

УДК 530.145 (09)

## ПОИСК ФОРМУЛЫ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА В. А. МИХЕЛЬСОНОМ. ЧАСТЬ 2

***В. И. Исаев***

*Независимый исследователь, г. Москва, Российская Федерация  
e-mail: vis961@yandex.ru*

## SEARCH BY W. MICHELSON FOR THE FORMULA FOR THE SPECTRAL DISTRIBUTION OF THE BLACKBODY RADIATION ENERGY. PART 2

***V. Isaev***

*Independent researcher, Moscow, Russian Federation  
e-mail: vis961@yandex.ru*

Настоящая работа является кратким изложением одного из разделов лекционного курса по истории квантовой теории, разрабатываемого автором. Актуальность темы определяется теми приложениями, которые квантовая механика получила за последнее десятилетие – необходимостью создания квантовых компьютеров и развития систем квантовой связи, основанных на явлении квантового перепутывания связанных состояний. Без глубокого знания квантовой теории создание квантовых компьютеров и систем квантовой связи невозможно. Необходимость создания такого курса диктуется тем, что студенты при изучении квантовой теории зачастую испытывают трудности и для более глубокого понимания квантовой механики автор предлагает читать студентам одновременно курс истории квантовой теории. Дополнительным аргументом для создания такого курса также является то, что многие тонкие вопросы интерпретации квантовой механики невозможно понять, не обладая знаниями хотя бы элементарного курса истории квантовой теории.

В этой работе рассмотрена история поисков В. А. Михельсоном формулы спектрального распределения энергии теплового излучения абсолютно чёрного тела. Эта работа явилась первым и очень важным эпизодом в предыстории открытия

универсальной функции Кирхгофа. Открытие функции теплового излучения М. Планком в декабре 1900 г. привело к постепенному развитию квантовой теории и установлению квантовой механики в 1925–1926 гг. и фактически явилось началом новой физической эпохи – эпохи квантовой физики.

## Часть 2. ПОИСК УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ КИРХГОФА В. А. МИХЕЛЬСОНОМ

Статья В. А. Михельсона под названием «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела» [1], законченная в марте 1887 г., была напечатана в четвёртом выпуске физической части журнала русского физико-химического общества. Текст статьи был переведён и опубликован в том же 1887 г. во французском журнале *Journal de physique* [2], а в 1888 г. в английском журнале *Philosophical Magazine* [3]. Статья состоит из вводной части, шести параграфов и постскрипума. Разберём кратко эти части, выделяя наиболее существенные с точки зрения дальнейшего развития теории теплового излучения предположения и выводы.



С. Ленгли

Во введении Михельсон указывает, что статья написана в связи с появившимися в 1886 г. исследованиями американского астрофизика Сэмюэля Ленгли (1834–1906) [4–6], в которых были приведены некоторые экспериментальные результаты измерений спектров светящихся тел, в частности угольной сажи, полученные с помощью сконструированного С. Ленгли спектроболометра.

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления металлов вследствие поглощения тепловых лучей и нагрева, что вызывает увеличение электрического сопротивления, которое может быть достаточно точно измерено. Болометр представлял собой тонкую зачернённую платиновую полосу, укреплённую на рамке и подключённую к мостику Уитстона. Лучи, попадая на полосу, поглощаются полоской и нагревают её, вследствие чего сопротивление полоски увеличивается и может быть измерено.

Выделяя лучи определённой длины волны (цвета) с помощью прозрачной призмы из каменной соли или плавикового шпата и перемещая болометр вдоль спектра, можно измерить испускаемое излучаемым телом спектральное распределение энергии. При этом первичный полученный спектр, на оси абсцисс которого отложены величины, пропорциональные углам отклонения лучей призмой, а на оси ординат отложена энергия измеряемого участка спектра, называется призматическим спектром, а преобразованный спектр, в котором на оси абсцисс отложены длины волн поглощённых лучей, называется нормальным спектром. Для преобразования призматического спектра в

нормальный должен быть известен закон дисперсии световых лучей в веществе, из которого состоит преломляющая призма.

