

УДК 530.145 (09)

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-56-67

Л. БОЛЬЦМАН И ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Исаев В. И.

Независимый исследователь

г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Целью данной работы является рассмотрение исторических обстоятельств открытия закона теплового излучения Стефана-Больцмана.

Процедура и методы. Проведён контент-анализ исторических обстоятельств открытия закона теплового излучения Стефана-Больцмана.

Результаты. Показано, что открытие закона Стефана-Больцмана явилось одним из важных эпизодов в предыстории открытия универсальной функции Кирхгофа. Открытие этой функции М. Планком в декабре 1900 г. привело к постепенному становлению квантовой теории, и предопределило развитие основного направления теоретической физики XX века – квантовой механики, а следом и квантовой электродинамики, квантовой теории поля и т. д., что фактически явилось началом новой физической эпохи – эпохи квантовой физики.

Теоретическая значимость. Обобщение и дополнение сведений об историческом развитии теории теплового излучения, которые будут полезны как при изучении квантовой теории, так и для создания специального курса «История квантовой теории».

Ключевые слова: теория теплового излучения, Кирхгоф, Стефан, Больцман, Планк

L. BOLTZMANN AND THE HISTORY OF THE DISCOVERY OF THE STEFAN–BOLTZMANN LAW OF THERMAL RADIATION

V. Isaev

*Independent researcher
Moscow, Russian Federation*

Abstract

Aim. The purpose of this work is to consider the historical circumstances of the discovery of the Stefan-Boltzmann law of thermal radiation.

Methodology. Use is made of a content analysis of the historical circumstances of the discovery of the Stefan-Boltzmann law of thermal radiation.

Results. It is shown that the discovery of the Stefan-Boltzmann law was one of the important episodes 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 formation of quantum theory and predetermined the development of the main direction of theoretical physics of the twentieth century, namely, quantum mechanics, and then quantum electrodynamics, quantum field theory, etc., which actually was the beginning of a new physical era, i.e. the era of quantum physics.

Research implications. Generalization and addition of information about the theory of thermal radiation study will be useful in the study of quantum theory, including the creation of a special course “History of Quantum Theory”.

Keywords: theory of thermal radiation, Kirchhoff, Stefan, Boltzmann, Planck

Введение

Актуальность предложенной темы определяется теми приложениями, которые квантовая механика получила за последнее десятилетие – необходимость 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. Однако студенты при изучении квантовой теории зачастую испытывают трудности, поскольку многие сложные вопросы интерпретации квантовой механики невозможно понять, не обладая знаниями хотя бы элементарного курса истории квантовой теории, который мы предлагаем читать студентам одновременно с изучением теоретической базы.

1. Экспериментальное открытие интегрального закона теплового излучения Й. Стефаном

После открытия закона теплового излучения Кирхгофа следующее важное достижение в теории теплового излучения связано с исследованиями австрийских физиков Йозефа Стефана (1835–1893), профессора Венского университета, и Людвиг Больцмана (1844–1906), в то время профессора университета в австрийском городе Граце.



Рис. 1 / Fig. 1. Й. Стефан / J. Stefan

Источник: Йозеф СТЕФАН [Электронный ресурс] // Элементы большой науки : [сайт]. URL: https://elementy.ru/biography/425903/Yozef_STEFAN (дата обращения: 20.05.2022)

Йозеф Стефан родился 24 марта 1835 г. в г. Санкт-Пельтен в Австрии (рис. 1). После окончания гимназии в г. Клагенфурте поступил в Венский университет, который окончил в 1857 г., и стал преподавать в нём, получив степень доктора физики в 1858 г. В 1863 г. стал профессором кафедры высшей математики и физики. В 1866 г. был назначен директором Института экспериментальной физики. В 1876–1877 гг. был ректором Венского университета и вице-президентом Австрийской академии наук. Имя Стефана носит Физический научно-исследовательский институт в Словении. Й. Стефан известен своими работами в различных областях физики: кинетической теории газов, оптике, акустике, теории теплового излучения. Изучал диффузию и теплопроводность газов, получил коэффициенты теплопроводности многих газов. В 1879 г. измеряя теплоотдачу платиновой проволоки при различных температурах установил пропорциональность излучаемой ею энергии четвёртой степени абсолютной температуры. Теоретическое обоснование этого закона было дано в 1884 г. учеником Стефана – Людвигом Больцманом.

