

УДК 530.145 (09)

<http://doi.org/10.32603/2412-8562-2019-5-5-5-19>

Оригинальная статья/ Original article

## «Я не особо думал об этом»<sup>1</sup> (М. Планк и квантовая революция)

И. С. Дмитриев✉

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉isdmitriev@gmail.com

**Введение.** В философии науки традиционно большое внимание уделяется теоретическому знанию. Однако научные теории при этом рассматриваются, как правило, как нечто уже сформированное, тогда как анализ рождения и становления теории играет значительно меньшую роль. Среди разнообразных вопросов, возникающих на стыке философии и истории науки большое внимание исследователей привлекает вопрос о природе научных революций. В данной работе на примере открытия М. Планка изучается вопрос, может ли консерватор в науке совершить научную революцию?

**Методология и источники.** Методологически работа базируется на историко-научном анализе первоисточников (оригинальные публикации работ М. Планка, В. Вина, А. Пуанкаре, А. Эйнштейна, Л. Больцмана, относящиеся к периоду 1877–1912 гг.) и исследовательской литературы (А. Херманн, М. Бадино).

**Результаты и обсуждение.** В статье по результатам изучения первоисточников показано, что единственным желанием Планка в его исследовании излучения абсолютно черного тела и единственным оправданием его «Akt der Verzweilung» было получение «правильной» математической формулы «любой ценой». Что же касается научной революции 14 декабря 1900 г. – дата выступления Планка на заседании Немецкого физического общества с докладом «К теории распределения энергии излучения нормального спектра», – то это результат позднейшей исторической реконструкции. Причем эта «революция» и в 1900-м, и в последующие годы оставалась никем не замеченной, включая самого Планка. Таким образом, результатом исследования является новый взгляд на специфику вклада ученого, стоящего на консервативных научных позициях, в научную революцию.

**Заключение.** При определенных обстоятельствах, главными из которых оказываются характер решаемой задачи и готовность исследователя хотя бы отчасти «поступить по принципам» (или имитировать отход от традиции) ради формального успеха, консерватор может способствовать дальнейшему развитию событий, которые в итоге приведут к научной революции.

**Ключевые слова:** М. Планк, научная революция, теория излучения, квантование энергии.

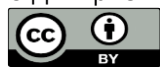
**Для цитирования:** Дмитриев И. С. «Я не особо думал об этом» (М. Планк и квантовая революция) // ДИСКУРС. 2019. Т. 5, № 5. С. 5–19. DOI: 10.32603/2412-8562-2019-5-5-5-19

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-011-00920а «Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ»).

**Конфликт интересов.** О конфликте интересов, связанном с данной публикацией, не сообщалось.

Поступила 19.06.2019; принята после рецензирования 04.09.2019; опубликована онлайн 25.11.2019

© Дмитриев И. С., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>1</sup> «Ich dachte mir eigentlich nicht viel dabei» [1, с. 218].

## **"I didn't really think about it" (M. Planck and the Quantum Revolution)**

**Igor S. Dmitriev**✉

*Saint-Petersburg State University, St Petersburg, Russia*

✉isdmitriev@gmail.com

**Introduction.** In the philosophy of science great attention is traditionally paid to theoretical knowledge. However, scientific theories are considered, as a rule, as something already formed, whereas the analysis of the birth and formation of the theory plays a much smaller role. Among the various issues that arise at the intersection of philosophy and history of science the great attention of researchers is attracted by the question about the nature of scientific revolutions. In this work, the question is studied by examining the Planck's discovery – whether a conservative in science to make a scientific revolution?

**Methodology and sources.** Methodologically, the work is based on historical and scientific analysis of primary sources (original publications of works of M. Planck, W. Wien, H. Poincare, A. Einstein, L. Boltzmann relating to the period from 1877 to 1912) and research literature (A. Hermann, M. Badino).

**Results and discussion.** The paper according the results of the study of primary sources shows that the only desire Planck in his study of blackbody radiation and the only justification for his "Akt der Verzweilung" (Act of delays) was to obtain a "correct" mathematical formula "at any price". As for the scientific revolution on 14 December 1900 – date of Planck's speech at a meeting of the German physical society report on "the Theory of the distribution of the radiation energy of the normal spectrum" – that is the result of later historical reconstruction. Moreover, this "revolution" in 1900, and in subsequent years remained unnoticed by anyone, including Planck himself. Thus, the result of the study is a new look at the specifics of the contribution of the scientist standing on conservative scientific positions in the scientific revolution.

**Conclusion.** Under certain circumstances, the main of which are the character of the task and readiness of the researcher, at least in part to "sacrifice principles" (or to simulate a departure from tradition) for the sake of formal success, the conservator may contribute to the further development of events that will eventually lead to the scientific revolution

**Key words:** Max Planck, scientific revolution, theory of radiation, quantization of energy.

**For citation:** Dmitriev I. S. "I didn't really think about it" (M. Planck and the Quantum Revolution). DISCOURSE. 2019, vol. 5, no. 5, pp. 5–19. DOI: 10.32603/2412-8562-2019-5-5-5-19 (Russia).

---

**Source of financing.** The work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-011-00920a "Revolutionary transformations in science as a factor in innovation processes: a conceptual and historical analysis").

**Conflict of interest.** No conflicts of interest related to this publication were reported.

*Received 19.06.2019; adopted after review 04.09.2019; published online 25.11.2019*

---

Мой принцип таков: тщательно продумать каждый шаг заранее,  
а потом, если уверен, что можешь взять на себя ответственность,  
идти вперед, не останавливаясь ни перед чем.

