РАЗДЕЛ III.

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ

УДК 530.145 (09)

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-1-91-99

М. ПЛАНК И ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ КВАНТОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Исаев В.И.

Независимый исследователь

г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассмотрена история открытия универсальной функции Кирхгофа – спектрального распределения энергии излучения абсолютно чёрного тела, открытие которой М. Планком в декабре 1900 г. привело к постепенному развитию квантовой теории и установлению квантовой механики в 1926–1926 гг. и фактически явилось началом новой физической эпохи – эпохи квантовой физики.

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

M. PLANCK AND HISTORY OF THE DISCOVERY OF THE QUANTA OF THE HEAT RADIATION

V. Isaev

Independent researcher

Moscow, Russian Federation

Abstract. The history of the discovery of the universal Kirchhoff function, i.e. the spectral distribution of the black body energy, is considered. The discovery of this function by M. Planck in December 1900 resulted in gradual development of quantum theory and led to appearance of quantum mechanics in 1925 – 1926, which was in fact the beginning of a new physical era – quantum physics.

Key words: theory of the heat radiation, Kirchhoff, Helmholtz, Wien, Planck.

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 кванто-

М. Планк

вых 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. Важность 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.

Макс Карл Эрнст Людвиг Планк родился 23 апреля 1858 г. в семье профессора права Иоганна Юлиуса Вильгельма фон Планка и его жены Эммы Планк, урождённой Патциг, в г. Киле. В 1867 г. семья Планка обосновалась в г. Мюнхене, где М. Планк поступил в Максимилиановскую классическую гимназию, в которой у М. Планка возник интерес к естественным наукам и проявились математические способности [1–3].

В 1874 г. после окончания гимназии М. Планк поступил в Мюнхенский университет, где физику в то время преподавал профессор Филипп Жолли. Отец посоветовал Планку перед выбором специальности поговорить с профессором Ф. Жолли, и тот представил М. Планку теоретическую физику завершённой наукой – наподобие евклидовой геометрии – и пытался убедить его найти другую область для приложения своих способностей. К счастью для науки, Макс Планк всё же выбрал физику своей специальностью [2; 3]. В 1877–1878 гг. Планк слушал лекции по теоретической физике Г. Гельмгольца и Г. Кирхгофа в Берлинском университете, а также изучал труды Р. Клаузиуса по термодинамике, которые произвели на него сильное впечатление и увлекли его в область молекулярно-кинетической теории [1–3]. В 1878 г. М. Планк окончил Мюнхенский университет, и 28 июня 1879 г. после защиты диссертации получил степень доктора философии. В 1880 г. М. Планк становится приват-доцентом кафедры физики Мюнхенского университета. Позднее в 1885 г. М. Планк был приглашён профессором теоретической физики в университет г. Кили, где он работал до 1888 г. [1–3]. Весной 1889 г. Планк становится профессором теоретической физики Берлинского университета, одновременно он также работает в Институте теоретической физики в Берлине [1–3]. К этому периоду относится тесное сотрудничество Макса Планка с Г. Гельмгольцем и А. Кундтом. Планк вспоминал об этом времени так: «Это были годы, в течение которых я испытал, пожалуй, сильнейшее расширение всего своего научного кругозора. Это было потому, что я непосредственно общался с людьми, занимавшими тогда ведущее положение в мировых научных исследованиях» [1].

Начиная с 1894 г. М. Планк выполнил ряд работ, посвящённых рассмотрению термодинамического равновесия теплового излучения с веществом, исходя из

законов термодинамики и электромагнитной теории Максвелла. Планк стремился получить математически наиболее строгое обоснование закона излучения Вина, поскольку он считал данное Вильгельмом Вином в 1896 г. объяснение использованной аналогии между газом молекул и тепловым излучением нестрогим [4]. Планк стремился показать, что последовательное рассмотрение обмена энергией между совокупностью электромагнитных резонаторов и излучением по теории Максвелла позволит получить энергетический спектр теплового излучения. Для этого Планк исследовал поглощение и излучение электромагнитных волн между осциллятором Герца и возбуждающей его электромагнитной волной и показал, что оно носит резонансный характер.