Экспериментальные кривые распределения энергии в спектре излучения угольной сажи, полученные С. Ленгли [4–6] изображены на рис. 1. Как отмечал позднее Михельсон: «ординаты кривых изображают величину спектральной энергии различных периодов (цветов), а абсциссы – величины, пропорциональные показателям преломления каменной соли для каждого периода. Хотя эти кривые и относятся к угольной саже, а не к идеально-чёрному телу, хотя они изображают распределение энергии в спектрах призматических, а не в нормальных, тем не менее по ним, ... можно составить общее представление о ходе лучеиспускания чёрного тела ...» [7]. Целью работы, по словам Михельсона было «во-первых – вообще указать на возможность применения теории вероятностей к молекулярной оптике, и во-вторых – обнаружить, что на началах этой теории мы можем, даже при самых простых и общих предположениях о движении атомов, получить результаты, довольно подробно характеризующие явление с качественной его стороны» [1]. Следует отметить, что Михельсон реально оценивал сложность задачи теоретического определения универсальной функции Кирхгофа  $\varepsilon(\lambda, T)$  и прямо во введении отметил, что «в количественном же отношении большая часть предлагаемых результатов должна быть **рассматриваема** лишь как первое, грубое приближение к действительности», которое «по более точной экспериментальной проверке, вероятно потребует некоторых изменений» [1].

Первая часть статьи Михельсона [1] называется «Предположения и вывод общего закона». В этой части Михельсон вводит и рассматривает некоторые предположения о физической природе спектра излучения твёрдых тел.

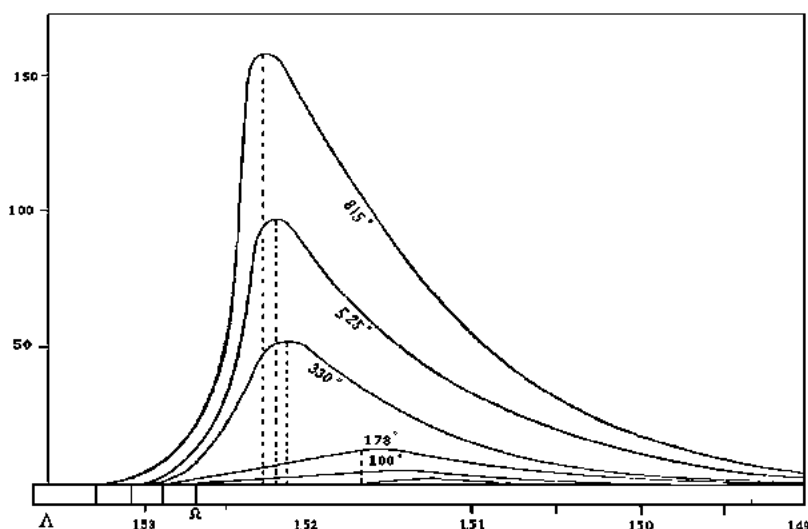


Рис. 1 / Fig. 1. Распределение энергии  $\varepsilon(\lambda, T)$  в призматическом спектре теплового излучения, испускаемого угольной сажей / Energy distribution  $\varepsilon(\lambda, T)$  in the prismatic spectrum of thermal radiation emitted by carbon soot

Задача теоретического определения универсальной функции Кирхгофа, за решение которой взялся Михельсон, была одной из самых загадочных и сложных проблем теоретической физики того времени. Михельсон решился исследовать спектр теплового излучения твёрдого тела, не зная точно природы теплового излучения, а делая лишь некоторые более или менее правдоподобные предположения относительно природы этого излучения, для чего, помимо физической интуиции, была необходима и немалая научная смелость. Анализируя эту проблему, Михельсон пришёл к выводу, что необходимо рассматривать различные рабочие гипотезы, т. е. вводить некоторые физические предположения относительно природы теплового излучения.

Какие гипотезы предложил Михельсон?

Предположение первое: спектр теплового излучения твёрдого тела определяется «комплексом эфирных волн» и одинаков для всех твёрдых тел, «все подобные тела должны иметь одинаковый непрерывный спектр» [1]. Предположение об универсальности спектра теплового излучения впервые было доказано Кирхгофом, и оно безусловно верное. Предположение о том, что «комплекс эфирных волн» порождает спектр излучения твёрдого тела также имеет место, если подразумевать под «эфирными волнами» электромагнитные волны.

Предположение второе: атомы твёрдого тела колеблются внутри некоторой бесконечно малой сферы, совершая беспорядочные упругие удары, подобно бильярдным шарам, заключённым в некоторую сферическую полость с упругими стенками. При этих ударах все направления скоростей равновероятны и атомы достаточно быстро обмениваются скоростями между собой, вследствие чего, как было показано Больцманом [8], равновесие устанавливается достаточно быстро, представляя собой «наивероятнейшее состояние тела» [1], которое может быть охарактеризовано распределением скоростей Максвелла.

Если отвлечься от гипотетичности предложенной модели атомных колебательных движений, то следует отметить, что это основное предположение позволило Михельсону связать задачу об определении спектра теплового излучения со статистикой идеальных газов, разработанной ранее Максвеллом и Больцманом.