*Из письма М. Планка М. фон Лауэ (22 марта 1934 г.)*

**Введение.** В философии науки традиционно большое внимание уделяется теоретическому знанию. Однако научные теории при этом рассматриваются, как правило, как нечто уже сформированное, тогда как анализ рождения и становления теории играет значительно

меньшую роль. В данной статье на примере построения М. Планком теории излучения абсолютно черного тела, которую принято считать началом квантовой физики, обратимся к следующим вопросам: возможно ли создание революционной научной теории уже сформировавшимся и консервативно мыслящим ученым, и если «да», то каковы особенности когнитивного процесса и его результат в этой ситуации. В частности, интересна взаимосвязь формальной части теории Планка и ее когнитивного объяснительного потенциала.

В отличие от широко распространенного мнения, квантовая научная революция начала XX в., у истоков которой, как принято считать, стоял Макс Планк (Max Planck, 1858–1947), в своей начальной фазе стала результатом не революционности ее главного героя, но скорее следствием его склонности к компромиссам и даже капитуляции перед интеллектуальными трудностями, с которыми он столкнулся.

**Методология и источники.** Методологически работа базируется на поликонтекстуальном историко-научном анализе. В качестве источников использованы оригинальные публикации работ М. Планка, В. Вина, А. Пуанкаре, А. Эйнштейна, Л. Больцмана, относящиеся к периоду 1877–1912 гг.

**Результаты и обсуждение. Привилегии начального состояния.** Годы юности Планка совпали с бурным развитием термодинамики, простые и ясные законы которой покорили молодого ученого своей общностью, незыблемостью и универсальностью. Кроме того, Планка привлекало в этих законах то, что они освобождали науку от всяких антропоморфных ассоциаций. Его внимание сосредоточилось главным образом на втором начале термодинамики и концепции необратимости. Планк предложил считать процесс необратимым («естественным», по его терминологии) если он не может быть сделан полностью обратимым без компенсации, т. е. без внесения изменений в окружающую систему тела. «Решение вопроса о том, – вспоминал Планк, – является ли некоторый процесс обратимым или необратимым, зависит только от свойств начального и конечного состояний. Вам не нужно знать природу и ход процесса (über die Art und über den Verlauf des Vorganges). <...> При необратимых процессах конечное состояние, в известном смысле, выделено по отношению к начальному состоянию; природа, так сказать, отдает ему большее “предпочтение” (eine größere “Vorliebe”). <...> В качестве меры такого предпочтения у меня фигурирует энтропия Клаузиуса, а второе начало истолковывается как закон, утверждающий, что в любом естественном процессе сумма энтропии всех тел, участвующих в процессе, возрастает» [1, с. 13].

Интенсивные дебаты по поводу предложенной Л. Больцманом и оспариваемой «энергетистами», в частности, В. Оствальдом, статистической интерпретации второго начала термодинамики пришлось на 1980-е гг. Планк поначалу отрицал такую трактовку (которая, по его мнению, позволяла сомневаться в абсолютной справедливости закона возрастания энтропии, ибо допускала, хоть и с крайне малой, но конечной вероятностью, что энтропия изолированной системы может уменьшаться со временем) и был скептически настроен по отношению к атомной гипотезе. Как он пророчествовал в 1881 г., «несмотря на успехи атомной теории в прошлом, мы в итоге вынуждены будем отказаться от нее и признать непрерывность материи» [2, с. 475]. Это отношение к атомистике, хотя и несколько смягчилось к середине 1890-х гг., тем не менее еще некоторое время продолжало оставаться неизменным.

**Гипотеза «естественного излучения».** С 1896 г. М. Планк сосредоточился на решении задачи о спектральном распределении энергии равновесного излучения абсолютно черного тела<sup>2</sup>.

Для Планка эта задача представляла большой теоретический интерес, ибо касалась того, что «не зависело от специфики тел и веществ, того, что обязательно сохранит свое значение для всех времен и культур, даже внеземных и нечеловеческих» [3, т. 1, с. 599–600].

Вторая причина обращения (причем, не только Планка) к указанной проблеме имела прикладной характер. Формула, которую искал Планк, должна была описать наихудший из возможных источников освещения, а потому могла служить для оценки «нижнего порога» эффективности новых типов электрических ламп. Неслучайно поэтому имперское бюро стандартов (*Physikalisch-Technische Reichsanstalt*) проявило интерес к измерению равновесного распределения излучения.

К концу 1900 г. накопилось множество экспериментальных данных по спектральному составу такого излучения. Часть этих данных хорошо описывалась полуэмпирическим законом, предложенным Вильгельмом Вином (*W. Wien*, 1864–1928) в 1896 г.

Еще в 1893 г. Вин высказал мысль, что понятие энтропии и температуры можно распространить на тепловое излучение и, следовательно, равновесное излучение допустимо исследовать термодинамическими методами [4]. Позднее им было показано, что основная особенность излучения абсолютно черного тела заключается в том, что его спектральный состав является только функцией температуры. Вин рассматривал лучеиспускающее тело как газ, заключенный в идеально отражающую оболочку, все части которой поддерживаются одинаковой температуры. Если в этой оболочке проделать достаточно малое отверстие, то выходящее из оболочки излучение можно считать практически абсолютно черным. В июне 1896 г. Вин предложил полуэмпирическую формулу («закон распределения»), связывающую спектральную плотность энергии излучения  $u(\nu, T)$  (т. е. плотность энергии излучения на единицу частоты при данной температуре) с его частотой  $\nu$  и температурой  $T$ :  $u(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp(\beta \nu / T)^{-1}$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – эмпирически определяемые константы [5].

