

# РАЗДЕЛ III. ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ

---

УДК 530.145 (09)

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-2-96-105

## ДЖ. РЭЛЕЙ И ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЭЛЕЯ-ДЖИНСА

**Исаев В. И.**

*Независимый исследователь*

*г. Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** В работе рассмотрена история открытия закона теплового излучения Рэля-Джинса. Это событие явилось одним из важных эпизодов в предыстории открытия универсальной функции Кирхгофа. Открытие этой функции 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, Вин, Планк, Рэлей, Джинс.

## J. W. STRUTT (LORD RAYLEIGH) AND HISTORY OF THE DISCOVERY OF THE RAYLEIGH–JEANS LAW OF THERMAL RADIATION

**V. Isaev**

*Independent researcher*

*Moscow, Russian Federation*

**Abstract:** The paper discusses the history of the discovery of the Rayleigh–Jeans law of thermal radiation. This discovery was an important step in the prehistory of the discovery of the universal Kirchhoff function. The discovery of this function by M. Planck in December 1900 led to the gradual development of quantum theory and to the appearance of quantum mechanics in 1925–1926, which was in fact the beginning of a new physical era, i.e. quantum physics.

**Keywords:** *theory* of thermal radiation, Kirchhoff, Wien, Planck, Rayleigh, Jeans.

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.



*Дж. У. Стретт (Рэлей)*

Джон Уильям Стретт родился 12 ноября 1842 г. в г. Лэнгфорд-Гроф, графство Эссекс, Великобритания, в семье Джона Джеймса Стретта, второго барона Рэрея, и был его старшим сыном. Мать Дж. У. Стретта звали Клара Элизабет Ля Туш, она была дочерью капитана Инженерных войск Р. Викаерса [1]. Начальное образование Джон Уильям Стретт получил в нескольких частных школах: сначала в Итоне, затем в Уимблдоне и в Харроу, и затем около четырёх лет он учился в частной школе г. Торки, которую окончил в 1861 г.

В октябре 1861 г. Дж. Стретт поступил в Тринити-колледж (колледж Св. Троицы) в Кембридже, где начались его занятия математикой и физикой. Тринити-колледж был «альма матер» английских математиков и физиков. Выпускниками этого колледжа ранее Дж. Стретта были такие известные учёные, как Ф. Бэкон, И. Ньютон, Г. Кавендиш, У. Томсон (лорд Кельвин), Дж. Максвелл и др. Следует отметить высокий уровень преподавания математики и физики в Тринити-колледже, где учителями Дж. Стретта были, в частности, известные учёные – математик Э. Раус и физик Дж. Стокс, которые способствовали возникновению первых научных интересов Дж. Стретта. Во время обучения у Дж. Стретта проявились его математические способности, и в 1865 г. Дж. Стретт закончил Тринити-колледж первым бакалавром, получил премию Смита и был оставлен преподавателем в Тринити-колледже, где он начал свою научную работу в 1866 г. [1].

В 1871 г. после женитьбы на Э. Бальфур Дж. Стретт оставил Тринити-колледж и поселился в своём фамильном имении Терлинг, в графстве Эссекс. В Терлинге он оборудовал физическую лабораторию и проводил физические исследования

ния в области акустики и оптики. После перенесённого приступа ревматизма в 1872 г. Дж. Стретт отправился в длительную поездку в Египет и Грецию. Во время путешествия по Нилу Дж. Стреттом была написана первая часть его фундаментального труда по акустике и оптике «Теория звука», которая была опубликована совместно со второй частью в 1877 г. В этой монографии впервые с единых позиций с использованием функций Лагранжа и Гамильтона рассматривались задачи теории колебаний в механике, акустике, оптике и гидродинамике.

В 1879 г., после смерти Дж. Максвелла, лорд Рэлей был назначен на пятилетний срок директором Кавендишской лаборатории в Кембридже и стал профессором экспериментальной физики Кавендишской лаборатории. В течение пяти лет, с 1879 по 1884 гг., Рэлею удалось превратить Кавендишскую лабораторию в ведущую научную лабораторию. Научная программа, предложенная Рэлеем для работ в Кавендишской лаборатории, – это программа упорядочения значительных электростатических и электромагнитных единиц и разработка технических стандартов в этой области [2].