Теория дипольного электромагнитного излучения была развита Г. Герцем в 1889 г. Планку пришлось проделать большую подготовительную работу, и в период с 1897 г. по 1899 г. он представил Берлинской Академии наук пять сообщений под общим названием «О необратимых процессах излучения». Итоги данного цикла исследований Планк подвёл в статье [5, с. 191]. «Результатом этого довольно длинного ряда исследований ... было установление общей зависимости между энергией резонатора с определённым периодом собственных колебаний и излучением энергии соответствующей спектральной области в окружающем поле при стационарном обмене энергией» [5, с. 604]. В результате этого детального анализа Планку из электродинамики Максвелла удалось получить соотношение между спектральной плотностью теплового излучения $\varepsilon(\nu, T)$ и средней энергией одного резонатора (электромагнитного осциллятора) U [5, с. 191]:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu, T) \quad (1)$$

где ν – частота излучения, c – скорость света, $8\pi\nu^2/c^3$ – число собственных колебаний равновесного электромагнитного излучения, отнесённое к единице объёма и единице интервала частот. М. Планк отмечал: «При этом получился тот замечательный результат, что такое соотношение совершенно не зависит от постоянной затухания осциллятора – обстоятельство, которое для меня было очень радостным и желанным, потому что оно позволяло до такой степени упростить всю проблему, что вместо энергии излучения можно было взять энергию осциллятора, и таким образом, вместо запутанной системы, имеющей много степеней свободы, возникала простая система с одной единственной степенью свободы» [5, с. 604].

Для получения закона излучения, как следует из формулы (1), было необходимо найти зависимость энергии осциллятора от температуры. Планк отмечал: «Мне не оставалось ничего другого, как подойти к проблеме ещё с противоположной стороны, с точки зрения термодинамики, в которой к тому же я чувствовал себя уверенно, как дома. В самом деле, моё прежнее изучение второго начала теории теплоты здесь мне весьма пригодились, я сразу же почувствовал, что нужно вывести соотношение не между температурой и энергией осциллятора, а между его энтропией и энергией» [5, с. 605]. В последнем сообщении «О необ-

ратимых процессах излучения» [5, с. 191] он максимально строго с точки зрения термодинамики обосновал вывод закона излучения Вина. В этой статье Планк определил зависимость энтропии S электромагнитного осциллятора от средней энергии U осциллятора в виде выражения

$$S = -\frac{U}{av} \left(\ln \left(\frac{U}{bv} \right) - 1 \right),$$

где a и b – *const*, откуда вследствие известной связи $\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}$ следует, что средняя

статистическая энергия одного электромагнитного осциллятора U имеет вид

$U(v, T) = bv^2 \exp \left(-\frac{av}{T} \right)$, что вследствие (1) сразу же приводит к закону излу-

чения Вина:

$$\varepsilon(v, T) = \frac{8\pi bv^3}{c^3} \exp \left(-\frac{av}{T} \right). \quad (2)$$

На этом проблему термодинамического обоснования закона излучения Вина можно было бы считать исчерпанной, однако появившиеся несколько позже экспериментальные исследования вида функции $\varepsilon(v, T)$, проведённые О. Люммером и Э. Прингсгеймом, а также Г. Рубенсом и Ф. Курлбаумом показали, что закон излучения Вина (2) неточно аппроксимирует спектр теплового излучения. В работе «К истории открытия кванта действия», написанной в 1943 г., т.е. спустя более 40 лет после его открытия, Планк отмечал: «Но тут произошло событие, которое должно было привести к решающему повороту в этом деле. На заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 г. Ф. Курлбаум сообщил о результатах измерений энергии в области очень больших длин волн, выполненных им совместно с Г. Рубенсом, из которых следовало, что с повышением температуры зависимость интенсивности излучения чёрного тела от температуры T становится всё более близкой к пропорциональной, в явном противоречии с законом распределения Вина (2), согласно которому интенсивность излучения должна всегда оставаться конечной. Так как мне этот результат стал известен благодаря устному сообщению авторов уже за несколько дней до заседания, то у меня было время ещё перед заседанием использовать его последствия в моём методе и вычислить энтропию совершающего вынужденные колебания резонатора» [5, с. 438]. Зная, что в области коротких волн и низких температур закон излучения Вина (2) хорошо аппроксимирует кривую для $\varepsilon(v, T)$, т.е. что в этой области верно выражение $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{1}{avU}$, а в области длинных волн и высоких

температур зависимость $\varepsilon(v, T)$ пропорциональна kT , что было известно Планку из последних экспериментов Г. Рубенса и Ф. Курлбаума [5], т.е. в области длинных волн верно выражение $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{c}{U^2}$. Планк определил, перепробовав раз-

личные математические выражения, что простейшее общее соотношение для $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2}$, содержащее в себе оба предельных случая, имеет вид отношения суммы

этих двух предельных случаев $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{1}{avU + U^2/c}$, откуда после интегрирования получается формула (3), содержащая в себе общий закон излучения Планка:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)}, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 – постоянные.