Однако эта формула не имела теоретического обоснования, что для Планка было совершенно неприемлемым. В поисках ее вывода из более общих физических законов он исходил из того, что нагретые тела излучают электромагнитные волны. Иными словами, Планк надеялся вывести формулу Вина непосредственно из законов электро- и термодинамики. Конкретная задача, решение которой искал Планк, сводилась к определению максимума энтропии системы, состоящей из моделирующих вещество совокупностей гармонических «осцилляторов». То есть излучающее тело моделировалось ансамблем вибраторов Герца, каждый из которых имел свою частоту  $\nu$  (от 0 до  $\infty$ ) и действовал при поглощении излучения как резонатор. Заметим, что Планк предпочитал говорить об осцилляторах, не отождествляя их с атомами или молекулами. Вообще модель Планка одновременно и проста, и абстрактна:

---

<sup>2</sup> Понятие абсолютно черного тела является идеализацией и означает тело, которое полностью поглощает падающее на него извне излучение, совершенно его не отражая. Моделью абсолютно черного тела может служить замкнутая полость. Разумеется, такое тело должно излучать энергию, иначе его температура будет возрастать до бесконечности. Чем выше температура абсолютно черного тела, тем больше энергии оно излучает, и в какой-то момент наступает термодинамическое равновесие, когда телом поглощается столько же энергии, сколько излучается. Отсюда возникают две задачи: определение равновесной температуры и определение спектра (т. е. распределения по энергиям) излучения. Концепция абсолютно черного тела была введена Кирхгофом в 1860 г.

пустое пространство, заполненное абстрактными линейными осцилляторами, которые уподоблялись акустическим резонаторам, камертонам или колебательным контурам со слабым затуханием и различными собственными частотами. А что представляют собой эти осцилляторы? Электроны, атомы, молекулы? У Вина хотя бы была ясность – осцилляторами были молекулы. У Планка такой ясности нет.

Поначалу он полагал, что для его исследования спектрального состава излучения абсолютно черного тела вполне достаточно общих законов максвелловской электродинамики, которым подчиняется взаимодействие между излучением и набором осцилляторов в замкнутой полости. При этом Планк исходил из того, что частота излучения, испускаемого осциллятором, будет отличаться от частоты излучения, поглощаемого им. Такая система способна без внешнего воздействия перейти в равновесное состояние.

Больцман внимательно следил за исследованиями Планка, относясь к ним весьма критически. Особенно не по душе австрийскому физiku пришлась мысль Планка о том, что осциллятор может односторонне, а потому необратимо, воздействовать на энергию окружающего его поля излучения. Больцман убедительно показал, что из уравнений Максвелла нельзя получить необратимые процессы.

Идеи Больцмана о связи процессов излучения и поглощения, о связи излучающего тела и поля излучения оказали заметное влияние на Планка, который писал в своей автобиографии: «Мои первоначальные тайные надежды на то, что излучение, испускаемое осциллятором, каким-нибудь характерным образом отличается от поглощаемого излучения, оказались обманчивыми. Осциллятор реагирует лишь на такое излучение, которое он сам испускает, и не проявляет ни в малейшей мере чувствительности к соседним областям спектра.

К тому же мое предположение о том, что осциллятор должен оказывать одностороннее и, следовательно, необратимое воздействие на энергию окружающего поля, вызывало энергичное возражение со стороны искушенного в этом вопросе Больцмана, который доказал, что по законам классической динамики каждый из рассматриваемых мною процессов может протекать также в прямо противоположном направлении» [1, с. 65].

Получалось, что одних законов механики и электродинамики недостаточно для решения проблемы спектрального состава излучения. Нужно было ввести гипотезу, не зависящую от уравнений Максвелла. Под влиянием критики со стороны Больцмана Планк ввел в свой анализ дополнительное предположение: гипотезу о «естественном излучении» (т. е. некогерентности гармонических колебаний, на которые можно разложить излучение).

Эта гипотеза в некоторых отношениях была аналогична гипотезе «молекулярного хаоса» в больцмановской кинетической теории газов. Вот пример рассуждения Планка из его статьи 1899 г. «Энтропия и температура теплового излучения»: «...уже начиная с теории газов, принято считать, что возникновение необратимости и определение энтропии становятся возможными только при очень большом числе молекул. Между тем это опасение легко опровергается, ибо принцип беспорядка (*Princip der Unordnung*), на котором основывается, по-видимому, всякий вид необратимости, в теории газов и в теории теплового излучения реализуется по-разному. Для газов это многочисленные весомые молекулы, создающие беспорядок благодаря нерегулярности их расположения и их скорости, а в пронизываемом лучами вакууме – это многочисленные пучки лучей, которые благодаря их нерегулярно меняющейся частоте и интенсивности создают возможность для возникновения энтропии. Для колебаний

одного-единственного резонатора эта нерегулярность выражается так же хорошо, как и для излучения в свободном объеме. Ибо в то время как в теории газов живая сила (*die lebendige Kraft*, т. е. кинетическая энергия. – И. Д.) одной-единственной молекулы является исчезающе малой величиной по сравнению с кинетической энергией даже малейшего количества газа, и, взятая сама по себе, не имеет никакого самостоятельного значения, в теории излучения энергия одного-единственного резонатора имеет тот же порядок величины, что и энергия свободного излучения, заключенная в очень большом по сравнению с размерами резонатора объеме. В соответствии с этим стационарное колебание резонатора, находящегося в стационарном поле излучения и обладающего определенным собственным периодом, представляет собою не единый элементарный процесс, т. е. простое синусоидальное колебание с постоянной амплитудой и фазой, – в таком случае энергия колебания, конечно, превращалась бы свободно в работу и никакую энтропию нельзя было бы определить, – но оно состоит в наложении друг на друга очень большого числа малых отдельных колебаний с приблизительно одинаковыми периодами и постоянными амплитудами и фазами (*sie besteht in einer Uebereinanderlagerung sehr vieler kleiner Einzelschwingungen mit nahezu gleichen Perioden und constanten Amplituden und Phasen*) или, что математически приводит в точности к тому же самому, представляет собой одно-единственное колебание с постоянной конечной амплитудой, но не регулярно изменяющейся фазой. Во всяком случае, можно говорить о беспорядке, а также и об энтропии, и о температуре (отдельно взятого. – И. Д.) резонатора» [6, с. 724–725].