В 1879 г. была опубликована работа Стефана «О связи между тепловым излучением и температурой» [1] в которой он, проанализировал ряд известных к тому времени экспериментальных исследований зависимости излучательной способности различных тел от температуры, выполненных ранее в 1817 г. французскими физиками П. Л. Дюлонгом и А. Т. Пти, в 1846 г. Ф. де ля Провостэ и П. Десеном, в 1847 г. Дж. Дрэпером и в 1864 г. Дж. Тиндалем, сформулировал закон пропорциональности интегральной излучательной способности тел (энергетической светимости) четвёртой степени температуры этих тел

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{К}^4)$ – коэффициент пропорциональности, названный впоследствии постоянной Стефана-Больцмана. Стефан ошибочно предполагал, что этот закон справедлив для любых тел, однако последовавшие позже исследования Больцмана показали, что на самом деле открытый Стефаном закон (1) справедлив для связи интегральной излучательной способности $\varepsilon(T)$ и температуры T только для абсолютно чёрных тел.

2. Теоретическое обоснование и вывод закона Стефана Л. Больцманом

Л. Больцман родился 20 февраля 1844 г. в Вене (рис. 2). В 1866 г. он окончил Венский университет, где учился у Йозефа Стефана и получил докторскую степень. В 1867 г. стал приват-доцентом Венского университета и работал ассистентом Й. Стефана. По рекомендации Стефана в 1869 г. Больцман был утверждён профессором теоретической физики в университете австрийского города Граца.



Рис. 2 / Fig. 2. Л. Больцман / L. Boltzmann

Источник: Больцман, Людвиг [Электронный ресурс] // Википедия : [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Больцман,_Людвиг (дата обращения: 20.05.2022)

В 1884 г. Больцман опубликовал две статьи в немецком физическом журнале “Annalen der Physik” под названием «О связи теплового излучения и вто-

рого начала термодинамики, открытой г. Бартоли» [2] и «Вывод закона Стефана о зависимости теплового излучения от температуры из электромагнитной теории света» [3].

В первой статье «О связи теплового излучения и второго начала термодинамики, открытой г. Бартоли» Больцман проанализировал работу итальянского физика А. Бартоли [4], посвящённую радиометру У. Крукса, в которой утверждалось, что можно представить идеальный насос с зеркально отражающими стенками, клапанами и поршнями, перемещениями поршней которого можно без затраты работы осуществить перевод некоторого количества тепла от менее нагретого тела к более нагретому, в противоречии со вторым законом термодинамики.

Проанализировав такой идеальный тепловой процесс, Бартоли пришёл к заключению, что избежать противоречия со вторым законом термодинамики можно, только предположив, что поршень всё же совершает работу, преодолевая силу, с которой тепловое излучение оказывает давление на поршень. Таким образом, Бартоли в 1876 г. путём термодинамических рассуждений, независимо от Максвелла, пришёл к выводу, что падающий свет оказывает давление на тела [5]. Однако Бартоли не смог вывести общую формулу, выражающую световое давление как функцию температуры [4; 5].

В первой статье [2], рассмотрев идеальный тепловой процесс, предложенный Бартоли, Больцман вывел общую интегральную формулу для зависимости светового давления от температуры T :

$$p(T) = \frac{\pi}{c} T \int \frac{\varepsilon(T)}{T^2} dT, \quad (2)$$

где $p(T)$ – давление, $\varepsilon(T)$ – интегральная излучательная способность тела, c – скорость света.

Во второй статье «Вывод закона Стефана о зависимости теплового излучения от температуры из электромагнитной теории света» [3], в которой содержался термодинамический вывод закона Стефана, Больцман выводит закон Стефана (1), исходя из открытой в 1873 г. английским физиком Дж. К. Максвеллом, создателем электромагнитной теории (рис. 3), связи между давлением $p(T)$ и плотностью электромагнитного излучения $u(T)$, а именно

$$p(T) = \frac{u(T)}{3} = \frac{4\pi\varepsilon(T)}{3c}. \text{ Внутренняя энергия излучательной полости есть:}$$

$$U(T) = u(T)V,$$

где V – объём цилиндра под поршнем. Используя известное термодинамическое соотношение $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_T - p$, подставляя в него значения $p(T)$ и $U(T)$ и интегрируя, окончательно получим:

$$\varepsilon(T) = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$. При выводе Больцман использовал общую формулу для светового давления (2), полученную им в предыдущей работе [2] из второго начала термодинамики, и показал, что закон Стефана (1) справедлив только для абсолютно чёрного тела.

