1958 г. Ноябрь Т. LXVI, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

ТВОРЧЕСКИЙ ПУТЬ М. ПЛАНКА

Max Planck. Physikalische Abhandlungen und Vorträge. Band I. Pp. XV+773; Band. II. Pp. XI+716; Band III.Pp. XI+426.—Verlag Friedr. Vieweg und Sohn. Braunschweig. 1958. Preis DM. 150.

К столетию со дня рождения М. Планка, исполнившемуся 23 апреля текущего 1958 года, Объединение германских физических обществ и Общество содействия наукам имени Макса Планка (Max Planck-Gesellschaft zur Fördegung der Wissenschaften e. v.) подготовили, а известное издательство Фивега в Брауншвейге выпустило собрание оригинальных работ М. Планка. Редакционный Комитет, подготовивший это издание, состоял из Дитриха Гана, Макса Лауэ и Вильгельма Вестфаля. Предисловие к первому тому подписано учеником и другом Планка М. Лауэ, который, очевидно, и являлся главным редактором издания. Как уже сказано, издание было предпринято от имени ряда обществ, в том числе Общества имени М. Планка. Вероятно, не лишне будет пояснить, что представляет собой это Общество. Как известно, в начале XX столетия в Германии возникло так называемое «Общество для содействия развитию наук имени императора Вильгельма» («Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung del Wissenschaften»). Созданное на средства крупной промышленности, это Общество представляло собой нечто вроде неофициальной Академии. Оно основало и финансировало ряд исследовательских институтов. Первым президентом этого Общества был историк А. Гарнак. Вторым — с 1930 по 1937 гг.—М. Планк. Наконец, уже после второй мировой войны президентом этого Общества вновь стал М. Планк и был им до начала 1946 г., а в 1946 г. само Общество было переименовано и получило имя М. Планка.

Возвращаясь к характеристике собрания работ М. Планка, отметим, что в это собрание включены только опубликованные оригинальные работы М. Планка и некоторые его лекции и доклады общефизического и философского содержания. Учебники (Термодинамика, Теория излучения, пять томов учебника Теоретической физики) и монографии (Принцип сохранения энергии, восемь лекций по теоретической физике) в данное собрание не включены. Мы с удовлетворением можем отметить, что все без исключения перечисленные книги М. Планка имеются в русском переводе, а его учебник Термодинамики издавался на русском языке по крайней мере дважды.

Чтобы закончить характеристику внешней стороны рецензируемого собрания работ Планка, укажем, что в первых двух томах помещены приблизительно в хронологическом порядке оригинальные исследования в области теоретической физики; третий том занят статьями общефизического, исторического и философского содержания. Несмотря на то, что большинство статей воспроизведено фотомеханическим путем, внешность издания очень аккуратна. Только в тех случаях, когда та или иная статья была опубликована в тетрадях журналов большого формата (например, Physikalische Zeitschrift или Naturwissenschaften) при уменьшении до формата данного издания шрифт статей получился слишком мелким.

Пользуясь собранием работ Планка, мы можем проследить его творческий путь. В одной из своих автобиографических статей Планк пишет, что с юных лет его больше всего интересовали в физике наиболее общие законы, имеющие значение для всех явлений природы [III, 255*)]. Так как годы его юности совпали со временем установления основных начал термодинамики, то неудивительно, что именно на этой области физики, которая как раз и характеризуется своей чрезвычайной общностью, сосредоточились его первые научные интересы. Еще в школьные годы на него произвело неизгладимое впечатление знакомство с законом сохранения

*) В дальнейшем будут даваться ссылки на реферируемое собрание работ Планка: римская цифра означает том, арабская—страницу.