Планк различает две области реальности: *микромир*, в котором физические величины (например, амплитуды и фазы осцилляторов) меняются быстро и случайно, не поддаются экспериментальному наблюдению и измерению (микробеспорядок), а потому заменяются средними значениями, и *макромир*, в котором физические величины (например, интенсивность излучения) меняются сравнительно медленно и могут определяться экспериментально. За этими рассуждениями Планка и его гипотезой «естественного излучения» просматривается убежденность ученого в том, что объектами исследования в физике являются величины, характеризующие макромир, тогда как все, что касается микромира может служить не более чем полезной, но ненадежной поддержкой в умозаключениях о причинах наблюдаемых явлений. Скажем, гипотеза «естественного излучения» была введена с целью устранить из рассмотрения все, что не отвечает наблюдаемой реальности, и тем самым облегчить расчеты и вывести точные законы природы. Микромир как таковой, по мысли Планка, не может представлять интерес для физика, и всякие допущения, касающиеся микрообъектов и микропроцессов, в итоге должны быть устранены из конечных результатов. Теория должна строиться так, чтобы ее выводы не зависели от гипотез относительно неподконтрольной физике микрореальности.

Здесь уместно отметить некоторое отличие в позициях Больцмана и Планка: для первого молекулярный беспорядок допускал появление (хоть и с малой вероятностью) низко-энтропийных состояний, тогда как для второго гипотеза «естественного излучения» служила средством элиминирования из рассмотрения всех «неестественных» процессов, т. е. процессов, ведущих к уменьшению энтропии.

Если ограничиваться задачей формально-математического описания явления, то гипотеза естественного излучения работала блестяще. Планк смог вывести уравнение, связывающее энергию осциллятора с интенсивностью излучения определенной частоты и сформировать понятие электромагнитной энтропии как функции энергии осциллятора.

Все это позволило ему получить закон распределения Вина для спектральной плотности равновесного излучения отдельного осциллятора. Казалось бы, он добился желаемого – закон Вина выведен из фундаментальных принципов физики.

**Правильная формула любой ценой.** Однако опыты О. Луммера и Э. Принсгейма (1897) не подтвердили выводов Вина. Оказалось, что его формула хорошо согласуется с экспериментом только в области коротких волн.

Что же касалось другой формулы, выражавшей спектральный состав излучения абсолютно черного тела, которую предложили Дж. У. Рэлей и Д. Х. Джинс, то она, как показали эксперименты Г. Рубенса и Ф. Курлбаума, оказалась асимптотически правильной для длинных волн, но неприменимой для коротких. В этой ситуации напрашивался вопрос: а не являются ли формулы Вина и Рэлей–Джинса предельными случаями некоторого общего закона, справедливого во всем интервале частот и температур?

Интерес Планка к проблеме излучения в известной мере был обусловлен результатами экспериментов Луммера и Принсгейма с одной стороны, и Рубенса и Курлбаума с другой. Эти результаты усилили интерес Планка к проблеме излучения. Эксперименты бросили серьезный вызов теории. В самом деле, почему, формула, казалось бы, строго выведенная из твердо установленных принципов физики, не отвечала экспериментальным данным? Сложившаяся ситуация, как воспринимал ее Планк, иллюстрировала мысль Гёте о том, что «человек заблуждается, покуда у него есть стремления (*der Mensch irrt, solange er strebt*)» [1, с. 25].

«...Я с рвением принялся за работу, – вспоминал он впоследствии. – В качестве прямого пути решения проблемы предлагалось использовать максвелловские уравнения электромагнитной теории света» [1, с. 66].

Планк полагал, что проблема расхождения теории и опыта лежит в неправильном определении энтропии осциллятора. В итоге, он пришел к новому выражению для спектральной плотности излучения, которое было им представлено 19 октября 1900 г. на собрании Немецкого физического общества (*Deutsche Physikalische Gesellschaft*):

$$u(\nu, T) = \alpha \nu^3 [\exp(b\nu/T) - 1]^{-1} \quad (*)$$

Эта формула прекрасно отвечала экспериментальным данным как для коротких, так и для длинных волн. Однако она не могла удовлетворить Планка, поскольку не была выведена теоретически, а потому имела в его глазах «очень ограниченное значение – только как счастливо отгаданная интерполяционная формула (*einer glücklich erratenen Interpolationsformel*)». «Поэтому я, – вспоминал Планк, – со дня ее нахождения был занят задачей установления ее истинного физического смысла (*einen wirklichen physikalischen Sinn*), и этот вопрос привел меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью, т. е. к Больцмановскому образу мыслей (*auf Boltzmannsche Ideengänge*). После нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота рассеялась и наметились новые, неподозреваемые ранее дали» [1, с. 29].

В 1931 г. в письме Р. Вуду Планк раскрыл некоторые психологические детали этой истории. Ключевыми словами в его рассказе являются, пожалуй, следующие: «теоретическое объяснение (формулы (\*). – И. Д.) должно было быть <...> найдено любой ценой, и никакая цена не была бы слишком высока (*eine theoretische Deutung <...> um jeden Preis gefunden werden [musste], und wäre er noch so hoch*). <...> Я пришел к этой точке зрения благодаря тому, что твердо держался обоих законов теории теплоты. Эти оба закона казались мне тем

единственным, что при всех обстоятельствах должно оставаться неизменным. В остальном я был готов к любой жертве в моих прежних физических убеждениях» [7, с. 31].