Для того, чтобы оценить научную смелость Михельсона, следует вспомнить, что распределение Максвелла было открыто в 1860 г., а в 1887 г. в момент опубликования статьи Михельсона, не была даже твёрдо установлена молекулярно-атомная природа тел. Достаточно вспомнить бурные дискуссии, которые вёл Л. Больцман с немецким химиком и философом В. Оствальдом (1853–1932) и его последователями по поводу молекулярно-атомной природы тел вплоть до начала XX века [9].

Для определения спектра теплового излучения Михельсону было необходимо определить связь между скоростью теплового движения атома и

числом колебаний в единицу времени или периодом колебаний в предложенной им модели атомных колебательных движений. Для этого Михельсон рассмотрел возможные траектории движения атома внутри упругой сферической оболочки и после ряда вычислений, он получил следующее основное соотношение

$$\tau = \frac{4r}{v}, \quad (1)$$

между «периодом эфирных волн, испускаемых телом  $\tau$ » [1] и «скоростью тепловых движений атома  $V$ », где  $r$  – радиус рассматриваемой бесконечно малой сферической оболочки» [1].

В предположении выполнения соотношения (1) находится самое уязвимое место работы Михельсона, и в силу произвольности предложенной модели атомных колебательных движений необходимо было провести тщательный дополнительный анализ правдоподобия принятой модели, однако по-видимому тогда это было невозможно, и в результате принятое им соотношение (1) привело Михельсона в итоге к неверному закону для  $\varepsilon(\lambda, T)$ .

Далее Михельсон пишет: «число атомов в единице объёма, имеющих скорости между пределами  $v$  и  $v + dv$  вычисляется по закону Максвелла

$$\nu_v = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} (km)^{3/2} \exp(-kmv^2) v^2 dv, \quad (2)$$

где  $m$  – масса атома,  $N$  – число атомов в единице объёма,  $k = \frac{3}{2mv^2}$  коэффициент, обратно пропорциональный средней кинетической энергии атома» [1].

Используя связь (1) Михельсон определил «число атомов в единице объёма, период колебания которых заключается между пределами  $\tau$  и  $\tau + d\tau$ »

$$\nu_\tau = \frac{256Nr^3}{\sqrt{\pi}} (km)^{3/2} \exp\left(-\frac{16kmr^2}{\tau^2}\right) \frac{d\tau}{\tau^4}. \quad (3)$$

Далее Михельсон отметил, что закон (3) наивероятнейшего распределения периодов колебаний справедлив и в случае, если считать, что «все атомы тела совершают простые гармонические колебания постоянной амплитуды, но непрерывно меняющихся периодов и направлений» [1].

Отсюда уже, как видим, один шаг до моделирования теплового излучения набором элементарных хаотически движущихся электромагнитных осцилляторов, что было предложено позже Планком.

Далее Михельсон прямо переходит от рассмотрения тепловых колебаний атомов в твёрдых телах к «колебаниям эфира», т. е. к тепловому излучению, предполагая, что

1) «период эфирных волн, каковы бы они ни были, обуславливается периодом колебания атомов их производящих;

2) интенсивность ... волн некоторого периода  $\tau$  ... можно предположить пропорциональной, во-первых, числу атомов  $V_\tau$  в единице объёма тела, дающих волны этого периода, и во-вторых – некоторой функции живой силы

(т. е. кинетической энергии) этих атомов  $\phi\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \psi\left(\frac{1}{\tau^2}\right)$ », точный вид

которой неизвестен и «форму этой функции можно было бы вывести, лишь зная точные свойства эфира и законы взаимодействия между атомами весомой материи и окружающим эфиром. Это взаимодействие проявляется в некоторых аналогичных трению силах, заставляющих часть энергии колебания атомов превращаться в энергию колебания эфира. Поэтому естественно, что наша теория – и вообще одно только исчисление вероятностей – не может дать ничего для определения вида этой функции», при этом в сноске Михельсон отмечает, что «мыслимо теоретическое исследование этой функции на началах электромагнитной теории света» [1] – замечательное предвидение направления последующих исследований Вина и Планка.

Далее Михельсон отметил, что «непосредственно очевидно лишь то, что эта функция отчасти обусловит собою закон лучеиспускания, т. е. зависимость интенсивности лучей от температуры тела ..., специализируя эту функцию в том или другом направлении, нам можно будет удовлетворить любому закону лучеиспускания, например закону Стефана или всякому другому, физически возможному» [1]. Затем отметив, что  $1/\tau$  – очень большое число «от  $10^{13}$  до  $10^{15}$  для крайних пределов спектра указываемых Лэнгли», вследствие чего функция  $\psi\left(\frac{1}{\tau^2}\right)$  может быть разложена в ряд с удержанием только первого члена разложения, Михельсон получил выражение для излучательной способности абсолютно чёрного тела в виде:

$$\varepsilon(\tau, T) = A V_\tau \psi\left(\frac{1}{\tau^2}\right) = A V_\tau f(T) \tau^{-2p}, \quad (4)$$

где  $A, p$  – const, и дополнительно предположено, что неизвестная функция  $f(T)$  «зависит не от энергии колебания каждого из остальных атомов в отдельности,

но лишь от средней величины этой энергии для всех атомов, т. е. от абсолютной температуры тела  $T$ » [1].

