

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

К ИСТОРИИ ЗАКОНА ЧЁРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(Об исследованиях В. А. Михельсона)

В. А. Соколов

В минувшем году исполнилось 90 лет со дня рождения одного из выдающихся русских физиков — Владимира Александровича Михельсона, вышедшего, наряду с П. Н. Лебедевым, из школы А. Г. Столетова.

Область научных интересов В. А. Михельсона была довольно обширной и многогранной, причём в ней нельзя не отвести особого места его изысканиям по теоретическому объяснению закономерностей теплового излучения твёрдых тел, сыгравшим исторически весьма важную роль в решении этой проблемы.

Первые зачатки учения о тепловой радиации возникли ещё в конце XVII и начале XVIII вв. Так, в это время вопросами теплового излучения в какой-то мере интересовался, например, Ньютон, который сформулировал в 1701 г. приближённый закон о пропорциональности количества лучистой энергии разности температур тела и окружающей среды¹. Известны отдельные примеры и более раннего проявления интереса к этому вопросу, но начало систематических и интенсивных исследований по тепловому излучению падает на конец XVIII в.², когда появляются одна за другой работы Ламберта, Шееле, Пикте, Лесли, Гершеля и многих других. К этому времени относится и введение термина «лучистая теплота» (Шееле), а также открытие инфракрасных лучей (Гершель).

Не останавливаясь на различных многочисленных работах по тепловому излучению, появление которых характерно для XIX в., отметим только некоторые важные этапы в развитии этого учения, необходимые для более полного понимания затронутого здесь вопроса.

В 1809 г. Прево сформулировал качественное правило, которое гласило, что если два тела поглощают разные количества лучистой

энергии, то и испускание должно быть различным². Но только спустя полвека, в 1859—1861 гг., Кирхгофу³ удалось придать этому правилу вид строгого количественного закона, играющего фундаментальную роль во всех вопросах теплового излучения. Решающее значение в открытии этого закона имел принцип Карно-Клаузиуса, оформившийся к тому времени в один из основных законов физики — второе начало термодинамики. Именно используя второй закон термодинамики Кирхгоф и доказывает строго, что отношение лучеиспускающей и лучепоглощающей способности какого бы то ни было тела, испускающего тепловые лучи, есть величина, одинаковая для всех тел, и может быть лишь универсальной функцией температуры и длины волны:

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \epsilon_{\lambda T}. \quad (1)$$

Поставив в центре внимания функцию $\epsilon_{\lambda T} = f(\lambda, T)$, представляющую собой испускающую способность абсолютно чёрного тела, закон Кирхгофа вместе с тем выдвинул новую, весьма важную и трудную проблему определения вида этой функции. Всё, что сам Кирхгоф мог сказать по этому поводу, состояло примерно в том, что при низких температурах эта функция равна нулю для видимых лучей, отлична от нуля для более длинных волн и при более высоких температурах она имеет конечные значения и для видимых лучей³. Кроме того, из исследований Кирхгофа вытекало, что с возрастанием температуры значения функции для каждой длины волны λ возрастают так, что кривые распределения энергии в спектре чёрного тела нигде не пересекаются, так как в противном случае имело бы место нарушение второго начала термодинамики.

1879 г. знаменует собой появление закона Стефана⁴ о пропорциональности суммарной радиации чёрного тела четвёртой степени абсолютной температуры. В 1884 г. Больцман⁵ доказывает этот закон теоретически. Но закон Стефана-Больцмана, являясь интегральным законом, не даёт решения задачи о виде функции Кирхгофа $\epsilon_{\lambda T}$, которая требует установления закона о распределении энергии излучения чёрного тела по длинам волн.