Таким образом, радикальным шагом для Планка стало принятие идей Больцмана (а, следовательно, и атомистики), с последующим их переносом из области молекулярно-кинетической теории в теорию излучения. Планк воспользовался (и, может быть, это более точное слово, чем «принял») больцмановской вероятностной концепцией энтропии и атомистикой только как эвристически полезными гипотезами, и только тогда, когда оказался перед необходимостью перейти от «*eine glücklich erratene Interpolationsformel*» к хоть какому-нибудь утверждению, имеющему реальный физический смысл, пусть даже это утверждение не вписывалось в его мировоззренческие установки. В этом, собственно, и заключалась вся революционность Планка, человека, воспитанного на традициях феноменологизма. Все остальное стало реализацией определенного математического формализма и принятия физической интерпретации полученных формул, предложенной другими физиками. Но тогда, в декабре 1900 г. он был готов пожертвовать всем ради формального решения вопроса. «Любой ценой»!

Впрочем, полного принятия больцмановских идей не произошло. Планк продолжал считать второе начало термодинамики «абсолютным», а не вероятностным законом, переосмысливая его статистическую интерпретацию, данную австрийским физиком, на свой лад. Он предложил знаменитое уравнение, известное сегодня как уравнение Больцмана или Больцмана–Планка:  $S = k \log W$ , где  $W$  – мера молекулярного беспорядка<sup>3</sup>.

Чтобы определить  $W$  в контексте теории излучения, необходимо было определить число способов распределения данного значения энергии по набору осцилляторов. С этой целью Планк обращается к методу, ранее разработанному Больцманом, который в статье 1868 г. предложил два вывода закона распределения частиц идеального газа по скоростям, установленного Максвеллом в 1859 г. [8].

Первый вывод основывался на анализе механических столкновений частиц газа, второй – на вероятности нахождения частицы в некоторой энергетической ячейке. Иными словами, Больцман предположил, что система, состоящая из  $n$  частиц и имеющая полную энергию  $E$  может быть разделена на  $p$  одинаковых энергетических ячеек (Планк использовал термин «элемент энергии (*Energieelement*)»)  $\epsilon$  и  $E = p\epsilon$ . Иными словами, Больцман ввел понятие о  $p$  возможных энергетических ячеек  $[0, \epsilon]$ ,  $[\epsilon, 2\epsilon]$ , ...,  $[(p-1)\epsilon, p\epsilon]$ .

Утверждение, что частица оказывается в  $i$ -й энергетической ячейке означает, что ее энергия лежит в интервале от  $(i-1)\epsilon$  до  $i\epsilon$ . Вероятность, что данная частица идеального газа располагается в  $i$ -й энергетической ячейке определяется отношением общего числа способов распределения остальных  $(n-1)$  частиц по энергетическим ячейкам (при том, что их полная энергия равна  $[p-i]\epsilon$ ) и общим числом способов распределения всех  $n$  частиц по  $p$  энергетическим ячейкам. В этой работе Больцмана наметился переход от теории, основанной на представлениях о соударениях частиц, к теории, базирующейся на комбинаторной статистике. Комбинаторно-статистический подход был затем развит Боль-

---

<sup>3</sup> Больцман вывел эту формулу для грамм-молекулы, и потому энтропия у него определялась с точностью до произвольной постоянной – при  $W$  стоял неопределенный множитель. Планк уточнил формулу Больцмана, показав, что множитель  $k$  является универсальной константой, а энтропия имеет абсолютное значение.



цманом в статье 1877 г. [9], в которой также было дано обоснование статистической трактовки второго начала термодинамики и понятия энтропии.

Каждое состояние газа может быть достигнуто многими способами, зависящими от того, сколько молекул обладает энергиями в интервале  $[0, \varepsilon]$ , сколько в интервале  $[\varepsilon, 2\varepsilon]$  и т. д., т. е. одно и то же макросостояние газа может достигаться разными наборами микросостояний (по терминологии Больцмана, разными комплексиями (*Complexion*)).

В знаменитой статье от 14 декабря 1900 г. Планк так описал свою расчетную процедуру: «Теперь нам необходимо обратиться к рассмотрению распределения энергии (*die Verteilung der Energie*) по отдельным резонаторам каждого класса (*die einzelnen Resonatoren innerhalb jeder Gattung*»), и прежде всего к распределению энергии  $E$  по  $N$  резонаторам с частотой  $\nu$ » [10, с. 239–240].

То есть излучающее тело моделируется Планком набором не взаимодействующих друг с другом осцилляторов (резонаторов), которые делятся на совокупности (классы), и в каждую совокупность входят резонаторы одинаковой частоты («*den N Resonatoren  $\nu$  etwa die Energie  $E$ , den  $N'$  Resonatoren  $\nu'$  die Energie  $E'$  etc.*»). Полная энергия системы  $E_0$  выражается суммой:  $E_0 = E + E' + \dots$

Продолжим цитирование: «Если  $E$  считается неограниченно (*unbeschränkt*) делимой величиной, то такое распределение возможно бесконечным числом способов. Мы будем, однако, полагать, – и это является наиболее существенной особенностью всего расчета<sup>4</sup>, – что величина  $E$  может быть составлена из точно определенного числа конечных равных частей, и используем при этом мировую постоянную  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  [эрг·сек]. Эта постоянная, умноженная на общую частоту  $\nu$  резонаторов, дает нам элемент энергии  $\varepsilon$  в эргах; а деля  $E$  на  $\varepsilon$ , мы получим число  $P$  этих элементов энергии, которые должны быть распределены между  $N$  резонаторами. Если полученное таким образом отношение не будет равно целому числу, мы примем для  $P$  ближайшее целое значение. Ясно, что распределение  $P$  элементов энергии по  $N$  резонаторам может быть произведено только конечным и точно определяемым числом способов. Каждый из этих способов распределения мы назовем «комплексией (*Complexion*)», используя выражение, введенное г-ном Больцманом для аналогичной величины» [10, с. 240].