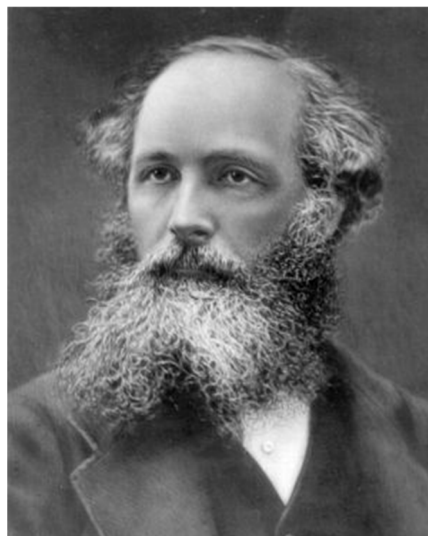


Рис. 3 / Fig. 3. Дж. Максвелл / J. Maxwell

Источник: Максвелл Джеймс Клерк [Электронный ресурс] // Публичная Библиотека : [сайт]. URL: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/M/MAKSVELL_Djems_Klerk/_Maksvell_Dj.K..html (дата обращения: 20.05.2022)

Больцман пишет: «Таким образом, из электромагнитной теории света и второго начала непосредственно следует стефановский закон зависимости теплового излучения от температуры, что определённо представляет собой замечательный результат, особенно если учесть очевидно предварительный во многих местах характер приведённых вычислений» [3].

В этой статье Больцман обосновал и обратное утверждение о том, что если принять закон Стефана (1) как исходную предпосылку, то из этого закона и из второго начала термодинамики следует открытая ранее в 1873 г. Максвеллом связь $p(T) = \frac{u(T)}{3} = \frac{4\pi\epsilon(T)}{3c}$, между давлением и плотностью электромагнитного излучения, что можно было рассматривать как дополнительное подтверждение правильности тогда ещё недавно созданной электромагнитной теории Максвелла.

Экспериментально существование светового давления пытались обнаружить многие физики, такие как А. Бартоли, Ф. Цельнер, А. Риги, У. Крукс и др., однако первым физиком, которому удалось это сделать, был русский фи-

зик Пётр Николаевич Лебедев (1866–1912) (рис. 4). Действие светового давления на твёрдые тела было доказано в 1899–1900 гг. в крайне сложных и искусственных экспериментах П. Н. Лебедева [6–9], представленных им в августе 1900 г. в докладе «Максвелло-Бартолиевы силы давления лучистой энергии» [7] на Международном физическом конгрессе в Париже.



Рис. 4 / Fig. 4. П. Н. Лебедев / P. Lebedev

Источник: Лебедев Петр Николаевич [Электронный ресурс] // ФИАН : [сайт]. URL: <https://www.lebedev.ru/ru/personalities/u-istokov/933> (дата обращения: 20.05.2022)

Доклад Лебедева на Международном физическом конгрессе в Париже произвёл большое впечатление на научную общественность. К. А. Тимирязев, профессор Московского университета, вспоминал: «Один из важнейших выводов теории Максвелла заключался в том, что свет, сверх своих обычных проявлений, должен оказывать механическое давление на тела, на которые он падает, но этот вывод оспаривался даже такими авторитетами, как лорд Кельвин. ... Мне не раз приходилось упоминать о том, как лорд Кельвин в 1903 г. обратился ко мне со словами: “Вы знаете, что я не поддавался на аргументы Максвелла, а вот перед опытами Вашего Лебедева пришлось сдаться ...”» [10].

Как отметил П. П. Лазарев, В. Вин в письме В. А. Михельсону сообщил, что Лебедев в 1912 г. «был предложен на Нобелевскую премию, но ему не удалось увидеть этого последнего признания его заслуг перед наукой и теперь остаётся только “память о гениальном физике, который владел искусством экспериментирования, как едва ли кто другой в наше время”» [11].