Заменив затем  $\nu_\tau$  ранее полученной формулой (3), Михельсон получает следующее общее выражение для излучательной способности  $\varepsilon(\tau, T)$  в зависимости от периода  $\tau$

$$\varepsilon(\tau, T) = BT^{-3/2} f(T) \exp\left(-\frac{c_1}{T\tau^2}\right) \tau^{-(2P+4)}, \quad (5)$$

где  $B, c_1 - \text{const}$  [1]. Переходя затем к излучательной способности  $\varepsilon(\lambda, T)$  как функции длины волны и температуры и используя связь  $\lambda = c\tau$ , где  $c$  – скорость распространения света, Михельсон получил следующее общее выражение для излучательной способности абсолютно чёрного тела  $\varepsilon(\lambda, T)$

$$\varepsilon(\lambda, T) = BT^{-3/2} f(T) \exp\left(-\frac{c_2}{T\lambda^2}\right) \lambda^{-(2P+4)}, \quad (6)$$

заклучив, что «этой формулой выражается теоретический закон распределения энергии в нормальном непрерывном спектре нашего идеального тела» [1].

Таким образом, используя целый ряд физических предположений, Михельсону в 1887 г., впервые в теории теплового излучения, удалось получить формулу (6), приближённо описывающую вид универсальной функции Кирхгофа, т. е. излучательную способность абсолютно чёрного тела  $\varepsilon(\lambda, T)$ .

Следует отметить, что общий ход рассуждений Михельсона был, конечно же, верный, за исключением неточности в предположении (1), проистекавшей из гипотетичности предложенной модели атомных колебаний, что и было впоследствии в 1896 г. исправлено В. Вином, назвавшим работу Михельсона «счастливой идеей» [10].

Во второй части исследования [1], которая называется «Крайние пределы спектров», исследовано поведение универсальной функции Кирхгофа в пределах длинных и коротких волн. Михельсон отметил, что ось абсцисс является асимптотой для графика  $\varepsilon(\lambda, T)$  для этих пределов, с физической точки зрения он объяснил это тем, что «колебания с периодами, значительно уклоняющимися в ту или другую сторону от некоторого среднего, очень мало вероятны, т. е. встречаются сравнительно редко» [1].

В третьей части исследования [1], называющейся «Максимум интенсивности в спектре и его передвижение с изменением температуры» Михельсон отметил, что из условия  $\partial\varepsilon(\lambda, T)/\partial\lambda = 0$  следует, что

$$\lambda_{\max}^2 T = \text{const}, \quad (7)$$

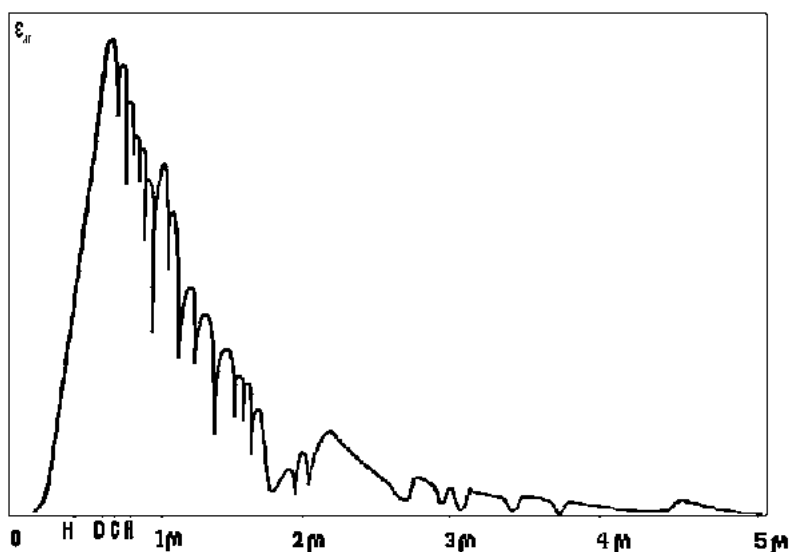


**Рис. 2 / Fig. 2.** Распределение энергии  $\mathcal{E}(\lambda, T)$  в спектре солнечного теплового излучения / Energy distribution  $\mathcal{E}(\lambda, T)$  in the solar thermal radiation spectrum

и «можно заключить, что в нашем спектре для каждой температуры имеется лишь один максимум интенсивности, и что положение этого максимума в спектре зависит от температуры светящегося тела» [1]. Сравнение с имевшимися на тот момент экспериментальными данными С. Ленгли привело Михельсона к выводу что «постоянство  $\lambda_{\max}^2 T$  выполняется довольно близко» [1].