Заметим, Планк в приведенном фрагменте говорит о распределении «элементов энергии» по набору резонаторов одинаковой частоты. Продолжая рассуждение, он приводит формулу для вычисления числа способов такого распределения:

$$(N + P - 1)! / (N - 1)! P!$$

Сказанное означает, что существует множество способов распределения энергии излучающего тела  $E_0$  по возможным частотам, однако вероятности их реализации различны. Вероятность  $W(E_i)$  того, что некоторая энергия  $E_i$  будет отвечать частоте  $\nu_i$ , определяется по Планку числом способов распределения  $P_i$  «элементов»  $\varepsilon_i = h\nu_i$  этой энергии по  $N_i$  резонаторам, а именно, формулой:

<sup>4</sup> Планк, заметим, очень точно выбирает слова: “*der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung*”, т. е. речь идет именно о *Berechnung*, вычислении, расчете.

$$W(E_i) = (N + P - 1)! / (N - 1)! P!$$

Поскольку величина «элементов энергии» зависит от частоты, то деление энергии  $E_i$  на «элементы»  $\varepsilon_i$  для каждого класса резонаторов будет различным. Общая вероятность распределения энергии излучающего тела по частотам определяется (в силу предположения о независимости резонаторов друг от друга) произведением:

$$W = \prod_i W(E_i).$$

Как видим, Планк оперировал числом «комплексий» (т. е. числом способов распределения энергии по резонаторам некоторого класса), а не числом «комплексий» (микросостояний), отвечающих некоторому распределению частиц по одинаковым энергетическим ячейкам, как это делал Больцман. Иными словами, если у Больцмана макросостояние определялось числом микросостояний, т. е. числом способов распределения молекул по энергетическим ячейкам фазового пространства, то в теории излучения Планка вычислялось распределение энергии по частотам, которое и определяло макросостояние излучателя, тогда как распределение энергии по резонаторам данного класса (т. е. одной и той же частоты) определяло одно из микросостояний системы. Можно сказать иначе: у Больцмана микросостояние – это распределение молекул по энергетическим ячейкам, тогда как в теории Планка энергия распределена по частотам, а затем энергия, отвечающая резонаторам одинаковой частоты, делится далее на  $P$  частей («элементов»), которые распределяются по разным резонаторам данной частоты. В итоге общий формальный прием, использованный Больцманом, Планк сохранил, но вычислительная схема и физическая модель тела у него иная, так сказать, многоуровневая (подр. см. [11]).

Как известно, характерной особенностью теплового движения молекул газа является его хаотичность, беспорядочность. По Больцману, состояния молекулярной системы называются беспорядочными (или случайными), если они осуществляются большим (в пределе бесконечно большим) числом способов. Иными словами, понятие беспорядка в этом случае относится к ансамблю молекул в данный момент времени. В планковской теории излучения «беспорядок» характеризует временную эволюцию отдельных осцилляторов. Именно это обстоятельство и позволило Планку ввести понятие энтропии отдельного осциллятора, тогда как в теории Больцмана понятие энтропии одной молекулы лишено смысла. Вместе с тем Планк, разумеется, осознавал, что временную эволюцию одного осциллятора можно представить с помощью комбинаторного описания множества одинаковых осцилляторов (т. е. среднее по времени заменить средним по ансамблю).

И еще одно важное отличие подходов Больцмана и Планка. Больцман разделил пространство энергии (в статье 1868 г.) и фазовое пространство (в работе 1877 г.) на произвольно малые ячейки, размер которых не имел никакого значения и в пределе обращался в ноль, тем самым не входя в конечные формулы; в теории Планка 1900 г., наоборот, размер элементарной ячейки (*Elementargebiete*) был фиксирован, определялся универсальной константой, которая входила в окончательное выражение для энергетического спектра излучения<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Позднее Планк рассматривал постоянную  $h$  как элементарный участок двумерного фазового пространства (для случая одномерного осциллятора). Независимость величины этого участка от частоты обуславливает равновероятность комплексий, используемых для вычисления энтропии.

Но самое главное различие в подходах Больцмана и Планка в контексте рассматриваемой темы состоит в том, что Планк воспользовался лишь формальной стороной больцмановского статистического подхода, не касаясь микроскопической картины процесса испускания энергии осциллятором. Более того, Планк воспользовался комбинаторно-статистическим подходом Больцмана именно потому, что математический формализм этого подхода не зависел от выбора физической модели, описывающей процесс излучения. Планк мог бы, перефразируя известное высказывание И. Ньютона, заявить: я дал формальный вывод спектральной формулы излучения абсолютно черного тела из «первых принципов» плюс некоторое математическое допущение, и выведенная мною формула прекрасно согласуется с экспериментальными данными при всех частотах, а что касается реальных физических процессов на микроуровне, то на этот счет, извините, “*Hypotheses non fingo*”.

**Заключение. Совершил ли Планк научную революцию?** Таким образом, единственным желанием Планка в его исследовании излучения абсолютно черного тела и единственным оправданием его «*Akt der Verzweilung*» было получение «правильной» математической формулы «*um jeden Preis*». Что же касается научной революции, датируемой с легкой руки М. фон Лауэ 14 декабря 1900 г., т. е. датой выступления Планка на заседании Немецкого физического общества с докладом «К теории распределения энергии излучения нормального спектра (*Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*)», то это результат позднейшей исторической реконструкции. Причем эта «революция» и в 1900-м, и в последующие годы оставалась никем не замеченной, включая самого Планка, что неудивительно, поскольку ни в одной из своих работ 1900–1901 гг. он не отмечал фундаментальный факт: энергия осциллятора квантуется, т. е. представляет собой целое кратное от  $h\nu$ . Более того, между 1901 и 1906 гг. Планк вообще ничего не писал по поводу теории излучения.