В 1873 г. Рэлей был избран членом Лондонского Королевского общества, в 1885 г. после ухода Дж. Стокса в отставку Дж. Рэлей был назначен секретарём Лондонского Королевского общества и оставался на этом посту до 1896 г. В 1887 г. Дж. Рэлей стал профессором натуральной философии (физики) в Британском Королевском институте в Лондоне после отставки Дж. Тиндала и занимал эту должность до 1905 г. [1].

К 1894–1895 гг. относятся работы Рэлея, в которых ему, совместно с химиком У. Рамзаем, профессором Лондонского университета, удалось впервые выделить инертный газ – аргон. За эти исследования в 1904 г. Рэлею была присуждена Нобелевская премия по физике. К 1900 г. относятся исследования Рэлея по теории излучения твёрдых тел, в которых он нашёл асимптотическую формулу распределения энергии излучения абсолютно чёрного тела, верную в пределе длинных волн и названную впоследствии законом излучения Рэлея-Джинса [1].

С 1905 по 1908 гг. Дж. Рэлей был президентом Лондонского Королевского общества, а в 1908 г. Рэлей был избран президентом Кембриджского университета. Первая научная работа Рэлея была напечатана в 1869 г., а последняя – в 1919 г. Список его научных трудов включает 446 статей и несколько книг. Научные работы Рэлея собраны в 6 томах его “Scientific papers”, напечатанных в 1889–1920 гг. Дж. Рэлей скончался 30 июня 1919 г. в своём имении в Терлинге [1].

Рэлеем был сделан фундаментальный вклад в теорию колебаний стержней, пластин и оболочек, им была выведена формула связи между фазовой и групповой скоростями волн, развита теория рассеяния света, позволившая объяснить голубой цвет неба, была развита теория поверхностных упругих (рэлеевских) волн, играющая важную роль в сейсмологии [3]. Рэлей одним из первых начал применять асимптотические методы для анализа колебаний тел, им был разработан приближенный энергетический метод для определения частот колебаний (метод Рэлея-Ритца).

В 1891 г. Рэлей обнаружил в архивах Лондонского Королевского общества статью морского офицера – капитана Дж. Уотерстона (1811–1883), инспекто-

ра Ост-Индской компании в Бомбее, написанную им в 1853 г. и отклонённую рецензентом от публикации, в которой впервые содержались некоторые идеи развития кинетической теории газов. Статья Уотерстона называлась «О физике среды, состоящей из абсолютно упругих молекул в состоянии движения» [4]. В ней впервые была предложена теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы по отношению к поступательному движению молекул. Эту статью Рэлей опубликовал в 1892 г., отметив, что отклонение этой статьи от публикации задержало развитие кинетической теории газов на 10 или 15 лет.

Независимо от Уотерстона эту же теорему в более общей формулировке открыл и опубликовал Дж. К. Максвелл в 1860 г. в своей статье «Пояснение к динамической теории газов» в виде следующего утверждения: «Два различных набора частиц будут перераспределять свои скорости, пока их кинетические энергии не окажутся одинаковыми». Максвелл распространил действие этой теоремы не только на поступательные, но и на вращательные движения молекул. В 1868 г. Л. Больцман обобщил теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул, распространив её действие на внутренние степени свободы молекул.

В 1878 г. Дж. К. Максвелл показал, что теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы имеет место и в случае, когда динамическая система, состоящая из произвольного числа молекул, может быть описана функцией Лагранжа и имеет произвольное число степеней свободы.

Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы гласит, что для любой динамической системы с  $N$  степенями свободы, кинетическая энергия которой содержит квадраты обобщённых скоростей  $m_i v_i^2/2$ , а потенциальная энергия может быть представлена суммой квадратов нормальных координат системы  $m_i \omega_i^2 q_i^2/2$ , на каждую степень свободы системы в среднем приходится одна и та же энергия, равная  $kT/2$ . При этом подразумевается, что рассмотренная динамическая система находится в состоянии теплового равновесия при температуре  $T$ . В статистической механике теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы является обобщением известной в аналитической механике теоремы о вириале. Основное различие между ними в том, что при доказательстве теоремы о вириале обычно используют усреднение в течение длительного периода времени, в то время как при доказательстве теоремы о равномерном распределении энергии используется усреднение по фазовому пространству, что верно для случая эргодических систем.

Лорд Кельвин, в отличие от Максвелла, Больцмана и Рэля, никогда не признавал всеобщую применимость теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы и в своей знаменитой лекции «Облака XIX века над динамической теорией теплоты и света», прочитанной в Лондонском Королевском обществе 27 апреля 1900 г., он отметил, что одно из облаков, омрачающих ясный горизонт физики XIX столетия, – это недоказанная, по его мнению, теорема Максвелла-Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Отрицательное отношение Кельвина к теореме о равномерном распреде-

лении энергии по степеням свободы было связано с нарушениями этой теоремы при подсчётах теплоёмкостей многоатомных газов.

Статья Михельсона [5] под названием «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твёрдого тела», законченная в марте 1887 г., была напечатана в четвёртом выпуске физической части Журнала Русского Физико-Химического Общества в 1887 г., а позже переведена на английский язык и опубликована в 1888 г. в английском журнале “Philosophical Magazine”. Эта статья была замечена лордом Рэлеем, который в 1889 г. опубликовал в английском журнале “Philosophical Magazine” своё первое сообщение по теории теплового излучения под названием «О характере полного излучения при данной температуре» [6]. В этой небольшой заметке Рэлей отмечает, что под полным излучением он понимает «излучение, которое в конце концов устанавливается в полости, стенки которой непроницаемы и находятся при одинаковых температурах». При этом в сноске Рэлей замечает, что «излучение, называемое здесь полным, иногда определяется как чёрное. Называть чёрной раскалённую кочергу или её излучение не кажется удачным» – остроумно добавляет Рэлей. В этой заметке Рэлея содержится анализ приближенной формулы для универсальной функции Кирхгофа, предложенной в 1887 г. В. А. Михельсоном [5]:

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

где  $B_1$ ,  $c_{1,2}$  – const, а также анализ другой формулы, предложенной в 1888 г. Г. Ф. Вебером. Если переписать формулу Михельсона (1) для частот, а не для длин волн, то она примет вид:

$$\varepsilon(\nu, T) = A\nu^4 \exp(-a^2\nu^2), \quad (2)$$

где  $A$ ,  $a$  – const, а формула, предложенная в 1888 г. Г. Ф. Вебером по известным на то время данным наблюдений американского физика С. Лэнгли, имеет более простой вид:

$$\varepsilon(\nu, T) = A \exp(-a^2\nu^2). \quad (3)$$

В своей заметке Рэлей попытался математически проанализировать характер световых импульсов, составляющих чёрное излучение. Рэлей пишет: «Тот вопрос, который я хочу поставить, состоит в следующем: можно ли определить вид импульсов, нерегулярная последовательность которых даёт полное излучение при любой температуре». Рэлей в результате приходит к выводу, что «наиболее простой вид импульсов, могущий удовлетворить всем требованиям данного случая – это тот, который хорошо известен в теории ошибок, а именно:  $f(x) = \exp(-x^2)$ . Далее Рэлей пишет: «Таким образом, мы определили вид импульсов, случайная совокупность которых будет представлять полное (чёрное) излучение в соответствии с законом Вебера (3)».