В статье «О связи теплового излучения и второго начала термодинамики, открытой г. Бартоли» [2] Больцман призвал других физиков заняться проблемой теплового излучения, отметив, что он делает это для того, «чтобы побудить либо самого г-на Бартоли, либо других физиков к дальнейшему обсуждению этого предмета, который, как мне представляется, в любом случае заслуживает большего внимания, чем ему уделялось до сих пор ...». Призыв Больцмана о развитии теории теплового излучения был воспринят физиками, и впоследствии работы по тепловому излучению, развивающие взгляды

Больцмана, были выполнены российскими физиками В. А. Михельсоном и Б. Б. Голицыным, а также немецкими физиками В. Вином, М. Планком и английскими физиками Дж. У. Стреттом (Рэлеем) и Дж. Джинсом.

3. Значение закона Стефана-Больцмана в теории теплового излучения

Значимость теоретического вывода закона Стефана, выполненного Больцманом, была так оценена немецким физиком О. Люммером: «Закон излучения, установленный для различных тел Стефаном, приобрёл свой истинный смысл лишь после того, как Больцман теоретически доказал, что он применим только к абсолютно чёрным телам» [12].

В своей статье о Больцмане известный голландский физик Г. А. Лоренц, один из создателей электронной теории материи, назвал работы Больцмана [2; 3] «жемчужиной теоретической физики» [12]. Лоренц так оценил значение работ Больцмана: «Исследованиям Больцмана ... я посвящу несколько слов, чтобы из большой сокровищницы выловить ещё одну найденную Больцманом жемчужину теоретической физики. Речь идёт о теории теплового излучения. Когда Бартоли высказал мнение, что некоторые явления лучеиспускания по-видимому противоречат второму закону термодинамики Больцман сразу же показал, каким образом можно опровергнуть данное заключение. Учтя вытекающее из теории Максвелла давление световых лучей, он не только достиг полного согласия со вторым законом, но и вывел из него открытый Стефаном закон, согласно которому полное излучение абсолютно чёрного тела пропорционально четвёртой степени его абсолютной температуры. Вывод закона Стефана явился первым крупным достижением в области теории излучения со времён Кирхгофа. Открытие девять лет спустя В. Вином закона смещения завершило тот этап развития теории излучения, на котором она продвинулась настолько, насколько это было возможно путём применения законов электродинамики и общей электромагнитной теории; для дальнейшего развития необходимо было уже привлечь специальные теории излучения, основывающиеся на определённых гипотезах о механизме явлений» [12], что и было сделано В. А. Михельсоном в 1887 г., В. Вином в 1896 г. и окончательно М. Планком в 1900 г. [14].

Открытие закона Стефана-Больцмана было одним из наиболее существенных достижений на долгом пути поисков универсальной функции Кирхгофа, однако в силу интегрального характера закона Стефана-Больцмана был получен только интегральный критерий для универсальной функции Кирхгофа, без какой-либо информации относительно конкретного вида спектральной функции $\varepsilon(\lambda, T)$.

Отметим также, что впоследствии Л. Больцман предпринял и осуществил целую программу важных научных исследований, имевших целью объяснить механическую теорию теплоты на основе молекулярно-атомистических пред-

ставлений, став одним из основателей статистической механики и молекулярно-кинетической теории материи, однако эта тема выходит за рамки данной заметки (см. труды Больцмана [13]).

Наиболее интересные из последних исследований различных аспектов спектра теплового излучения содержатся в статьях Т. Бойера, Н. Нойберга, В. Поправски и других учёных [15–24].