Величина, которая впоследствии была названа «квантом действия» (“*das elementare Wirkungsquantum*”), была введена Планком исключительно с целью применить комбинаторику в теории излучения примерно в той манере, в какой Больцман использовал ее в кинетической теории газов. В свою очередь обратиться к больцмановской статистической концепции энтропии Планка вынуждала необходимость дать теоретический вывод формулы (\*), т. е. повысить ее когнитивный статус от «счастливо отгаданной» до теоретически обоснованной. Однако в полной мере сделать это ему не удалось, поскольку пришлось вводить в теорию искусственное допущение, а именно: энергия излучения не может быть разделена между  $N$  осцилляторами бесконечно большим числом способов, а лишь на точно определенное число равных частей  $\varepsilon = h\nu$ .

А. Эйнштейн, детально проследив ход рассуждений Планка, справедливо отметил их непоследовательность. Эйнштейн указал, что «теоретический» вывод Планком закона излучения (\*) состоит из двух частей (двух блоков аргументации) – электродинамической и термодинамической, – которые между собой логически несовместимы по следующей причине: в электродинамической части выводы основываются на теории Максвелла и предположении, что энергия осциллятора является непрерывно изменяющейся величиной, тогда как в статистической части та же самая энергия рассматривается как дискретная величина, способная принимать лишь значения, кратные  $h\nu$ . «Если энергия резонатора, – пояснял свою мысль Эйнштейн, – может меняться только скачкообразно, то для определения средней энергии резонатора, находящегося в поле излучения, нельзя применять обычную теорию электричества...». Поэтому теория Планка обязана исходить из предположения, что

«хотя теория Максвелла неприменима к элементарным резонаторам, средняя энергия элементарного резонатора, находящегося в поле излучения, равна энергии, вычисленной по максвелловской теории электричества» [12, с. 203], что не соответствует действительности.

Различие в подходах Планка и Эйнштейна к постановке и решению физических проблем проявилось, в частности, в весьма резком полемическом замечании последнего по поводу доклада Планка на I Сольвеевском конгрессе (1911): «Мне чужд тот способ, которым Планк применяет уравнение Больцмана (связывающее энтропию и вероятность. – И. Д.), вводя вероятность состояния  $W$  и не давая этой величине физическое определение. Если так идти дальше, то уравнение Больцмана не имеет никакого физического содержания. То обстоятельство, что  $W$  принимается равным числу комбинаций, принадлежащих состоянию, тут ничего не меняет, ибо не объясняется, что означает утверждение о равной вероятности двух каких-либо комбинаций. Даже если удастся так определить комбинацию, что выведенная из больцмановского уравнения энтропия будет соответствовать обычному определению, мне кажется, что использованный Планком метод введения принципа Больцмана не позволит сделать какие-то выводы о справедливости элементарной теории на основе совпадения ее данных с экспериментально установленными термодинамическими свойствами системы» [3, т. 2, с. 287].

Что хотел сказать Эйнштейн? Фактически он заявил Планку, что формальная подгонка теории под эксперимент еще не гарантирует правильности самой теории, тем более, если в основу этой теории закладываются довольно сомнительные доводы. (Кстати, часто встречаемые в литературе цитаты из работ Эйнштейна, свидетельствующие о его восторженном отношении к идеям Планка, следует принимать *cum grano salis*).

Впрочем, и сам Планк не был удовлетворен своим подходом и неоднократно, хотя и безуспешно, предпринимал попытки «как-либо (*irgendwie*) ввести квант действия в систему определений классической физики» [1, с. 24].

В 1912 г. Планк рассматривает поглощение излучения с точки зрения электродинамики, а испускание света и стационарное распределение лучистой энергии – с позиций статистической физики. Он прямо и ясно формулирует свою цель – построить теорию, «включающую определенные гипотетические элементы, и которая, однако, как я полагаю, свободна от внутренних противоречий и не очень далеко удалялась бы от ядра классической электродинамики и электронной теории (*gewisse hypothetische Elemente enthalten, die aber, wie ich glaube, von inneren Widersprüchen frei sind, und ausserdem sich von dem Kern der klassischen Elektrodynamik und Elektronentheorie nicht weiter entfernen*)» [13, с. 643]. И что же предлагает Планк?

Рассмотрев трудности теоретического обоснования своей спектральной формулы, он формулирует так называемую «вторую квантовую гипотезу», суть которой состояла в том, что поглощение излучения полагалось процессом непрерывным, а испускание дискретным. Наконец, в 1914 г. он выдвигает еще одну, «третью квантовую теорию», согласно которой и испускание, и поглощение рассматриваются как непрерывные процессы [14], а квантовые эффекты возникают только благодаря столкновениям.

И это при том, что всего лишь через несколько недель после окончания I Сольвеевского конгресса А. Пуанкаре, который, заметим попутно, был на четыре года старше Планка, показал, что гипотеза квантов – единственная гипотеза, приводящая к планковскому закону излучения, и что наличие дискретности в вероятностной функции энергетического рас-

пределения с необходимостью вытекает из любого закона излучения, если он приводит к конечности полного излучения [15].

Многие историки науки полагают, что основы квантовой теории как физической теории были заложены А. Эйнштейном в 1905–1907 гг. Насколько это мнение обоснованно, здесь нет ни возможности, ни необходимости обсуждать. Важнее в контексте темы настоящей статьи, что создание квантовой теории – это не результат внезапного индивидуального озарения (инсайта или *Gestalt switch*), оформленного затем в виде доклада с последующей публикацией, но итог длительного и сложного процесса.