энергии. В университете не меньшее впечатление произвело на него второе начало термодинамики, которое он изучал самостоятельно по работам Клаузиуса. Вполне понятно поэтому, что первые две работы Планка, которыми открывается первый том данного собрания работ, были посвящены именно принципиальным основам термодинамики. Эти две работы — его докторская диссертация «О втором начале механической теории тепла» (1879) и так называемая абилитационная работа (Habilitationsschrift) «Состояния равновесия изотропных тел при различных температурах» (1880), представленная, по обычаю германских университетов, Мюнхенскому университету для получения права преподавания в университете. Суть этих работ можно коротко формулировать, как обоснование и применение важнейшей термодинамической функции — энтропии. Хотя понятие энтропии было введено еще в 1866 г. Клаузиусом, ни сам Клаузиус и никто вообще до Планка не пользовался этим понятием в применениях термодинамики к решению конкретных физических задач. Обычный метод, развитый главным образом Клапейроном и Клаузиусом, состоял в построении для каждого случая обратимого кругового процесса.

Что касается термодинамических величин, то из них в этих первых работах по существу применялась лишь одна — температура. Значительно позднее, в 1904 г., в статье, посвященной Больцману (Boltzmann Festschrift, Leipzig, 1904; в собрании работ М. Планка т. II, стр. 79—88), Планк очень ясно формулировал недостаток понятия температуры и преимущество энтропии: в то время как о температуре можно говорить только в случае состояния равновесия, понятие энтропии в статистической термодинамике может быть определено для всевозможных процессов. В этой интересной статье Планк подробно разбирает статистическое определение энтропии по Больцману и три статистических определения по Гибсу. В своих первых работах, однако, Планк еще не пользовался статистикой и вводил энтропию и другие термодинамические функции чисто феноменологически. Что касается применения термодинамических функций вместо циклов, то, как известно, этот метод постепенно внедрялся в термодинамику и в наше время совершенно вытеснил метод циклов. Работы Гиббса, «открытые» Оствальдом уже в начале XX столетия, в то время Планку не были известны. В своей научной автобиографии Планк выражает по этому поводу сожаление и признает приоритет Гиббса (III, 379).

Начало научной деятельности принесло Планку некоторые огорчения. Дело в том, что его работы по основам термодинамики на первых порах остались просто не замеченными. Планк высказывает предположение, что его диссертация была даже не понята членами факультета, присудившими ему ученую степень не на основании диссертации, а благодаря той репутации, которую он себе создал своим участием в специальных семинарах и т. п. Не смущаясь этим, Планк продолжал работать в том же направлении и с успехом применил термодинамический метод в своих известных работах по теории слабых электролитов, по электрохимии и другим физико-химическим проблемам. Эти работы занимают более половины первого тома реферируемого собрания работ и, несмотря на то, что все они вошли в учебник термодинамики М. Планка, знакомство с оригинальными работами представляет выдающийся интерес для изучающих физическую химию и термодинамику.

В этот период увлечение термодинамикой оказало влияние и на общефизическое мировоззрение Планка. Будучи ревностным поборником феноменологического метода термодинамики, Планк в первой половине своей научной деятельности скептически относился к атомистике. Свое отношение к этим проблемам, волновавшим физиков в конце прошлого и в первые годы нынешнего столетия, лучше всего охарактеризовал сам Планк в своей научной автобиографии. Вспоминая о борьбе между самым ярким представителем атомистики Л. Больцманом и ее противником В. Оствальдом, Планк писал:

«Понятно, что эта борьба, в которой противостояли друг другу Больцман и Оствальд, была достаточно оживленной и что она дала повод к многочисленным ярким эффектам, так как оба противника по способности наносить удары и врожденному остроумию были одинаково сильны. Сам я при этом... мог играть только роль секунданта Больцмана, услуги которого последним не только не были признаны, но и не считались желательными. Ибо Больцман хорошо знал, что моя точка зрения существенно отличается от его позиции. Ему особенно не нравилось то, что к атомистике, которая составляла основу его исследовательской деятельности, я был не только равнодушен, но даже до некоторой степени был против нее (sogar etwas ablehnend gegenüberstand). В основе этого лежало то, что я в то время придавал принципу возрастания энтропии столь же не имеющую исключений применимость, как и принципу сохранения энергии, между тем как Больцман считал принцип возрастания энтропии лишь вероятностным законом, который как таковой допускает исключения. Величина H может иногда также и возрастать*). В обсуждение этого пункта Больцман при выводе своей так называемой