После этого Рэлей обращается к анализу низкочастотной асимптотики формул Михельсона (1)–(2) и Вебера (3) и отмечает, что в пределе малых частот

формула Михельсона стремится к нулю, в то время как формула Вебера даёт некоторое конечное значение, отличное от нуля. Свой анализ Рэлей заканчивает так: «но мы не знаем достаточно хорошо механизма излучения, чтобы сделать уверенные выводы. Всё, что можно сейчас потребовать – это более полных экспериментальных данных, подобных обещанным профессором Ленгли». Далее в этой заметке, посвящённой анализу природы теплового излучения, Рэлей сделал важное замечание: «что касается излучения при очень низкой частоте, то можно сомневаться в том, содержатся ли данные о нем в наших нынешних измерениях» [6]. Это свидетельствует о том, что статья Михельсона [5] привела Рэрея к размышлениям о том, насколько хорошо формулы для  $\epsilon(\lambda, T)$  или  $\epsilon(\nu, T)$ , предложенные Михельсоном и Вебером, описывают низкочастотную (длинноволновую) часть спектра теплового излучения. Итог своих исследований Рэлей опубликовал в 1900 г. в краткой заметке под названием «Замечания о законе полного излучения» [7].

В этой заметке Рэлей, рассматривая тепловые колебания молекул эфира по аналогии с колебаниями молекул воздуха и применяя классическую теорему о равномерном распределении тепловой энергии по степеням свободы к стоячим электромагнитным волнам в полости, получил асимптотическую формулу для универсальной функции Кирхгофа  $\epsilon(\lambda, T)$ , правильную (с точностью до коэффициента 8) для области длинных волн и имеющую вид:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{\pi k T}{\lambda^4}, \quad (4)$$

и названную впоследствии законом излучения Рэрея-Джинса. Затем, понимая, что интегрирование по частотам или длинам волн данной формулы даёт бесконечное значение полной энергии излучения всего спектра – физически бессмысленный результат, так называемую «ультрафиолетовую катастрофу», Рэлей, опираясь на аналогию с законом излучения Вина, вводит в формулу (4) затухающую экспоненту без какого-либо обоснования и получает следующее приближенное выражение для универсальной функции Кирхгофа:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{\pi k T}{\lambda^4} \exp\left(-\frac{c}{\lambda k T}\right), \quad (5)$$

которое, хотя и напоминает формулу Вина (6), но всё же является неверной формулой.

Напомним, что в 1896 г. Вильгельм Вин, уточнив гипотезы, высказанные в статье [5] В. А. Михельсоном, и используя принцип Доплера, получил выражение для универсальной функции Кирхгофа  $\epsilon(\lambda, T)$ , правильное для коротких волн и имеющее вид:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{k T \lambda}\right), \quad (6)$$

названное впоследствии законом теплового излучения Вина.



*Дж. Джинс*

Обоснование и уточнение формулы Рэлея (4) было позднее проведено английским физиком Джеймсом Джинсом в 1905 г. в работе под названием «Распределение энергии между эфиром и материей» [8].

Джеймс Хопвуд Джинс родился 11 сентября 1877 г. в г. Ормскирке, графство Ланкашир, Великобритания, в семье журналиста и владельца газет Уильяма Таллаха Джинса. Мать Джинса звали Марта Энн Хопвуд, она происходила из семьи промышленников из г. Стокпорта, от неё Джеймс получил второе имя Хопвуд [10]. В 1879 г. семья Джинсов переехала в Лондон.

В 1890 г. Джеймс Джинс поступил в Тейлоровскую коммерческую школу, которую окончил в 1896 г. Уже с детства проявились блестящие математические способности Джинса. Так в семье Джинсов помнили случай, когда однажды мать забыла билет на поезд дома и маленький Джеймс смог назвать проводнику поезда его номер по памяти.

В 1896 г. Джинс поступил в Тринити-колледж Кембриджского университета. В колледже Джинс слушал лекции известных математиков – профессоров Г. Т. Уолкера, Дж. В. Глэйзера, А. Н. Уайтхеда, Е. Т. Уиттекера.

В 1899 г. Джинсу пришлось прервать обучение в университете из-за болезни. Однако Джинс не прекратил активные занятия математикой и физикой, и в 1900 г. была опубликована его первая научная работа «Стратифицированный электрический заряд». В 1900 г. Джинсу была присуждена стипендия И. Ньютона по астрономии и оптике, а в 1901 г. за свою научную работу «Распределение энергии молекул» Джинс получил премию Смита [10].