И все-таки, возвращаясь к исходному вопросу статьи: может ли консерватор совершить научную революцию? Если ограничиться одним, но весьма показательным случаем М. Планка, на этот вопрос можно дать следующий ответ: при определенных обстоятельствах, главными из которых оказываются характер решаемой задачи и готовность исследователя хотя бы отчасти «поступиться принципами» (или имитировать отход от традиции) ради формального успеха, консерватор может, создавая те или иные формализованные конструкции, способствовать дальнейшему развитию событий, которые *в итоге* приведут к научной революции. Планк оперировал несколькими научными ресурсами (электродинамика, термодинамика, кинетическая теория газов), т. е. несколькими исследовательскими традициями, постоянно меняя в процессе поиска решения поставленной задачи (под влиянием критики коллег и экспериментальных данных), используемые теоретические допущения и математические методы. Именно в игре разнообразных концептуальных ресурсов родилась формальная математическая конструкция, которой затем было суждено обрести физическую трактовку, что и стало началом научной революции в физике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Planck M. Vorträge, Reden, Erinnerungen / hrsg. von Hans Roos; Armin Hermann. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
2. Planck M. Verdampfen, Schmelzen und Sublimiren // Annalen der Physik und Chemie. (Neue Folge). 1882. Bd. 15 (251). S. 446–475.
3. Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vorträge / hrsg. vom Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften und der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften. 1. Aufl. Braunschweig: Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, 1958. Bd. I: XV. Bds. I–III.
4. Wien W. Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie // Annalen der Physik und Chemie (Neue Folge). 1893. Bd. 49 (285). S. 633–641.
5. Wien W. Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers // Annalen der Physik und Chemie (Neue Folge). 1896. Bd. 58 (294). S. 612–669.
6. Planck, M. Entropie und Temperatur strahlender Wärme // Annalen der Physik (Vierte Folge). 1900. Bd. 1 (306). S. 719–737.
7. Hermann A. Frühgeschichte der Quantentheorie (1899–1913). Mosbach in Baden: Physik Verlag, 1969.
8. Boltzmann L. Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten // Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, 2 Abth. 1868. Bd. 58. S. 517–560.
9. Boltzmann L. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht // Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, 2 Abth. 1877. Bd. 76. S. 373–435.

10. Planck M. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum // Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft. 1900. Bd. 2. S. 237–245.

11. Badino M. The odd couple: Boltzmann, Planck and the application of statistics to physics (1900–1913) // Annalen der Physik (Achte Folge). 2009. Bd. 18 (521). S. 81–101.

12. Einstein A. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption // Annalen der Physik (Vierte Folge). 1906. Bd. 20 (325). S. 199–206.

13. Planck M. Über die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung // Annalen der Physik. 1912. Bd. 37 (342). S. 642–656.

14. Planck M. Eine veränderte Formulierung der Quantenhypothese // Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. 1914. Bd. 34. S. 918–923.

15. Poincaré H. Sur la théorie des quanta // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences de Paris. 1911. T. 153. P. 1103–1108.

### **Информация об авторе.**

**Дмитриев Игорь Сергеевич** – доктор химических наук (1993), директор Музея-архива Д. И. Менделеева Санкт-Петербургского государственного университета, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, 190034, Россия. Автор 155 научных публикаций. Сфера научных интересов: история науки. E-mail: isdmitriev@gmail.com

### **REFERENCES**

1. Planck, M. (2001), *Vorträge, Reden, Erinnerungen*, hrsg. von H. Roos and A. Hermann, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, DEU.

2. Planck, M. (1882), "Verdampfen, Schmelzen und Sublimiren", *Annalen der Physik und Chemie*. (Neue Folge), Bd. 15 (251), S. 446–475.

3. Planck, M. (1958), *Physikalische Abhandlungen und Vorträge* / hrsg., vom Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften und der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften. 1. Aufl. Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, DEU, Bd. I: XV. Bds. I–III.

4. Wien, W. (1893), "Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie", *Annalen der Physik und Chemie* (Neue Folge), Bd. 49 (285), S. 633–641.

5. Wien, W. (1898), "Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers", *Annalen der Physik und Chemie* (Neue Folge), Bd. 58 (294), S. 612–669.

6. Planck, M. (1900), "Entropie und Temperatur strahlender Wärme", *Annalen der Physik* (Vierte Folge), Bd. 1 (306), S. 719–737.

7. Hermann, A. (1969), *Frühgeschichte der Quantentheorie (1899–1913)*, Physik Verlag, Baden, DEU.

8. Boltzmann, L. (1868), "Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten", *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe*, 2 Abth., Bd. 58, S. 517–560.

9. Boltzmann, L. (1877), "Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht", *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe*, 2 Abth., Bd. 76, S. 373–435.

10. Planck, M. (1900), "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum", *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft*, Bd. 2, S. 237–245.

11. Badino, M. (2009), "The odd couple: Boltzmann, Planck and the application of statistics to physics (1900–1913)", *Annalen der Physik* (Achte Folge), Bd. 18 (521), S. 81–101.

12. Einstein, A. (1906), "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik* (Vierte Folge), Bd. 20 (325), S. 199–206.

13. Planck, M. (1912), "Über die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung", *Annalen der Physik* (Vierte Folge), Bd. 37 (342), S. 642–656.

14. Planck, M. (1914), "Eine veränderte Formulierung der Quantenhypothese", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*. Bd. 34. S. 918–923.

15. Poincaré, H. (1911) "Sur la théorie des quanta", *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences de Paris*, vol. 153, pp. 1103–1108.

**Information about the author.**

**Igor S. Dmitriev** – Dr. Sci. (Chemistry) (1993), Director of D. I. Mendeleev Museum and Archive, Saint Petersburg State University, 7/9 Universitetskaja emb., St Petersburg 199034, Russia. The author of 155 scientific publications. Area of expertise: history of science. E-mail: isdmitriev@gmail.com