*) Как известно, Больцману удалось построить некую величину H, которая со временем постоянно убывала, ввиду чего ее отрицательное значение можно было идентифицировать с энтропией. (*Прим. Э. Ш.*)

H-теоремы вовсе не входил, и мой талантливый ученик Э. Цермело указал на это и подчеркнул недостаток строгого обоснования теоремы. Действительно, в расчетах Больцмана отсутствует упоминание необходимой для обоснования его теоремы предпосылки молекулярного хаоса». Упоминаемые здесь возражения Цермело—Планка сводились к тому, что, ввиду строгой обратимости чисто механических процессов, на основе одной только ньютоновой динамики невозможно логически непротиворечиво объяснить необратимость реальных процессов, требуемую вторым началом термодинамики. В результате возникшей дискуссии и было найдено недостающее звено в логической цепи в виде постулата молекулярного хаоса.

После того, как применение термодинамики к изучению физико-химических процессов оказалось в руках Планка столь плодотворным, он обратился к изучению термодинамическим путем новой проблемы: излучения абсолютно черного тела. Как известно, это изучение привело его к открытию, увековечившему его имя—открытию элементарного кванта действия. В жизни самого Планка открытие квантовых законов сыграло огромную роль, так как оно, как мы увидим, было связано, с одной стороны, с переломом во всем научном мировоззрении Планка, а с другой—ощущалось им самим как настоящая трагедия. Путь, которым пошел Планк, при решении указанной задачи, состоял в следующем. Так как из закона Кирхгофа вытекало, что тепловое излучение не зависит от природы излучающего тела, то Планк выбрал в качестве представителя материи простейший объект: линейный гармонический осциллятор или резонатор, который благодаря своему электрическому заряду может обмениваться энергией с окружающим электромагнитным полем. «Я надеялся, пишет Планк в упомянутой статье об истории установления формулы излучения, носящей его имя (III, стр. 258 и след.), что для любого начального состояния этого образования (т. е. линейного осциллятора.—*Э. Ш.*) применение теории Максвелла должно бы привести к необратимым процессам излучения, которые должны бы завершиться стационарным состоянием термодинамического равновесия, в котором излучение полости обладает искомым, соответствующим излучению черного тела, распределением энергии».

«Поэтому я начал прежде всего исследование абсорбции и эмиссии электромагнитных волн через посредство резонанса. При этом я держался мнения, что взаимодействие между осциллятором, возбуждаемым электродинамической волной, поглощающим и испускающим энергию и возбуждающей волной представляет необратимый процесс. Однако это мнение, выраженное в столь общем виде, ошибочно, на что тотчас же отчетливо указал Л. Больцман*). Ибо весь процесс столь же хорошо может протекать и в обратном направлении. Нужно только в некоторый момент времени изменить знак всех напряженностей магнитного поля на обратный при сохранении направлений электрических напряженностей. При этом осциллятор будет снова засасывать энергию, излученную в виде сферических волн такими же сферическими волнами и снова отдавать энергию, поглощенную из возбуждающего излучения. Следовательно, о необратимости при подобном процессе не может быть и речи».

«Чтобы можно было пойти дальше в теории излучения, необходимо было введение ограничивающего условия, которое бы сразу исключало подобные никогда не происходящие в природе процессы, как концентрические направленные внутрь шаровые волны, а вместе с тем — исключало бы возможность одновременного обращения знака всех магнитных напряженностей. Этот шаг я сделал путем введения гипотезы „естественного излучения", содержание которой сводится к тому, что отдельные парциальные гармонические волны, из которых состоит тепловое излучение, полностью некогерентны»**).