В 1886 г. Ленглей⁶ предпринимает первые экспериментальные исследования характера изменения функции $\epsilon_{\lambda T}$ и с помощью спектроболметра находит распределение энергии в спектре излучения сажи при нескольких различных температурах. В связи с этим задача аналитического выражения функции Кирхгофа становится ещё более актуальной. При этом потребность в решении этой задачи вытекает прежде всего из сложившихся к тому времени вполне определённых запросов практики, так как в связи с начавшимся применением тепловых источников света в виде электрических ламп накаливания и развитием спектрального анализа всё острее и острее

встаёт необходимость знания конкретного вида функции $\epsilon_{\lambda T}$, поскольку лишь в таком случае закон Кирхгофа можно было использовать в качестве практически важной расчётной формулы. Естественно, что решение задачи об отыскании однозначного аналитического выражения этой функции должна была дать теория.

Первым в истории физики, кто пытался теоретически определить вид функции $\epsilon_{\lambda T}$, был В. А. Михельсон, и в этом, как правильно отмечает О. Д. Хвольсон¹, его бессмертная заслуга, так как «он первый дал толчок в разработке одного из важных вопросов физики».

Действительно, появившаяся в 1887 г. и одновременно опубликованная в России и за границей работа В. А. Михельсона «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твёрдого тела»^{7, 8} явилась не только первой и довольно удачной попыткой приближённого решения задачи о виде функции $\epsilon_{\lambda T}$, но она также указала путь, который привёл Вина к более точному приближению и Планка к такому решению этого вопроса, который пока считается окончательным. Этот путь заключается в применении методов статистической физики к тому массовому коллективу элементарных излучателей, которым является нагретое твёрдое тело.

В своих изысканиях Михельсон ставил перед собой задачу, которую лучше всего формулировать его собственными словами: «Настоящая статья имеет целью, 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»^{7, 8}.

В соответствии с такой постановкой вопроса Михельсон и исходил из следующих упрощённых представлений. Он рассматривал такое твёрдое тело, все атомы которого находятся примерно в одинаковых условиях, считая молекулы тела настолько сближенными между собой, что взаимодействия между атомами соседних молекул настолько же сильны и непрерывны, как и взаимодействия между атомами одной и той же молекулы. Атомы такого тела не могут иметь колебаний определённого периода, и подобные тела должны иметь одинаковый непрерывный спектр. В описанных условиях каждый атом может перемещаться внутри некоторой бесконечно малой сферы радиуса ρ . Предполагая, что в пределах своей сферы атомы могут двигаться свободно, а достигнув поверхности её, отскакивают внутрь подобно упругим шарикам, и считая, что атомы при посредстве частых возмущений могут быстро обмениваться скоростями, можно полагать, что в подобных условиях устанавливается распределение скоростей, выражаемое законом Максвелла.

Прежде чем применить этот закон, Михельсон, рассматривая возможные движения атома внутри упругой сферической оболочки, приходит к следующему соотношению между скоростью v и периодом колебаний атома τ или частотой ν :

$$v = \frac{4\rho}{\tau} = a\nu, \quad (2)$$

т. е. полагает частоту колебаний пропорциональной скорости перемещений атомов.

Исходя, далее, из закона Максвелла о распределении скоростей и пользуясь подстановкой (2) для v , он получает число атомов n_τ в единице объёма, период колебания которых заключён между τ и $\tau + d\tau$. Чтобы перейти от тепловых колебаний атомов к их излучению или, как выражается Михельсон, «к колебаниям эфира», он предполагает, что интенсивность излучения атомов в данном спектральном интервале пропорциональна, во-первых, числу n_τ атомов в единице объёма тела, дающих волны данного периода, и, во-вторых, некоторой функции от кинетической энергии этих атомов

$$\varphi\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \varphi\left(\frac{8m\rho^2}{\tau^2}\right) = \psi\left(\frac{1}{\tau^2}\right). \quad (3)$$

Разлагая эту функцию в ряд и ограничиваясь первым членом, он получает:

$$\psi\left(\frac{1}{\tau^2}\right) = A\tau^{-2p}. \quad (4)$$

Принимая это во внимание, для интенсивности можно написать:

$$I_\tau = An_\tau\tau^{-2p}. \quad (5)$$

Вставляя вычисленное из максвелловского закона значение n_τ и произведя соответствующие преобразования, Михельсон получает некоторое общее выражение для интенсивности в функции от температуры T и длины волны λ .