Планк отмечал: «При этом была найдена новая формула для излучения, которую я представил на заседании Берлинского физического общества 19 октября 1900 г. и рекомендовал проверить» [5, с. 438]. Эта формула Планка (3) была проверена Рубенсом уже в ночь после заседания и показала полное соответствие экспериментальным данным, о чём на следующий день Г. Рубенс с удовлетворением сообщил М. Планку. Позже формула (3) была детально проверена Люммером и Прингсгеймом, и также было найдено удовлетворительное совпадение формулы Планка с данными измерений. Сообщение М. Планка на заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 г. было опубликовано под названием «Об одном улучшении закона излучения Вина» [5, с. 249]. Таким образом, сорокалетний путь поисков универсальной функции Кирхгофа был успешно завершён М. Планком. Однако, несмотря на то, что вид универсальной функции Кирхгофа был уже найден, пусть и интерполяционным путём, оставалось неясным, возможно ли вывести из теории столь счастливым образом правильно подобранную интерполяционную формулу. Эта очень сложная проблема была решена М. Планком всего за два месяца.

14 декабря 1900 г. М. Планк выступил на заседании Немецкого физического общества с сообщением «К теории распределения энергии излучения нормального спектра» [5, с. 251]. В этом сообщении Планк впервые дал теоретический вывод выражения для спектральной плотности теплового излучения в виде:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right)}. \quad (4)$$

Этот вывод Планк выполнил, исходя из статистического подхода Больцмана, опирающегося на установленную Больцманом связь между энтропией и вероятностью системы. Он показал, что из выражения (4) следует с учётом закона смещения Вина, что энергия осциллятора должна принимать только дискретные значения – кванты энергии величиной $\varepsilon_n = nh\nu$. Поэтому 14 декабря 1900 г., считается днём рождения квантовой теории.

В более подробной форме этот вывод Планка был изложен в его последующей работе [5, с. 254] под названием «О законе распределения энергии в нормальном спектре», опубликованной в начале 1901 г. в журнале *“Annalen der physik”*. Планк рассмотрел набор N осцилляторов, находящихся в равновесии с излучением и имеющих полную энергию $U_N = NU$, где U – средняя статистическая энергия осциллятора. Вероятность W или число способов, каким можно распределить большое целое число P неразличимых элементов энергии ε по N осцилляторам, согласно формулам комбинаторики имеет известный вид:

$$W = \frac{(N+P-1)!}{P!(N-1)!} \cong \frac{(N+P)^{N+P}}{P^P N^N}.$$

Откуда, с учётом того, что N и P – большие числа, и предполагая справедливой связь между энтропией и вероятностью $S = k \ln W$ по Больцману, получаем:

$$S_n = k \ln W = k \{ (N+P) \ln (N+P) - N \ln N - P \ln P \}.$$

Затем, введя обозначение $U_N = P\varepsilon$, получим:

$$S_n = NS = kN \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \left(\frac{U}{\varepsilon} \right) \right\},$$

откуда сразу же следует правильная зависимость энтропии S электромагнитного осциллятора от средней энергии осциллятора U

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \left(\frac{U}{\varepsilon} \right) \right\},$$

из которой с учётом соотношения $\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}$ после интегрирования следует, что

средняя статистическая энергия одного осциллятора равна:

$$U = \frac{\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{kT}\right) - 1}. \quad (5)$$

При этом оказалось, что для того, чтобы выражение (5) удовлетворяло закону смещения Вина $U = \nu^4 \Phi(\nu/T)$ необходимо считать, что энергия ε «элемента» или кванта пропорциональна частоте ν , т.е. $\varepsilon = h\nu$, где h – постоянная, названная впоследствии постоянной Планка. Численное значение постоянной h было определено М. Планком: $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг · с. Он отмечал: «Эта константа, помноженная на общую для резонаторов данной группы частоту, даёт нам элемент энергии ε в эргах» [5, с. 255]. Так впервые в физической теории в декабре 1900 г. появились кванты энергии.

Тогда средняя энергия осциллятора (5) сразу же принимает вид $U = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$, откуда, вследствие связи (1) между спектральной плотностью

излучения $\varepsilon(\nu, T)$ и средней энергией осциллятора U , окончательно получаем закон излучения Планка, выражающий спектральную плотность энергии электромагнитного излучения во всём диапазоне частот в виде:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1\right)}. \quad (6)$$

В своём письме Р. Вуду Планк так вспоминал о введении им квантов энергии: «... Это было чисто формальное предположение, и я первоначально не думал много об этом, памятуя только лишь о том, что я при всех обстоятельствах любой ценой должен добиться положительного результата» [5, с. 698]. В Нобелевской лекции Планк отметил, что Л. Больцман, узнав о выводе Планком закона излучения, приветствовал атомистический вывод универсальной функции теплового излучения [5, с. 607]. В результате вывода универсальной функции излучения из статистической теории М. Планку пришлось ввести в физическую теорию совершенно новую квантовую гипотезу, т.е. предположить, что излучение и поглощение энергии осцилляторов происходит минимальными дискретными порциями – квантами энергии, при этом величина самих квантов энергии пропорциональна частоте излучения. Эта квантовая гипотеза М. Планка оказалась принципиально новой, и можно сказать, что она преобразила физику XX века, направив её в русло развития квантовой теории и открыв новую физическую эпоху. Различные аспекты открытия М. Планка рассмотрены в последних исследованиях спектра теплового излучения [6–12].