Положив в основу «гипотезу естественного излучения», обеспечивающую необратимость процесса взаимодействия между осцилляторами и излучением, Планк вывел затем простую формулу, связывающую в стационарном состоянии энергию осциллятора U с интенсивностью излучения K_ν. Эта формула такова

$$K_\nu = \frac{\nu^2}{c^2} U,$$

*) Мы опускаем приведенные в оригинале литературные ссылки. Анализ процессов поглощения и излучения электромагнитного излучения осциллятором проведен Планком в пяти сообщениях Берлинской Академии наук, имеющих общее название «О необратимых процессах излучения». В реферируемом собрании сочинений Планка эти работы воспроизводятся в первом томе, стр. 493—601. Небезынтересно с исторической точки зрения, что возражение Больцмана, высказанное непосредственно вслед за первым сообщением, Планк пытался во втором сообщении объяснить недоразумением и только в дальнейшем учел это возражение. (*Прим. Э. Ш.*)

**) Очевидно, что «гипотеза естественного излучения» в статистике излучения играет совершенно ту же роль, что и «гипотеза молекулярного хаоса» в статистике материальных систем. Таким образом, в этом пункте критика Больцмана была для него реваншем относительно критики Цермело—Планка доказательства *H*-теоремы Больцмана. (*Прим. Э. Ш.*)

где K_ν—интенсивность излучения (точнее поверхностная плотность излучения), а U—энергия осциллятора. Дальнейший путь был чисто термодинамический. Именно, Планк нашел (очевидно—ощупью) выражение для энтропии системы из осцилляторов и излучения, причем для осциллятора было дано выражение S в функции U и ν, содержавшее, кроме того, две универсальные константы. Воспользовавшись затем термодинамическим соотношением

$$\frac{dS}{dU}=\frac{1}{T}$$

и исключая энергию осциллятора U из результата применения этой формулы к упомянутому выражению S и формулы (а), Планк получил формулу Вина, т. е. выражение вида $A\nu^3 \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right)$, содержащее температуру в экспоненте. На первых порах этот результат показался удовлетворительным, так как формула Вина, дававшая хорошие результаты для видимой части спектра и вообще для коротких волн, в то время пользовалась доверием. В обширной статье, подводившей итоги этого этапа работы (I, стр. 614—667) и опубликованной в 1900 г. в Annalen der Physik, Планк писал по поводу полученной формулы (стр. 661): «Но это — как раз установленный В. Вином закон распределения энергии, по крайней мере приблизительная справедливость которого была показана последовательными исследованиями Ф. Пашена, Ф. Пашена и Г. Ваннера, О. Люммера и Э. Прингсгейма».

«В. Вин вывел свой закон на основе определенных допущений о числе находящихся в единице объема центров излучения и о скорости их движения. В развитой здесь теории эти величины не играют никакой роли, но закон получается как необходимое следствие установленного в § 17 определения электромагнитной энтропии излучения. Вопрос о необходимости этого закона совпадает таким образом с вопросом о необходимости того определения».

На самом деле этот итог нельзя было считать удовлетворительным. Действительно, ко времени опубликования цитированной работы была опубликована также и формула Рэлея—Джинса. Полученная путем логически безупречного в высшей степени остроумного и совершенно прямого применения классической статистики к излучению, она весьма существенно отличалась от формулы Вина, в частности, и тем, что зависимость от температуры в ней получалась не экспоненциальная, как в формуле Вина, но просто пропорциональная. Хотя эта формула вела к известным «расходимостям» («ультрафиолетовая катастрофа»), измерения, произведенные в том же 1900 г. Ф. Курльбаумом и Г. Рубенсом, показали, что для очень длинных волн излучение абсолютно черного тела с возрастанием температуры следует все ближе и ближе пропорциональности температуре в резком противоречии с формулой Вина и в согласии с формулой Рэлея—Джинса. Дальнейшие события развернулись с драматической быстротой.

О них ярко и с большой откровенностью рассказал сам Планк в уже цитированной исторической статье, написанной незадолго до смерти.

Работа Курльбаума и Рубенса была доложена в заседании Германского физического общества 19 октября 1900 г. «Так как, пишет Планк в упомянутой статье, этот результат (т. е. пропорциональность температуре интенсивности излучения для длинных волн и высоких температур.—*Э. Ш.*) стал мне известен из устного сообщения авторов за несколько дней до заседания, то я имел время еще до заседания извлечь из этого результата следствия моим методом и использовать его для вычисления энтропии резонирующих осцилляторов» (III, стр. 262—263). В результате Планк получил формулу для распределения энергии в спектре, которую он, преобразовав от распределения по частотам к распределению по длинам волн, сообщил в том же заседании в дискуссии по докладу Курльбаума и Рубенса и рекомендовал заняться ее проверкой.