Накладывая, далее, условие непересечения изотермических кривых и принимая во внимание закон Стефана (для определения p и придания излучению характера чёрной радиации), он находит возможное значение функции $\varepsilon_{\lambda T}$ в следующем виде:

$$\varepsilon_{\lambda T} = c_1 T^{\frac{3}{2}} \lambda^{-6} e^{-\frac{c_2}{T\lambda^4}}, \quad (6)$$

где c_1 и c_2 — константы. Кривые, подсчитанные по этому уравнению, передают в общих чертах ход экспериментальных кривых; различие заключается только в том, что теоретические кривые Михельсона имеют несколько более крутой спад, чем эксперимен-

тальные, что и не дало полного количественного совпадения с опытом.

Выражение для $\lambda_{\text{макс}}$ получим из закона Михельсона (6), взяв производную $\frac{d\varepsilon_{\lambda T}}{d\lambda}$ и приравняв её нулю, что даёт:

$$\lambda_{\text{макс}}^3 T = \text{const.} \quad (7)$$

Таким образом, Михельсон близко подошёл к закону смещения $\lambda_{\text{макс}} T = \text{const.}$, хотя и не получил его.

В 1896 г. В. Вин⁹, с которым Михельсон был лично и довольно близко знаком, видоизменив вывод Михельсона, получил выражение для функции $\varepsilon_{\lambda T}$, с большей точностью описывающее опыт, чем формула Михельсона.

При этом работа Вина является лишь некоторым изменением и расширением идей Михельсона в соответствии с несколько более строгими обоснованиями.

Чтобы отчётливее представить себе ту связь, которая существует между исследованиями Михельсона и Вина, лучше всего обратиться к более поздним обзорным работам первого, где Михельсон подчёркивает то новое, что сделано Вином в направлении дальнейшего развития его первоначальных соображений.

Так, в одной из таких статей, говоря о функции Кирхгофа, Михельсон пишет следующее:

«Первая попытка выяснить форму этой функции на основании свойств нестройных колебаний была сделана мною в 1887 году. 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, удовлетворяющую всем требованиям, которые мы тогда могли предъявить к функции Кирхгофа $\varepsilon_{\lambda T}$.

Впоследствии, в 1896 году, В. Вин 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 каждой радиации $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ пропорциональным скорости движения испускающих её атомов, В. Вин полагает число колебаний пропорциональным квадрату скорости»^{10, 8}.

При этом Михельсон добавляет, что замена подстановки сделана Вином не произвольно, а «для того, чтобы привести закон распределения энергии в спектре нестройной радиации в согласие с теми следствиями термодинамики, которые при помощи принципа Доплера были получены им же в 1893 году»^{10, 8}.

«... чтобы окончательно выяснить форму этой функции, — пишет также Михельсон, — Вин, следуя моему примеру, пользуется законом Максвелла, определяющим наивероятнейшее распределение скоростей между молекулами газа»^{11, 8}.

Считая только нестрогим применение Михельсоном закона Максвелла к атомам твёрдого тела, Вин представляет себе в качестве лучеиспускающего тела некоторый своеобразный «идеальный газ»⁹, что в общем не меняет принципиальной установки Михельсона, так как фактически формула всё же выводится для применения её к твёрдому телу; новым в рассуждениях Вина является главным образом только подстановка $v^3 = \frac{c}{\tau}$. Кроме того, чтобы сделать радиацию такого «газа» вполне чёрной, Вин заключает его в замкнутую вполне зеркальную оболочку.

