Пользуясь способом неопределённых коэффициентов, он разлагает $f(\lambda)$ в ряд, интегрирует и находит $f(\lambda) = \frac{\text{const}}{\lambda^5}$. Следовательно, по В. Вину закон распределения энергии имеет вид

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{C}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c}{T\lambda}\right). \quad (5)$$

Таким образом, в 1896 г. В. Вин в своей работе [12], уточнив гипотезы, высказанные в статье [13] В.А. Михельсоном и используя принцип Доплера, получил асимптотическое выражение для универсальной функции Кирхгофа $\varepsilon(\lambda, T)$, применимое для коротких ультрафиолетовых волн и имеющее в современных обозначениях вид

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right), \quad (6)$$

и названное впоследствии законом теплового излучения В. Вина.

За исследования и открытие законов теплового излучения В. Вину была присуждена Нобелевская премия 1911 г. [3; 5]. В. Вин в своей Нобелевской лекции в 1911 г. так оценивал свою работу 1896 г.: «Как бы ни была несовершенна эта первая попытка, она всё-таки дала формулу, которая только для больших длин волн значительно отличается от истинной. Но так как наблюдения с несомненностью установили эти отклонения, то не подлежало никакому сомнению, что формула должна быть изменена» [5].

Фактически в неявном виде в статье В. Вина 1896 г. [12] введено предположение о частицах (фотонах), из которых состоит электромагнитное излучение, как было отмечено Ф.Хундом, «впервые возникла мысль, что излучение связано с частицами, энергия которых пропорциональна частоте – это еще не были в полной мере будущие кванты света Эйнштейна, но они были близки к ним» [14].

Для В. Вина лабораторная реализация модели излучающего абсолютно чёрного тела в 1895 г. совместно с О. Люммером [14] – это одна из основных предпосылок успеха в открытии закона излучения (6), поскольку после успешной экспериментальной реализации такой модели у В. Вина появилась возможность достаточно точной численной проверки предложенной им формулы (6) для универсальной функции Кирхгофа $\varepsilon(\lambda, T)$, у В.А. Михельсона же в 1887 г. не было такой возможности, он использовал для численной проверки предложенных им формул только неточные данные первых спектральных измерений, произведенных С.Ленгли в 1886 г.

Значение работ В. Вина для теории теплового излучения очень ёмко оценил М. Лауэ: «И бессмертной заслугой Вильгельма Вина остается то, что он довёл физику непосредственно до ворот квантовой физики, а уже следующий шаг, который предпринял Планк, провёл её через эти ворота» [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаев В.И. История поисков и открытия универсальной функции Кирхгофа и вклад В.А. Михельсона и Б.Б. Голицына в теорию теплового излучения. Часть 1 // Физическая мысль России. 2004. № 1. С. 79–98.
2. Исаев В.И. История поисков и открытия универсальной функции Кирхгофа и вклад В.А. Михельсона и Б.Б. Голицына в теорию теплового излучения. Часть 2 // Физическая мысль России. 2005. № 1. С. 39–57.
3. Вин В. / Биографический словарь деятелей естествознания и техники, Т. 1. М.: Госиздат, «БСЭ», 1958.
4. Wien W., *Über eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Warmtheorie* // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin*. 1893, bd. 19, s. 55–62.
5. Вин В. О законах теплового излучения (Нобелевская речь 1911 г.) // «Новые идеи в физике»: сборник. 1914. № 6. С. 104–122.
6. Михельсон В.А., *Очерки по спектральному анализу* // *Физическое обозрение*. 1901. Т. 2. С. 165–183, 231–245, 273–284.
7. Лауэ М. *История физики*. М.: Государственное издательство теоретико-технической литературы, 1956. С. 145–151, 164–200.
8. Wien W., *Temperature und Entropie der Strahlung* // *Annalen der Physik*, 1894, bd. 52, s. 132–165.
9. Михельсон В.А. Обзор новейших исследований по термодинамике лучистой энергии // *Журнал русского физико-химического общества, часть физики*. 1902. Т. 34. Вып. 5. С. 155–207.
10. Лауэ М. *Статьи и речи*. М., Наука, 1966. С. 103–118.
11. Lummer O., Wien W., *Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Körper* // *Annalen der Physik*, 1895, bd. 56, s. 451–456.
12. Wien W., *Über die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers* // *Annalen der Physik*, 1896, bd. 58, s. 662–669.
13. Михельсон В.А. Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела // *Журнал русского физико-химического общества, часть физики*. 1887. Т. 19. Вып. 4. С. 79–99.
14. Хунд Ф. *История квантовой теории*. Киев: Наукова думка, 1980.