Статья поступила в редакцию 12.02.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макс Планк. 1858–1958 / ред. А. Иоффе, А. Григорьян, М.: Издательство Академии Наук СССР, 1958. С. 9–45.
2. Гернек Ф. Пионеры атомного века. М.: Прогресс, 1974. С. 131–163.
3. Кляус Е.М., Франкфурт У.И. Макс Планк. М.: Наука. 1980. 392 с.
4. Исаев В.И. В. Вин и история открытия законов теплового излучения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2016. № 4. С. 86–93.
5. Планк М. Избранные труды. М.: Наука. 1975. С. 431–442.
6. Голубева О.Н., Суханов А.Д. Идеи Планка как первооснова неклассической физики // Исследования по истории физики и механики (2009–2010). М.: Физматлит, 2010. С. 11–32.
7. Calcano-Roldan C., Salcido O., Santana D. A semi-analytical approach to black body radiation // European Journal of Physics. 2017. Vol. 38. № 5. 055807.
8. Boyer T.H. Understanding the Planck black body spectrum // European Journal of Physics. 2016. Vol. 37. № 6. 065102.

9. Boyer T.H. Scaling. Scattering and black body radiation in classical physics // *European Journal of Physics*. 2017. Vol. 38. № 4. 045101.
10. Poprawski W., Gnutek Z., Radojewska E.B., Poprawski R. Investigation of black body radiation // *European Journal of Physics*. 2015. Vol. 36. № 6. 065025.
11. Абекова Ж.А., Оралбаев А.Б., Абдулаева Ж.А., Баубекова М.К. Методика изложения теоретических вопросов на лекционных материалах по курсу физики // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 5. Часть 3. с. 407–409.
12. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum hypothesis // *American Journal of Physics*. 2016. Vol. 84. Iss. 9. pp. 709–716.

REFERENCES

1. Ioffe A., Grigoryan A. ed. *Maks Plank. 1858–1958* [Max Planck. 1858–1958]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR Publ., 1958. pp. 9–45.
2. Herneck F. *Bahnbrecher des Atomzeitalters. Große Naturforscher von Maxwell bis Heisenberg*. Berlin, Springer, 1972.
3. Klyaus E.M., Frankfurt U.I. *Maks Plank* [Max Planck]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 392 p.
4. Isaev V.I. [W. Wien and the history of the discovery of the laws of the heat radiation]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2016, no. 4, pp. 86–93.
5. Planck M. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1975. pp. 431–442.
6. Golubeva O.N., Sukhanov A.D. [Planck's ideas as the fundamental principle of non-classical physics]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki (2009–2010)* [Studies in the history of physics and mechanics (2009–2010)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. pp. 11–32.
7. Calcano-Roldan C., Salcido O., Santana D. A semi-analytical approach to the black body radiation. In: *European Journal of Physics*, 2017, vol. 38, no. 5, 055807.
8. Boyer T.H. Understanding the Planck black body spectrum. In: *European Journal of Physics*, 2016, vol. 37, no. 6, 065102.
9. Boyer T.H. Scaling. Scattering and black body radiation in classical physics. In: *European Journal of Physics*, 2017, vol. 38, no. 4, 045101.
10. Poprawski W., Gnutek Z., Radojewska E.B., Poprawski R. Investigation of black body radiation. In: *European Journal of Physics*, 2015, vol. 36, no. 6, 065025.
11. Abekova Zh.A., Oralbaev A.B., Abdulaeva Zh.A., Baubekova M.K. *Metodika izlozheniya teoreticheskikh voprosov na lektzionnykh materialakh po kursu fiziki* [The method of presentation of theoretical problems on lectures of physics]. In: *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, no. 5, iss. 3, pp. 407–409.
12. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum hypothesis. In: *American Journal of Physics*, 2016, vol. 84, iss. 9, pp. 709–716.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vyacheslav I. Isaev – PhD in physical and mathematical sciences, independent researcher (Moscow);

e-mail: vis961@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Исаев В.И. М. Планк и история открытия квантов теплового излучения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика–математика. 2018. № 1. С. 91–99.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-1-91-99.

FOR CITATION

Isaev V.I. M. Planck and history of the discovery of the quanta of the heat radiation. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 1, pp. 91–99.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-1-91-99.