Полученная Вином формула имеет следующий вид:

$$\epsilon_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \quad (8)$$

Этой формулой и до сих пор широко пользуются в тех случаях, когда приходится находить распределение энергии в видимой и вообще коротковолновой части спектра при не очень высоких температурах, так как при этих условиях она даёт хорошее совпадение с экспериментом. Но она не оправдывается при высоких температурах для больших длин волн, т. е. для больших значений произведения λT .

Вследствие этого Планк усложняет¹¹ в своё время формулу Вина (8) тем, что присоединяет к ней множитель

$$\frac{1}{1 - e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}} \quad (9)$$

и получает вместо (8) уравнение

$$\epsilon_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (10)$$

которое с довольно большой степенью точности отвечает данным эксперимента во всей области спектра.

Формулой Планка было завершено то важное исследование, которое было начато нашим русским физиком В. А. Михельсоном, причём самым значительным следствием всех этих исследований было появление теории квантов.

Планк, как известно, не ограничился предложением своей формулы как эмпирической, а постарался затем дать и её теоретический вывод, расширяя для этого указанную Михельсоном идею применения методов статистики и увязав её с электромагнитной теорией света.

При этом небезынтересно отметить, что Михельсон в своей работе «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела» довольно прозрачно указывал и на возможность параллельного использования в выводах также и электродинамики. Так, говоря о пропорциональности интенсивности излучения функции (3), он в специальной сноске отмечает, что «мыслимо теоретическое исследование этой функции на началах электромагнитной теории света»^{7,8}.

Как известно, вместо рассматриваемых Михельсоном колеблющихся атомов Планк¹² исходит из представления об излучающих электрических резонаторах. На основании электродинамических соображений объемную плотность излучения можно представить в виде

$$u = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \bar{u}, \quad (11)$$

где \bar{u} — средняя энергия стационарно колеблющегося резонатора.

Предполагая, что общая энергия всех резонаторов состоит из очень большого числа далее неделимых элементов энергии ε , Планк путём применения статистики, а также используя общий закон смещения Вина, приходит к следующему выражению для средней энергии резонатора:

$$\bar{u} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1}. \quad (12)$$

При этом оказывается, что элемент энергии должен быть прямо пропорционален числу колебаний:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (13)$$

В этом случае, при соответствующем значении постоянной h , названной «постоянной Планка», получаемая на основании (11) и (12) формула Планка (10) хорошо удовлетворяет для любой длины волны λ и любой температуры T .

Это и было первым, «теоретическим», открытием квантов света. Как известно, дальнейшее плодотворное развитие учения о квантах нашло себе неопровержимые экспериментальные доказательства.

Несмотря на то, что Михельсон в своей работе не высказывал в явном виде мысли о квантах, эта гипотеза явилась вместе с тем логическим завершением именно той цепи важных исследований, которые были начаты В. А. Михельсоном, и в этом смысле последнего трудно переоценить как выдающегося предшественника Вина и Планка.

То, что работы Вина являются лишь дальнейшим расширением первоначальных идей Михельсона, как было выше показано, не может вызывать каких-либо сомнений. Работы же Планка в свою

очередь являются непосредственным продолжением и дальнейшим развитием работы Вина, а следовательно, и Михельсона. Если присмотреться к изысканиям Планка, то нельзя не сказать, что гипотеза световых квантов представляет собой детище статистического метода в молекулярной оптике, общая идея применения которого к этой области и была впервые указана Михельсоном. Заслуга Планка, следовательно, состоит в дальнейшей разработке и реализации этой идеи.

В своих «Очерках по спектральному анализу»^{8,11} Михельсон говорит: «Для теоретического определения вида функций $\epsilon_{\lambda T}$ — вследствие полной нестройности чёрной радиации — необходимо обратиться к теории вероятностей, на что я определённо указывал уже в 1887 году». И далее: «Универсальная роль и самая необходимость существования такой функции вытекают из тех общих законов теории вероятностей, которые характеризуют собою вполне нестройное распределение каких бы то ни было элементов в системе, подчиненной закону больших чисел».