«На следующий день утром, продолжает Планк, меня отыскал коллега Рубенс и рассказал, что он после заседания (происходившего вечером.—*Э. Ш.*) в ту же ночь точно сравнил мою формулу с результатами своих измерений и получил повсюду удовлетворительное согласие. Также и Люммер и Прингсгейм, которые, как им вначале показалось, нашли отклонения, вскоре взяли свои возражения обратно ввиду того, что, как мне устно сообщил Прингсгейм, выяснилось, что найденные отклонения были обусловлены ошибкой в вычислениях. Последующими измерениями формула вновь и вновь подтверждалась и тем точнее, чем тоньше были примененные экспериментальные средства».

Вскоре после этого Планк опубликовал краткую заметку, в которой и сообщил найденную им формулу (I, стр. 687—689), ставшую знаменитой—«формулу Планка».

Однако история этим не закончилась. Несомненно, что формула Планка была получена путем интерполяции между формулой Вина, справедливой для коротких волн и низких температур, и Рэлея—Джинса, справедливой для длинных волн и высоких температур и если бы дело этим ограничилось, то заслуга Планка была бы исчер-

пана решением некоторой весьма специальной, хотя и практически важной задачи. Однако Планк не остановился на удачно найденной эмпирической формуле. Он задался целью дать ей теоретическое обоснование, и в заседании Физического общества 14 декабря 1900 г. доложил вывод найденной им формулы, в основе которого лежало представление о дискретности энергии резонатора. Эту дату 14 декабря 1900 г. и следует считать днем рождения теории квантов. В своей речи при получении Нобелевской премии (III, стр. 120—134) Планк замечает, что работа, выполненная им в течение нескольких недель между заседаниями 19 октября и 14 декабря, была самой трудной работой, которую ему приходилось делать когда-либо в жизни. В чем заключались ее промежуточные этапы, об этом Планк не говорит ни здесь и ни в каком другом месте; по свидетельству М. Лауэ *) он вообще никогда не говорил о промежуточных стадиях своей работы. Однако можно утверждать с полной определенностью, что переход от эмпирически найденной формулы излучения к ее теоретическому обоснованию был связан для Планка с крутым поворотом во всем его научном мировоззрении. Этот поворот проявился прежде всего в переходе от феноменологически-термодинамического метода, которым Планк исключительно пользовался до введения гипотезы квантов к статистике; в частности—к использованию положения Больцмана о связи между энтропией и вероятностью, т. е. к признанию атомистики. Но, конечно, еще более крутой поворот был связан с введением гипотезы о дискретности энергии, т. е. с разрывом с одним из основных положений классической физики вообще. Из последующих работ Планка и из свидетельства близко знавших его людей (например, того же М. Лауэ) этот разрыв Планк переживал мучительно еще через десятилетия после появления обсуждаемой работы.

В настоящее время первоначальный вывод формулы излучения, данный Планком, потерял свою актуальность, так как существует гораздо более простой и логически более строгий вывод Эйнштейна. Однако с исторической точки зрения, в частности для правильной исторической перспективы, интересно напомнить основные черты вывода Планка и дословно процитировать то место его работы, где впервые формулируется утверждение о дискретности энергии.

Схема вывода, приведшего к правильной формуле излучения, в общих чертах аналогична намеченной выше, только для энтропии берется выражение, несколько отличающееся от того, которое раньше привело Планка к формуле Вина. Но когда Планк попытался обосновать это выражение для энтропии, то здесь ему пришлось воспользоваться статистикой. Вот как описывает это сам Планк (III, 264—265): «Я сам до тех пор не прибегал к соотношению между энтропией и вероятностью; это соотношение не представлялось мне заманчивым, поскольку всякий вероятностный закон допускает исключения, а я в то время считал второе начало не терпящим никаких исключений. То, что доказательство необратимости рассматривавшихся мною процессов излучения удалось лишь при допущении «гипотезы естественного излучения», что, следовательно, подобная ограничивающая гипотеза в теории излучения так же необходима и играет совершенно такую же роль, как гипотеза «молекулярного хаоса» в теории газов,—это выяснилось для меня лишь с течением времени.