Михельсон отметил, что если полученный закон (1) действительно выполняется, то «окажется возможным по положению места наибольшей яркости в спектре определять температуру светящегося раскаленного тела» [1].

Отметив сходство солнечного спектра излучения, полученного Ленгли (см. рис. 2) со спектрами теплового излучения сажи (см. рис. 1) Михельсон дальше отмечает: «... Допуская, что при очень большой массе и значительной плотности даже газообразное тело имеет такой же характер лучеиспускания, какой мы приняли для твердого, можно попытаться применить наш закон и к солнечному спектру, конечно отвлекаясь от поглощений» [1]. Михельсон, из имевшихся на тот момент данных, на основании полученного им закона смещения (7), приближенно оценил температуру поверхности Солнца в  $40000^\circ\text{C}$ . Современные данные дают для температуры поверхности Солнца около  $6000^\circ\text{C}$  [14]. Отметим, что ошибка в оценке температуры поверхности Солнца меньше, чем на порядок - вполне приемлемый результат для первой попытки определения этой температуры из теории теплового излучения. Эта ошибка есть следствие неверно определенного Михельсоном закона смещения максимума длины волны теплового излучения в зависимости от температуры (7).

В действительности для спектра теплового излучения вместо формулы (7), выполняется закон смещения Вина, который был впервые предложен немецким

физиком Г. Ф. Вебером (1843–1912) в 1888 г. по некоторым экспериментальным данным [15] и теоретически был выведен в 1893 г. В. Вином и сформулирован им так: «в нормальном спектре испускания чёрного тела при изменении температуры каждая длина волны смещается таким образом, что произведение температуры на длину волны остаётся постоянным» [16]

$$\lambda_0 T_0 = \lambda_{\max} T = \text{const}, \quad (8)$$

при этом вывод Михельсона о том, что «кажется возможным по положению места наибольшей яркости в спектре определять температуру светящегося раскаленного тела» [1] остался верным и для закона смещения Вина (8).

В четвёртой части статьи [1], носящей название «Полная энергия спектра», Михельсон вычисляет полную энергию спектра теплового излучения, пользуясь полученной формулой (6), т. е. находит интегральное значение излучательной способности  $\varepsilon(T)$  в зависимости от температуры  $T$

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \text{const} T^p f(T). \quad (9)$$

В пятой части [1], озаглавленной «Пределы возможных значений для  $f(T)$ », Михельсон отмечает, что далее следует приравнять полученную функцию (9) закону Стефана – Больцмана при этом Михельсон отмечает, что вследствие выполнения закона Стефана – Больцмана и равенства начального значения  $f(T)$  нулю, неизвестная функция  $f(T)$  имеет степенной вид  $f(T) = HT^q$ , тогда интеграл (9) примет вид

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \text{const} T^{p+q}. \quad (10)$$

В шестой части [1], озаглавленной «Исследование теоретических кривых в случае закона Стефана», Михельсон, приравняв полученное выражение (10) закону Стефана – Больцмана получает, что закон Стефана – Больцмана может выполняться в случае, если  $p+q=4$ . Предполагая далее, что  $p$  и  $q$  целые, Михельсон рассматривает три комбинации целых чисел  $p=0, q=4$ ;  $p=1, q=3$ ; и  $p=2, q=2$ . Далее отмечая, что кривые для этих трёх спектров получаются подобные, Михельсон рассматривает только вторую подстановку, при этом получается следующий окончательный вид универсальной функции Кирхгофа в версии Михельсона

$$\varepsilon(\lambda, T) = B_1 T^{3/2} \exp\left(-\frac{c_2}{T\lambda^2}\right) \frac{1}{\lambda^6}, \quad (11)$$

где  $B_1, c_{1,2} - \text{const}$  [1].