В 1903 г. Джинсу была присуждена учёная степень магистра Кембриджского университета и в 1904 г. он начал чтение курса лекций по математике в Кембриджском университете. В том же 1904 г. была опубликована его первая научная монография «Динамическая теория газов». В 1905 г. Джинс принял предложение Принстонского университета в США и занял должность профессора прикладной математики.

В 1905 г. была опубликована статья Джинса [8], в которой он применил теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы в спектре равновесного излучения и исправил (увеличил в 8 раз) множитель в законе излучения Рэлея.

Джинс строго рассмотрел стоячие электромагнитные волны или «волны эфира» (по терминологии того времени) в замкнутой полости с зеркальными отражающими стенками. Энергия всей системы таких волн может быть представлена в виде суммы энергий отдельных электромагнитных осцилляторов, и Джинс показал, что энергия всей системы может быть выражена, с использованием те-

оремы о равномерном распределении энергии, через среднюю тепловую энергию одного осциллятора  $\langle E \rangle = kT$  в виде [8]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{8\pi}{\lambda^4} \langle E \rangle = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT. \quad (7)$$

Именно это соотношение и получило впоследствии название закона излучения Рэля-Джинса. После выхода статьи Джинса Рэлей, проверив вычисления, согласился с Джинсом, и предложил называть далее закон излучения Рэля законом излучения Рэля-Джинса.

Джинс, получив строго этот результат из классической статистической механики, в ряде последующих работ по теории теплового излучения [9] настаивал на его применимости ко всему спектру электромагнитных волн, что конечно же не соответствовало истинной природе электромагнитного излучения, поскольку закон излучения Рэля-Джинса верен только для области длинных волн, что со всей убедительностью было продемонстрировано М. Планком [11].

В результате многочисленных обсуждений этих работ Дж. Джинса [9] было окончательно доказано, что классическая статистическая механика даёт для функции Кирхгофа только приближённую асимптотическую формулу (7) закона излучения Рэля-Джинса. Упорная критика Джинсом [9] работ М. Планка не прошла незамеченной физиками, и даже наоборот, многочисленные статьи Джинса, а также его выступления в защиту своей точки зрения и с критикой работ Планка, например на 1-ом Сольвеевском конгрессе в 1911 г., способствовали полному прояснению области применимости закона излучения Рэля-Джинса. Как справедливо отмечено в биографии Джинса, написанной известным астрофизиком, доктором физико-математических наук А. В. Козенко, «акцентируя на этом внимание, Джинс в конечном итоге способствовал признанию теории Планка» [10]. Последние исследования различных аспектов спектра теплового излучения содержатся в работах [12–16].

*Статья поступила в редакцию 15.04.2019 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Howard J. N. John William Strutt, Third Baron Rayleigh // Applied Optics. 1964. Vol. 3. P. 1091.
2. Schaffer S. Rayleigh and the establishment of electrical standards // European Journal of Physics. 1994. Vol. 15. No. 6. P. 277–285.
3. Lewis M. F. Rayleigh waves – a progress report // European Journal of Physics. 1995. Vol. 16. No. 1. P. 1–7.
4. Waterstone J. J., Strutt J. W. On the physics of media that are composed of free and perfectly elastic molecules in a state of motion // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A. 1892. Vol. 183. P. 1–79.
5. Михельсон В. А. Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела // Журнал русского физико-химического общества, часть физика. 1887. Т. 19. Вып. 4. С. 79–99.