Приходится сожалеть, что В. А. Михельсон, указав в своё время ставшую столь плодотворной идею применения статистики для решения проблемы чёрного излучения, ограничился лишь первым приближением на пути ее реализации и не имел возможности довести её до конца. Интенсивная и напряжённая работа над диссертацией привела к серьёзному расстройству его здоровья, а развившийся затем туберкулёз лёгких вывел Михельсона из состояния работоспособности почти на целое десятилетие, пока длительное и упорное лечение не привело к относительному восстановлению организма. Появление же работ Вина, а затем Планка сняло с повестки дня проблему чёрного излучения.

Таким образом, начатое В. А. Михельсоном исследование было завершено западноевропейскими учёными. Но, как показывает кратко рассмотренная здесь история этого вопроса, было бы совершенно неправильно отрывать достижения Вина и Планка от работ нашего соотечественника. Это понимали в своё время хорошо и многие представители западноевропейской физики. Так, Луммер по поводу рассмотренной работы Михельсона писал в 1900 г., что она «открыла путь для целого ряда других, чрезвычайно важных исследований»¹²; он имел при этом в виду работы Вина и Планка. О том, с каким огромным интересом была встречена эта работа Михельсона в Европе, можно судить по одному из писем к нему К. Онгстрема, который писал: «...я никогда не забуду нашей замечательной встречи на Унтер ден Линден, когда, не расслышав Вашего имени, начал расспрашивать про Владимира Михельсона, работа которого о распределении спектральной энергии привела меня в восторг»¹³.

Появление «Опыта теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела» было в свое время должным

образом отмечено и в России, где Обществом любителей естествознания за эти исследования автору была присуждена премия имени В. П. Мошнина.

Общую оценку значимости кратко разобранных здесь исследований Михельсона вполне исчерпывающе, нам кажется, можно дать словами А. С. Предводителя, который пишет, что «если количественные соотношения, полученные Михельсоном, при анализе законов распределения энергии по спектру черного излучения ошибочны, то качественная сторона его работы настолько глубока, что не может быть исключена из истории развития учения о чёрном излучении твёрдых тел.

После Михельсона оставалось сделать очень немного, чтобы получить количественные соотношения, правильно описывающие опыт»¹⁴.

Впоследствии Михельсон не раз возвращался к вопросам теплового излучения, давая прекрасные историко-критические анализы и обзоры общего развития этой проблемы. К таким работам следует отнести прежде всего уже цитированные нами «Очерки по спектральному анализу»^{8,11} и «Обзор новейших исследований по термодинамике лучистой энергии»^{8,10}.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. II, ГИЗ, 1923.
2. П. С. Кудрявцев, История физики, т. I, Учпедгиз, 1948.
3. G. Kirchhoff, Pogg. Ann. 109, 299 (1860).
4. I. Stefan, Wiener Akad. Ber. 2, 391 (1879).
5. L. Boltzmann, Wied. Ann. 22, 291 (1884).
6. S. Langley, Phil. Mag. 22, 149 (1886).
7. В. А. Михельсон, ЖРФХО 19, 79 (1887); J. de Physique (2), 6, 462 (1887); Phil. Mag. (5), 25, 425 (1888).
8. В. А. Михельсон, Собрание сочинений, т. 1, изд. «Новый агроном», М., 1930.
9. W. Wien, Wied. Ann. 58, 662 (1896).
10. В. А. Михельсон, Обзор новейших исследований по термодинамике лучистой энергии, Изд. Русск. физ.-хим. об-ва, СПб, 1902.
11. В. А. Михельсон, Физическое обозрение, 2, 165, 231, 273 (1901).
12. M. Planck, Drude's Ann. 4, 553 (1901).
13. И. А. Здановский, Биографический очерк В. А. Михельсона (опубликован в⁸).
14. Очерки по истории физики в России под ред. А. К. Тимирязева, Учпедгиз, 1949.