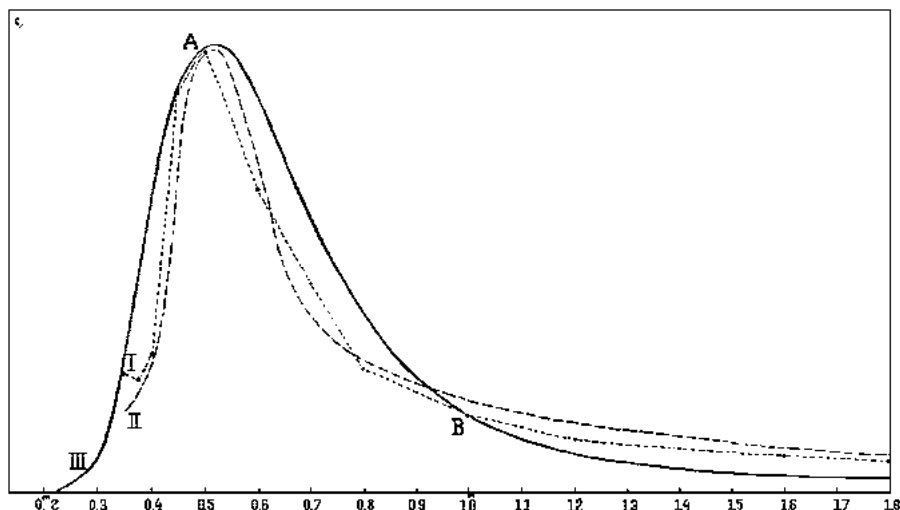


**Рис. 3 / Fig. 3.** Спектр солнечного теплового излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$  /  
Spectrum of solar thermal radiation

- I - - - - средняя кривая из наблюдений Ленгли / mean curve from Langley's observations  
 II - - - - экспериментальная кривая Ленгли / experimental Langley curve  
 III - - - - теоретическая кривая Михельсона / theoretical Michelson curve

Теоретические кривые, определяемые формулой (1.14), оказались сходными с экспериментальными кривыми, полученными ранее С. Ленгли [4–6] (см. рис. 3) и Михельсон сделал вывод, что «теоретические кривые обладают всеми без исключения общими свойствами, какие указывает Лэнглей, описывая свои экспериментальные кривые» [1], и это действительно так, т. к. формула (14) действительно приближенно передаёт ход экспериментальных кривых для  $\varepsilon(\lambda, T)$ , однако даже как предельный закон для коротких волн теплового излучения формула Михельсона оказалась неверной.

Подводя итоги своего исследования, Михельсон отмечает, что:

1. Теоретические кривые «простираются неограниченно в сторону возрастающих  $\lambda$ , так что при крайних пределах, наблюдаемых Лэнгли энергия хотя и сильно уменьшается, но все ещё остаётся заметной.
2. С возрастанием температуры все ординаты возрастают, но не в одинаковой пропорции: ординаты в более преломляемой части спектра возрастают гораздо быстрее, чем в менее преломляемой.
3. Следствием этого является передвижение максимальной ординаты к более преломляемому концу спектра. Выше мы указали вероятный закон этого передвижения (формула (7)).
4. Все наши кривые несимметричны: значительно большая часть площади находится вправо от максимальной ординаты (т. е. на стороне более длинных волн), и падение всегда круче на левой ветви (на стороне большей преломляемости). Поэтому у нас, как и у Лэнгли для обеих приведённых

температур значения ординат на левом конце становятся незаметными раньше, чем кривая достигает пределов видимого спектра [1].

Акцентируя несколько различный вид поведения экспериментальных и теоретических кривых Михельсон отмечает, что «по всей вероятности нами сделан не самый удачный выбор значений для показателей  $p$  и  $q$ » [1].

Итог своего исследования Михельсон подвёл так: «в общей нашей формуле, как уже сказано выше, мы имели ввиду дать лишь первое приближение; поэтому она не может вполне соответствовать действительности и большего совпадения трудно было ожидать» [1].

В заключительных словах Михельсон пишет, что «... если в наших руках окажется достаточное число точных спектроболометрических результатов относительно раскаленных твердых тел, то будет возможно, развивая и прецизируя намеченный нами ход мыслей, получить с помощью приёмов теории вероятностей, согласное с опытом аналитическое выражение распределения энергии в нормальном непрерывном спектре при различных температурах» [1].

Однако исследование по уточнению вида универсальной функции Кирхгофа после 1887 г. не было выполнено В. А. Михельсоном в силу целого ряда причин, о которых будет сказано ниже, и дальнейшее развитие теории теплового излучения последовало в более поздних работах Вина, Рэлея, Джинса и Планка.

Казалось бы, что после первой предпринятой попытки определения вида универсальной функции Кирхгофа Михельсон должен был предпринять и последующую попытку сопоставить полученные им результаты с более поздними экспериментальными данными.