Но так как для меня не представлялось никакого иного выхода, то я попытался воспользоваться методом Больцмана и положил совершенно обще для любого состояния любого физического образа

$$S = k \ln W, \tag{9}$$

где W — соответственно вычисленная вероятность состояния

Чтобы теперь применить формулу (9) к данному случаю, я представил себе систему, состоящую из очень большого числа N одинаковых осцилляторов и попытался вычислить вероятность того, что эта система обладает заданной энергией U_N. Но так как вероятность можно найти лишь путем подсчета, то было необходимо прежде всего энергию U_N рассматривать как сумму дискретных, равных друг другу элементов ε, количество которых должно представляться очень большим числом P. Следовательно,

$$U_N = NU = P\varepsilon». \tag{1}$$

В работе, доложенной 14 декабря 1900 г., Планк формулирует свое основное допущение следующим образом (I, 698): «Нужно еще только найти распределение энергии по отдельным резонаторам внутри каждого типа резонаторов и прежде всего — распределение энергии E по N резонаторам с частотой ν. Если бы E рассматривалось как неограниченно делимая величина, то распределение было бы возможно бесконечным числом способов. Но мы рассматриваем — и это есть существенный пункт всего вычисления — E как составленную из совершенно определенного числа конечных равных частей и пользуемся для этого универсальной постоянной (Naturconstante)

*) M. Laue, Naturwiss. 45, 221 (1958).

$h=6{,}55\cdot10^{-27}$ (*эрг×сек*). Эта константа, умноженная на число колебаний ν резонаторов дает элемент энергии ε в эргах, а путем деления E на ε мы получаем число P элементов энергии, которые следует распределить между N резонаторами». Как видно, предпосылка формулирована вполне отчетливо. Однако нигде не подчеркивается, что эта предпосылка есть гипотеза, радикально противоречащая всей классической физике.

Более того, значительно позднее, в 1909 г. (т. е. после опубликования работ Эйнштейна о световых квантах и о теплоемкости), в лекциях, читанных в Колумбийском университете, Планк подчеркивал противоположную мысль. Приведем это интересное место из лекции, посвященной атомистической теории вещества: «Если ... мы желаем свести к вероятности энтропию лучистой теплоты, то, подобно предыдущему, убедимся, что и для лучистой теплоты атомистика должна иметь известное значение. Так как, однако, лучистая теплота связана не с веществом, то эта атомистика должна быть отнесена не к веществу, а к энергии, откуда следует, что в лучистой теплоте некоторые элементы энергии должны играть существенную роль. Как ни кажется странным такое заключение, — и тем понятнее тот живой протест, который оно возбуждает еще и теперь во многих кругах,— физическая наука не может его не принять, тем более, что оно вполне удовлетворительно подтверждается опытом. Мы еще возвратимся к этому вопросу в лекциях о лучистой теплоте; здесь я желал бы еще прибавить, что введение атомистики в учение о лучистой теплоте не представляет какого-либо новшества, которое вносило бы переворот в наши представления, как это может показаться с первого взгляда*), ибо нет никакой необходимости, по крайней мере по моему мнению, представлять себе с атомистической точки зрения лучистые явления в абсолютной пустоте, но достаточно использовать атомистику в источнике лучеиспускания, т. е. в тех явлениях, которые происходят в центрах испускания и поглощения лучей**).

В этом стремлении во что бы то ни стало сохранить представления классической физики, вопреки открытым им самим фундаментальным фактам, требующим разрыва с этими представлениями, сказалось то противоречие, которое Планк болезненно ощущал в течение всей своей дальнейшей жизни.