REFERENCES

1. Isaev V.I. *Istoriya poiskov i otkrytiya universal'noi funktsii Kirkhgofa i vklad V.A. Mikhel'sona i B.B. Golitsyna v teoriyu teplovogo izlucheniya. Chast' 1* [The history of research and discovery of the universal Kirchhoff function and the contribution of V.A. Michelson, and B.B. Golitsyn to the theory of thermal radiation. Part 1] // *Fizicheskaya mysl' Rossii* [Russian Physical thought]. 2004. no. 1. pp. 79–98.
2. Isaev V.I. *Istoriya poiskov i otkrytiya universal'noi funktsii Kirkhgofa i vklad V.A. Mikhel'sona i B.B. Golitsyna v teoriyu teplovogo izlucheniya. Chast' 2* [The history of research and discovery of the universal Kirchhoff function and the contribution of V.A. Michelson, and B.B. Golitsyn to the theory of thermal radiation. Part 2] // *Fizicheskaya mysl' Rossii* [Russian Physical thought]. 2005. no. 1. pp. 39–57.
3. Wien W. / *Biograficheski slovar' deyatelei estestvoznaniya i tekhniki, T. 1* [Wien W. / Biographical dictionary figures of science and technology, vol. 1]. M., Gosizdat, «BSE», 1958.
4. Wien W., *Über eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Warmtheorie* // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin*. 1893, bd. 19, s. 55–62.

5. Wien W. O zakonakh teplovogo izlucheniya (Nobelevskaya rech' 1911 g.) [On the laws of thermal radiation (Nobel prize acceptance speech, 1911)] // «Novye idei v fizike»: sbornik [New ideas in Physics: collection]. 1914. no. 6. pp. 104–122.
6. Mikhel'son V.A. Ocherki po spektral'nomu analizu [Essays on spectral analysis] // Fizicheskoe obozrenie. T. 2. [The physical review. Vol. 2]. 1901. pp. 165–183, 231–245, 273–284.
7. Von Laue M. History of Physics. New York: Academic Press, 1950.
8. Wien W., Temperatur und Entropie der Strahlung // Annalen der Physik., 1894, bd. 52, s. 132–165.
9. Mikhel'son V.A. Obzor noveishikh issledovaniy po termodinamike luchistoi energii [A review of the recent research on the thermodynamics of radiant energy] // Zhurnal russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva, chast' fiziki [The journal of Russian physico-chemical society, of physics]. 1902. Vol. 34. no. 5. pp. 155–207.
10. Laue M. Stat'i i rechi [Articles and speeches]. M., Nauka, 1966. pp. 103–118
11. Lummer O., Wien W., Methode zur Prufung def Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Korper // Annalen der Physik, 1895, bd. 56, s. 451–456.
12. Wien W., Uber die Energievertheibung im Emissionsspectrum eines schwarzen Korpers // Annalen der Physik, 1896, bd. 58, s. 662–669.
13. Mikhel'son V.A. Opyt teoreticheskogo ob'yasneniya raspredeleniya energii v spektre tverdogo tel [The experience of theoretical explanations of the distribution of energy in the spectrum of solids] // Zhurnal russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva, chast' fiziki [The journal of Russian physico-chemical society, of physics]. 1887. Vol. 19. no. 4. pp. 79–99.
14. Hund F. The History of Quantum Theory. London: Harrap, 1974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Исаев Вячеслав Игоревич – кандидат физико-математических наук, независимый исследователь (г. Москва);
e-mail: vis961@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vyacheslav Isaev – candidate of physical and mathematical sciences, independent researcher (Moscow);
e-mail: vis961@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Исаев В.И. В. Вин и история открытия законов теплового излучения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 4. С. 86–93.
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-86-93.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

V. Isaev. W. Wien and history of the discovery of the laws of thermal radiation // Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics. 2016. no. 4. pp. 86–93.
DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-86-93.