Михельсон действительно опубликовал в 1889 г. ещё одну статью [17] по теории теплового излучения, в которой были критически рассмотрены формулы для универсальной функции Кирхгофа, предложенные в 1888 г. немецким физиком Г. Ф. Вебером [18] и венгерским астрономом Р. Кэвеслигети (1862–1934) [19]. Однако новых экспериментальных данных по универсальной функции Кирхгофа, обещанных в частности С. Ленгли, в 1889 г. ещё не было, поэтому и время для критического пересмотра результатов первой статьи ещё не пришло.

Отсутствие экспериментальных данных, необходимых для дальнейшего уточнения полученных Михельсоном формул в период 1888–1893 гг. было отмечено Столетовым в 1894 г. в его отзыве: «Сделав такой эскиз теории, автор ее на основании печатных и письменных сообщений проф. Лэнгеля о предстоящем новом ряде его экспериментальных изысканий, полагал дать дальнейшее развитие своему труду только после того, как эти новые обещанные данные будут опубликованы и явится возможность, с одной стороны, установить те пункты теории, которые пока оставались неопределёнными или гипотетическими, с другой стороны, подвергнуть теоретические выводы более многостороннему и точному сличению с опытным материалом. Обещанные г. Лэнглем результаты не появились однако и по сие время. В числе других работ, появившихся с 1887 г., до сих пор не находится данных, необходимых

для дальнейшей разработки теории г. Михельсона, т. к. болометрические работы Рубенса, Пашена и др. касаются почти исключительно спектров избирательных. Это обстоятельство и помешало автору придать первоначальному эскизу более прочную и законченную форму» [20].

Отсутствие новых экспериментальных данных, необходимых для уточнения вида универсальной функции Кирхгофа, по свидетельству Столетова, сыграло основную роль в том, что Михельсон не предпринял последующих работ по этой проблеме.

Сам Михельсон так ответил в 1901 г. на замечание О. Люммера [21, р. 67] о том, почему он не предпринял позднее попыток уточнения полученных формул. В заметке «Об одном замечании О. Люммера к радиации черных тел» [22] Михельсон отмечает: «Я не видел однако для себя необходимости опубликовать соответствующие изменения потому, что область исследований подверглась с тех пор дальнейшей успешной разработке, между прочим, со стороны В. Вина, М. Планка и др. и в особенности потому, что более точное сравнение теоретических кривых с кривыми Лэнгли со времени (экспериментального – В. И.) “осуществления” чёрного тела лишилось почти всякого интереса. Но во всяком случае неточность приведённых мною чисел была не результатом “ошибки”, как выражается г. Люммер, а неизбежное следствие неполноты тогдашних знаний» [22].

В обзорной работе по теории теплового излучения в 1901 г. Михельсон также отметил сложность работы с призматическими спектрами вместо нормальных: «Для сравнения опыта с теорией нужно затем еще “перевести” призматический спектр в нормальный, что теперь (в 1901 г. – В. И.) сделать не трудно, так как благодаря опубликованным в 1894 г. исследованиям Пашена и Рубенса, закон дисперсии каменной соли для инфракрасных лучей нам известен с достаточной точностью» и Михельсон отмечает тут же в сноске: «... в 1887 г. закон этот еще не был известен и опыты Пашена и Рубенса еще даже не начаты, что по-видимому забывает г. Люммер при критике моей работы, опубликованной в упомянутом году» [27].

Следует также напомнить, что период 1890–1894 гг. был особенно тяжёлым для В. А. Михельсона в связи с тем, что он заболел туберкулезом, и по крайней мере в начале этого периода Михельсон находился на краю гибели. В течение этих четырёх лет Михельсон был оторван от возможности следить за накоплением данных в физике теплового излучения, находясь на излечении на высокогорном курорте Давос в Швейцарии.

Михельсон так впоследствии высказался об этом периоде своей жизни и о помощи Столетова: «Столетов не покидал друзей в несчастье», в то время когда сам Михельсон, «по возвращении из заграничной командировки был подавлен тяжелой болезнью, заставившей на несколько лет переселиться в Швейцарию и отказаться от всякой научной деятельности и в некоторое время даже от надежды на ее возобновление, то Александр Григорьевич явился истинным другом утешителем» [3].