Вернемся, однако, к исторической работе, доложенной 14 декабря 1900 г. Воспользовавшись приведенной выше формулой, связывающей плотность энергии излучения с энергией резонаторов и законом Вина, Планк вывел формулу излучения абсолютно-черного тела

$$u_\nu\, d\nu=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\cdot\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}.$$

При переходе от частот к длинам волн, получается формула Планка в том виде в каком ею пользуются для практических расчетов излучения:

$$u_\lambda\, d\lambda=\frac{8\pi ch}{\lambda^5}\cdot\frac{d\lambda}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}}-1}.$$

В формулу Планка, написанную в любом виде, входят две универсальные постоянные h и k. Постоянная k обычно называется постоянной Больцмана, так как она является также коэффициентом пропорциональности в формуле Больцмана, связывающей энтропию и вероятность. Планк, однако, обращает внимание на то, что сам Больцман никогда этой постоянной не пользовался (он пользовался величиной R), и ее численное значение впервые вычислил Планк. Постоянная h — элементарный квант действия, открытие которого увековечило имя Планка. Воспользовавшись эмпирическими данными для интенсивности излучения абсолютно черного тела, Планк, как сказано, вычислил численные значения этих постоянных и получил (I, стр. 727)

$$k=1{,}346\cdot10^{-16}\ \textit{эрг}\cdot\textit{град}^{-1},$$
$$h=6{,}55\cdot10^{-27}\ \textit{эрг}\cdot\textit{сек}.$$

Для сравнения приведем современные точные значения:

$$k=1{,}3804\cdot10^{-16}\ \textit{эрг}\cdot\textit{град}^{-1},\qquad h=6{,}625\cdot10^{-27}\ \textit{эрг}\cdot\textit{сек}.$$

---

*) Подчеркнуто мною. (*Э. Ш.*)

**) Цитирую по русскому переводу: М. Планк, Теоретическая физика. Восемь лекций, читанных в Колумбийском университете города Нью-Йорка. Перевод И. М. Занчевского, СПб., 1911, стр. 59.

При помощи найденного им значения k и известной величины универсальной газовой константы R Планк вычислил постоянную Авогадро; а отсюда, на основе числа Фарадея, нашел величину заряда электрона

$$e=4{,}69\cdot10^{-10}\ \text{CGSE}.$$

Это число довольно сильно расходилось с существовавшими в то время результатами непосредственного экспериментального определения заряда электрона. Именно, по измерениям Дж. Дж. Томсона (1898), пользовавшимся наибольшим доверием, $e=6{,}5\cdot10^{-10}$, а по старым измерениям Ф. Рихарца (1894) — $e=1{,}29\cdot10^{-10}$. Расхождение между значением e, вычисленным Планком и определенным экспериментально, послужило подкреплением для критиков гипотезы квантов, в которых, как и всегда при появлении радикально новых идей, не было недостатка. Однако теперь мы знаем, что именно Планк был гораздо ближе к действительности, так как современное наиболее точное значение e есть $4{,}805\cdot10^{-10}$.

Дальнейшее развитие теоретической физики ознаменовалось буквально победным шествием теории квантов. Напомним основные этапы этого развития: в 1905 г. Эйнштейн перенес квантовые представления из области механизма излучения на природу самой лучистой энергии, тем самым радикально разрешив ряд накопившихся существенных противоречий. Несколько позднее (в 1908 г.) он же, внеся квантовые представления в физику твердого тела, объяснил загадочное падение теплоемкости вблизи абсолютного нуля. В 1913 г. Н. Бор обобщил квантовые постулаты и с блестящим успехом применил их к теории строения атомов; наконец, в 1925—1927 гг. В. Гейзенберг, М. Борн и П. Иордан, с одной стороны, и Л. де Бройль и Э. Шредингер, с другой, создали систему и законченный аппарат нерелятивистской квантовой механики, а П. Дирак установил релятивистское волновое уравнение электрона. Планк уже не принимал непосредственного участия в этом бурном развитии. И хотя разрыв с классической физикой он ощущал болезненно, интуицией большого ученого он понимал его неизбежность и глубину. В 1912 г., в предисловии ко второму изданию «Лекций по теории теплового излучения», он писал: «... кто захочет поставить свое отношение к квантовой гипотезе в зависимость от того, удалось ли вполне разъяснить смысл кванта действия для элементарных физических процессов или по крайней мере иллюстрировать его посредством какой-нибудь простой динамической модели, тот, по-моему, не понимает характера и смысла квантовой гипотезы. Существенно новый принцип не может быть воспроизведен моделями, действующими по законам старой теории» (разрядка моя.—*Э. Ш.*). Эти мудрые слова должны служить поучением тем немногим «любителям старины», которые иногда, не давая себе в этом отчета, делают безнадежные попытки свести своеобразные квантовые закономерности к каким-либо моделям, действующим по законам классической физики.