ЛИТЕРАТУРА

1. Stefan J. Über die Beziehungen zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur // Sitzungsberichte der Akademie des Wissenschaften (Wien). Ableitung 2. 1879. Bd. 79. S. 391–428.
2. Boltzmann L. Über eine von Hrnn Bartoli entdecte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatze // Annalen der Physik. 1884. Bd. 22. S. 31–39.
3. Boltzmann L. Ableitung des Stefanschen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie // Annalen der Physik. 1884. Bd. 22. S. 291–294.
4. Bartoli A. Sopra i movimente prodotti dalla luce e del calore e sopra il radiometro di Crookes. Firenze, Le Monnirt, 1876. 56 p.
5. Bartoli A. Il calorico raggiante e il secondo principio di termodinamica // Il Nuovo Cimento. 1884. Terza serie. Tomo XV. P. 193–202.
6. Лебедев П. Н. Максвелло-Бартолиевские силы давления лучистой энергии // Журнал Русского физико-химического общества. 1900. Т. XXXII, ч. физ., отд. 1, вып. 8. С. 211–217.
7. Lebedew P. Les forces de Maxwell-Bartoli dues a la Pression de la Lumière // Rapports Présentés au Congrès International de Physique. Paris: Gauthier-Villars, 1900. Vol. 2. P. 133–140.
8. Лебедев П. Н. Опытное исследование светового давления // Журнал Русского физико-химического общества. 1901. Т. XXXIII, ч. физ. С. 53–76.
9. Lebedew P. Untersuchungen uber die Druckkrafte des Lichtes // Annalen der Physik. 1901. Bd. 6. S. 433–458.
10. Тимирязев К. А. Петр Николаевич Лебедев // Тимирязев К. А. Сочинения. Т. 8. М.: Сельхозгиз, 1939. С. 313–319.
11. Лазарев П. П. П. Н. Лебедев и русская физика // Временник Общества им. Х. С. Леденцова. 1912. № 2. С. 65–78.
12. Lorentz H. A. Ludwig Boltzmann // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 1907. Bd. 9. S. 206–236.
13. Больцман Л. Молекулярно-кинетическая теория газов, термодинамика, статистическая механика // Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 9–330.
14. 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.
15. Calcano-Roldan C., Salcido O., Santana D. A semy analytical approach to black body radiation // European Journal of Physics. 2017. Vol. 38. No. 5. P. 055807. DOI: 10.1088/1361-6404/aa7d1d.
16. Boyer T. H. Understanding the Planck black body spectrum // European Journal of Physics. 2016. Vol. 37. No. 6. P. 065102. DOI: 10.1088/0143-0807/37/6/065102.

17. Boyer T. H. Scaling. Scattering and black body radiation in classical physics // *European Journal of Physics*. 2017. Vol. 38. No. 4. P. 0451001. DOI: 10.1088/1361-6404/aa6c18.
18. 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. DOI: 10.1088/0143-0807/36/6/065025.
19. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum mechanics // *American Journal of Physics*. 2016. Vol. 84. Iss. 9. P. 709–716. DOI: 10.1119/1.4955146.
20. Boyer T. H. Interference between source-free radiation and radiation from sources: Particle Boyer-like behavior for classical radiation // *American Journal of Physics*. 2017. Vol. 5. Iss. 9. P. 670–675. DOI: 10.1119/1.4991396.
21. Boyer T. H. The contrasting roles of Planck's constant in classical and quantum theories // *American Journal of Physics*. 2018. Vol. 86. Iss. 4. P. 280. DOI: 10.1119/1.5021355.
22. Boyer T. H. Blackbody radiation in classical physics: historical perspective // *American Journal of Physics*. 2018. Vol. 86. Iss. 7. P. 495. DOI: 10.1119/1.5034785.
23. Persson J. R Evolution of quasi-hystory of the Planck's blackbody radiation equation in a physics // *American Journal of Physics*. 2018. Vol. 86. Iss. 12. P. 887. DOI: 10.1119/1.5054005.
24. Jagannathan K. Anxiety and the equation: Understanding Boltzmann's Entropy // *American Journal of Physics*. 2019. Vol. 87. Iss. 9. P. 765. DOI: 10.1119/1.5116583.