К этому следует также добавить, что назначение В. А. Михельсона в конце 1894 г. профессором физики и метеорологии Московского сельскохозяйственного института и необходимость создания курсов физики и метеорологии и оборудования физической лаборатории в Московском сельскохозяйственном институте по-видимому поглотили всё время и силы Михельсона в период 1895–1900 гг. и вероятно не оставили возможности для продолжения исследований по определению вида универсальной функции Кирхгофа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михельсон В. А. Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела // Журнал русского физико-химического общества 1887. Т. 19. Вып. 4. С. 79–99.
2. Michelson W. Essai théorique sur la distribution de l'énergie dans les spectres des solides // Journal de Physique Théorique et Appliquée. 1887. Série 2. T. 6 (1). P. 467–479. DOI: 10.1051/jphysap:018870060046701.
3. Michelson W. Theoretical Explanation of the Distribution of Energy in the Spectrum of Solids // Philosophical Magazine. Series 5. 1888. Vol. 25. P. 424–435.
4. Langley S. P. On Hitherto Unrecognized Wave-Lengths // American Journal of Science (Third Series). 1886. Vol. 32. Iss. 188. P. 83–106.
5. Langley S. P. Observations on Invisible Heat-Spectra and the Recognition of hitherto Unmeasured Wave-lengths, made at the Allegheny Observatory // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5). 1886. Vol. 21. P. 397–409; Vol. 22. P. 149–173.
6. Langley S. P. Sur les spectres invisibles // Annales de Chimie et de Physique. 6th Series. 1886. Vol. IX. December. P. 433–506.
7. Михельсон В. А. Очерки по спектральному анализу // Физическое обозрение. 1901. Т. 2. С. 165–183, 231–245, 273–284.
8. Boltzmann L. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht // Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. 1877. Bd. 76. S. 373–435.
9. Полак Л. С. Л. Больцман. М.: Наука, 1987. 207 с.
10. Wien W. Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers // Annalen der Physik. 1896. Bd. 58. S. 662–669.
11. Rubens H. Prüfung der Ketteler-Helmholtz'schen Dispersionsformel // Annalen der Physik und Chemie. 1894. Bd. 53. S. 267–286.
12. Pashen F. Ueber die Gesamtemission glühenden Platins // Annalen der Physik und Chemie. 1893. Bd. 49. S. 50–68.
13. Pashen F. Ueber die Emission erhitzter Gase // Annalen der Physik. 1893. Vol. 286. Iss. 11. P. 409–443. DOI: 10.1002/andp.18932861103.
14. Кочаров Г. Е. Солнце // Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 1994. С. 589–598.

15. Weber H. F. Die Bestimmung der Bestimmung des Gesetzes der Lichtstrahlung // Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 1888. Vol. 2. S. 565.
16. Wien W. Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie // Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 1893. Bd. 19. S. 55–62.
17. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей // Журнал Русского физико-химического общества. 1889. Т. 21. С. 87–103.
18. Weber H. F. Untersuchungen über die Strahlung fester Körper // Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 1888. No. 2. S. 933–957.
19. von Kovesligethy R. Mathematische Spektralanalyse // Astronomische Nachrichten. 1887. Bd. 117. S. 329–338.
20. Столетов А. Г. Отзыв о диссертации кн. Б. Голицына «Исследования по математической физике», представленной на степень магистра физики // Учёные записки Императорского Московского университета. 1894. Вып. II (отдел 2). С. 13–24.
21. Lummer O. Le rayonnement des corps noirs // Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900. Tome 2. Paris: Gauthier-Villars, 1900. P. 41–99.
22. Михельсон В. А. По поводу критики г-на О. Люммера // Журнал Русского физико-химического общества. 1901. Т. 33 (физический отдел). С. 63–66.
23. Wien W. Les lois théoriques du rayonnement // Rapports présentés au Congrès International de Physique. Paris: Gauthier-Villars, 1900. Vol. 2. P. 23–40.
24. Strutt J. W. (Lord Rayleigh). On the Character of the Complete Radiation at a Given Temperature // Philosophical Magazine. 1889. Series 5. Vol. 27. P. 460–469.
25. Strutt J. W. (Lord Rayleigh). Remarks upon the Law of Complete Radiation // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1900. Vol. 49. Iss. 301. P. 539–540. DOI: 10.1080/14786440009463878.
26. Русаков В. П. В. А. Михельсон: научная и педагогическая деятельность // Исследования по истории физики и механики – 2004. М.: Наука, 2005. С. 71–110.
27. Баутин В. М., Россинская Т. М., Глазко В. И. Памяти В. А. Михельсона // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2010. № 5. С. 161–173.
28. Владимир Александрович Михельсон // Выдающиеся ученые (выпускники, профессора) Петровской (Тимирязевской) академии, РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева: Материалы к биобиблиографии. М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2010. 51 с. + 10 с. вкл.
29. Исаев В. И. Л. Больцман и история открытия закона теплового излучения Стефана – Больцмана // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 4. С. 56–57. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-56-67.6.
30. Исаев В. И. Поиск формулы спектрального распределения энергии теплового излучения абсолютно чёрного тела В. А. Михельсоном. Часть 1. В. А. Михельсон. Биографический очерк // Вестник Государственного университета просвещения. Серия Физика-математика 2025, №4, с.110-115