6. Strutt J. W. (Lord Rayleigh). On the Character of the Complete Radiation at a given Temperature // *The Philosophical magazine*. 1889. Vol. 27. P. 460–469.
7. Strutt J. W. (Lord Rayleigh) Remarks upon the law of complete radiation // *The Philosophical magazine*. 1900. Vol. 49. P. 539–540.
8. Jeans J. H. On the partition of energy between matter and ether // *The Philosophical magazine*. 1905. Vol. 10. P. 91–98.
9. Jeans J. H. Report on radiation and the quantum theory. London: “The Electrician” Printing & Publishing Co, 1914. 90 p.
10. Козенко А. В. Джеймс Хопвуд Джинс М.: Наука, 1985. 145 с.
11. Исаев В. И. М. Планк и история открытия квантов теплового излучения // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия Физика-математика*. 2018. № 1. С. 91–99.
12. Calcano-Roldan C., Salcido O., Santana D. A semi-analytical approach to black body radiation // *European Journal of Physics*. 2017. Vol. 38. No. 5. P. 055807.
13. Boyer T. H. Understanding the Planck blackbody spectrum and Landau diamagnetism within classical electromagnetism // *European Journal of Physics*. 2016. Vol. 37. No. 6. P. 065102.
14. Boyer T. H. Scaling, Scattering and blackbody radiation in classical physics // *European Journal of Physics*. 2017. Vol. 38. No. 4. P. 045101.
15. Investigation of black body radiation with the aid of a self-made pyroelectric infrared detector / Poprawski W., Gnutek Z., Radojewska E. B., Poprawski R. // *European Journal of Physics*. 2015. Vol. 36. No. 6. P. 065025.
16. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum hypothesis // *American Journal of Physics*. 2016. Vol. 84. P. 709–716.

#### REFERENCES

1. Howard J. N. John William Strutt, Third Baron Rayleigh. In: *Applied Optics*, 1964, vol. 3, pp. 1091.
2. Schaffer S. Rayleigh and the establishment of electrical standards. In: *European Journal of Physics*, 1994, vol. 15, no. 6, p. 277–285.
3. Lewis M. F. Rayleigh waves – a progress report. In: *European Journal of Physics*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 1–7.
4. Waterstone J. J., Strutt J. W. On the physics of media that are composed of free and perfectly elastic molecules in a state of motion. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 1892, vol. 183, pp. 1–79.
5. Mikhel'son V. A. [The experience of a theoretical explanation of the energy distribution in the spectrum of a solid body]. In: *Zhurnal russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva* [Journal of Russian Physical and Chemical Society], 1887, vol. 19, no. 4, pp. 79–99.
6. Strutt J. W. (Lord Rayleigh). On the character of the complete radiation at a given temperature. In: *The Philosophical magazine*, 1889, vol. 27, pp. 460–469.
7. Strutt J. W. (Lord Rayleigh) Remarks upon the law of complete radiation. In: *The Philosophical magazine*, 1900, vol. 49, p. 539–540.
8. Jeans J. H. On the partition of energy between matter and ether. In: *The Philosophical magazine*, 1905, vol. 10, pp. 91–98.
9. Jeans J. H. Report on radiation and the quantum theory. London, “The Electrician” Printing & Publishing Co, 1914. 90 p.
10. Kozenko A. V. *Dzheims Khopvud Dzhins* [James Hopwood Jeans]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 145 p.

11. Isaev V. I. M. [Planck and history of the discovery of the quanta of the heat radiation]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Fizika-matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2018, no. 1, pp. 91–99.
12. Calcaneo-Roldan C., Salcidone O., Santana D. A semi-analytical approach to black body radiation. In: *European Journal of Physics*, 2017, vol. 38, no. 5. pp. 055807.
13. Boyer T. H. Understanding the Planck blackbody spectrum and Landau diamagnetism within classical electromagnetism. In: *European Journal of Physics*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 065102.
14. Boyer T. H. Scaling, Scattering and blackbody radiation in classical physics. In: *European Journal of Physics*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 045101.
15. Poprawski W., Gnutek Z., Radojewska E. B., Poprawski R. Investigation of black body radiation with the aid of a self-made pyroelectric infrared detector. In: *European Journal of Physics*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 065025.
16. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum hypothesis. In: *American Journal of Physics*, 2016, vol. 84, 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. Дж. Рэлей и история открытия закона теплового излучения Рэля-Джинса // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2019. № 2. С. 96–105.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2019-2-96-105

#### FOR CITATION

Isaev V. I. J. W. Strutt (Lord Rayleigh) and the history of the discovery of the Rayleigh–Jeans law of thermal radiation. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 2, pp. 96–105.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2019-2-96-105