REFERENCES

1. Stefan J. Über die Beziehungen zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. In: *Sitzungsberichte der Akademie des Wissenschaften (Wien). Ableitung 2*, 1879, bd. 79, S. 391–428.
2. Boltzmann L. Über eine von Hrnn Bartoli entdecte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatze. In: *Annalen der Physik*, 1884, bd. 22, S. 31–39.
3. Boltzmann L. Ableitung des Stefanschen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. In: *Annalen der Physik*, 1884, bd. 22, S. 291–294.
4. Bartoli A. Sopra i movimente prodotti dalla luce e del calore e sopra il radiometro di Crookes. Firenze, Le Monnirt, 1876. 56 p.
5. Bartoli A. Il calorico raggiante e il secondo principio di termodinamica. In: *Il Nuovo Cimento*, 1884, Terza serie. Tomo XV, P. 193–202.
6. Lebedev P. N. [Maxwell-Bartoli pressure forces of radiant energy]. In: *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva* [Journal of the Russian Physical and Chemical Society], 1900, vol. XXXII, Part of the Physics, Dep. 1, no. 8, pp. 211–217.
7. Lebedew P. Les forces de Maxwell-Bartoli dues a la Pression de la Lumière. In: *Rapports Présentés au Congrès International de Physique*. Paris, Gauthier-Villars, 1900. Vol. 2, pp. 133–140.
8. Lebedev P. N. [Experimental study of light pressure]. In: *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva* [Journal of the Russian Physical and Chemical Society], 1901, vol. XXXIII, Part of Physics, pp. 53–76.
9. Lebedew P. Untersuchungen uber die Druckkrafte des Lichtes. In: *Annalen der Physik*, 1901, bd. 6, S. 433–458.
10. Timiryazev K. A. [Petr Nikolaevich Lebedev]. In: Timiryazev K. A. *Sochineniya. T. 8* [Works. Vol. 8]. Moscow, Selhozgiz Publ., 1939, pp. 313–319.

11. Lazarev P. P. [P. N. Lebedev and Russian physics]. In: *Vremennik Obshchestva im. Kh. S. Ledentsova* [Vremennik of the H. S. Ledentsov's Society], 1912, no. 2, pp. 65–78.
12. Lorentz H. A. Ludwig Boltzmann. In: *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 1907, bd. 9, S. 206–236.
13. Boltzmann L. [Molecular-kinetic theory of gases, thermodynamics, statistical mechanics]. In: Boltzmann L. *Izbrannye Trudy* [Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pp. 9–330.
14. 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-Mathematics], 2018, no. 1, pp. 91–99. DOI: 10.18384/2310-7251-2018-1-91-99.
15. Calcano-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. DOI: 10.1088/1361-6404/aa7d1d.
16. Boyer T. H. Understanding the Planck black body spectrum. In: *European Journal of Physics*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 065102. DOI: 10.1088/0143-0807/37/6/065102.
17. Boyer T. H. Scaling. Scattering and black body radiation in classical physics. In: *European Journal of Physics*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 0451001. DOI: 10.1088/1361-6404/aa6c18.
18. 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. DOI: 10.1088/0143-0807/36/6/065025.
19. Nauenberg M. Max Planck and the birth of the quantum mechanics. In: *American Journal of Physics*, 2016, vol. 84, iss. 9, pp. 709–716. DOI: 10.1119/1.4955146.
20. Boyer T. H. Interference between source-free radiation and radiation from sources: Particle Boyer-like behavior for classical radiation. In: *American Journal of Physics*, 2017, vol. 5, iss. 9, pp. 670–675. DOI: 10.1119/1.4991396.
21. Boyer T. H. The contrasting roles of Planck's constant in classical and quantum theories. In: *American Journal of Physics*, 2018, vol. 86, iss. 4, pp. 280. DOI: 10.1119/1.5021355.
22. Boyer T. H. Blackbody radiation in classical physics: historical perspective. In: *American Journal of Physics*, 2018, vol. 86, iss. 7, pp. 495. DOI: 10.1119/1.5034785.
23. Persson J. R Evolution of quasi-history of the Planck's blackbody radiation equation in a physics. In: *American Journal of Physics*, 2018, vol. 86, iss. 12, pp. 887. DOI: 10.1119/1.5054005.
24. Jagannathan K. Anxiety and the equation: Understanding Boltzmann's Entropy. In: *American Journal of Physics*, 2019, vol. 87, iss. 9, pp. 765. DOI: 10.1119/1.5116583.

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 – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Independent Researcher (Moscow);
e-mail:vis961@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

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.

FOR CITATION

Isaev V. I. L. Boltzmann and the history of the discovery of the Stefan-Boltzmann law of thermal radiation. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 4, pp. 56–57.
DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-56-67.