Мы здесь не ставим себе задачу дать полный обзор работ Планка и потому не будем останавливаться на некоторых важных его работах, не имеющих прямого отношения к открытию элементарного кванта действия. Такова его интерпретация открытого В. Нернстом третьего начала термодинамики как требования равенства нулю энтропии при абсолютном нуле температуры (III, стр. 54—64). Таковы же его работы по теории относительности (см. в особенности II, стр. 176—209), решительным сторонником которой он выступил с момента ее появления.

Третий том реферируемого собрания работ М. Планка носит характер, существенно отличный от первых двух. В нем собраны статьи, доклады и лекции философского и популярного характера, а также статьи, посвященные выдающимся физикам (Г. Герц, Г. А. Лоренц, П. Друде и др.) в связи с различными памятными датами. Сюда же вошли статьи автобиографического характера: «Личные воспоминания» (стр. 358—363), «К истории открытия физического кванта действия» (255—267), «Научная автобиография» (стр. 374—401). Последняя статья известна читателям нашего журнала (см. УФН, 64, 625, 1958).

Все статьи этого тома представляют до сих пор большой интерес. Детальный анализ научно-философских взглядов М. Планка не может быть дан в настоящей статье, представляющей собой общий обзор собрания сочинений Планка. Отметим только два пункта. В речи «Единство физической картины мира» (III, стр. 6—29), излагающей научно-философское «credo» Планка, он выступил с резким отпором позитивизму Э. Маха, в то время (1908 г.) пользовавшемуся успехом среди естествоиспытателей. В своих термодинамических работах он показал несостоятельность энергетики Оствальда. Равным образом Планк не остался в стороне и от новейшей научно-философской дискуссии, возникшей вокруг проблемы причинности и, так же как Эйнштейн, в ряде статей и докладов решительно защищал классический детерминизм (см., например: «Понятие причинности в физике», III, стр. 219—239).

Планку принадлежит честь важнейшего открытия — существования элементарного кванта действия конечной (не бесконечномалой) величины. Он дал первую

формулировку одной из великих идей, лежащих в основе современной физики и столь резко отличающих физику современную от физики классической — идеи о квантах, об универсальной дискретности в явлениях природы. Эта идея была формулирована своевременно и, как мы знаем, она оказалась необычайно плодотворной.

Оглядываясь на развитие теории квантов со времени ее возникновения в 1900 г. до наших дней, невольно удивляешься тому, какой огромный путь пройден физикой за промежуток времени около шестидесяти лет. Далеко позади остались первые шаги квантовой теории, уже 30 с лишним лет назад превратившейся из «гипотезы квантов» в стройную систему квантовой механики, по своей завершенности и логической непротиворечивости не уступающей механике классической. Универсальная роль дискретности в законах природы, выявленная открытием Планка, не только вошла в «плоть и кровь» современной физики, как факт, но уже поставлена проблема объяснить происхождение самой этой дискретности: не только признавать существование элементарных частиц и их взаимные превращения, но и объяснить, почему именно они существуют и с такими свойствами. Понятно поэтому, что на фоне глубочайших и труднейших проблем современной теории элементарных частиц, дискуссии, волновавшие физиков в начале нашего столетия в связи с возникновением теории квантов, кажутся теперь такими простыми и чуть ли не наивными! И все-таки знакомство со многими статьями, заключающимися в трех томах работ М. Планка, в высшей степени интересно с исторической точки зрения и глубоко поучительно, особенно для изучающих теоретическую физику. Поэтому ознаменование столетия со дня рождения М. Планка изданием собрания его оригинальных работ является не только законной данью уважения к деятельности этого выдающегося ученого, но и делом ценным для воспитания новых поколений физиков.

Э. В. Шпольский