

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539.145

ВКЛАД ЭЙНШТЕЙНА В КВАНТОВУЮ ТЕОРИЮ *)

В. Паули

Каждое новое явление природы, несовместимое с признанной теоретической системой, ставит исследователя перед вопросом, какие известные принципы, используемые для описания природы, обладают общностью, достаточной, чтобы объяснить новую ситуацию, и какие из них должны быть изменены или даже отброшены. Отношение различных физиков к проблемам этого рода, предъявляющим высокие требования к интуиции и такту ученого, существенно зависит от личного темперамента исследователя. В случае открытия Планком в 1900 г. кванта действия, сделанного им в ходе его известных исследований закономерности излучения черных тел, было ясно, что законы сохранения энергии и импульса, а также принцип Больцмана, связывающий энтропию с вероятностью, оказались теми двумя опорами, которые не могли быть поколеблены развитием, вытекающим из нового открытия. В самом деле, именно верность этим принципам позволила Планку ввести новую константу h , квант действия, в его статистическую теорию термодинамического равновесия излучения.

Однако вопрос о том, содержала ли в себе новая «квантовая гипотеза» необходимость изменения закономерностей самих микроскопических явлений, независимо от статистических применений, или же она имела целью только улучшение статистических методов расчета равновероятных состояний, в первоначальных работах Планка обсуждался с известной сдержанностью. Во всяком случае он сам предпочитал тенденцию к компромиссу между старыми представлениями физики, которые теперь обозначаются как «классические», и квантовой теорией. Это справедливо как для его первых работ, так и для более поздних, несмотря на то, что подтверждение возможности такого компромисса должно было существенно ограничить значение его собственного открытия.

Размышления этого рода и были положены в основу первой работы **) Эйнштейна по квантовой теории ¹, которая примыкала к исследованиям по основам статистической механики ***). В том же 1905 г. появились две другие основополагающие работы по теории броуновского движения ****), а также по теории относительности *****). В этом исследовании, а также

*) Wolfgang Pauli, Einsteins Beitrag zur Quantentheorie, в сб. Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, 1955. Перевод С. Г. Суворова с немецкого, сверенный с английским текстом, опубликованным в сб. Albert Einstein. Philosopher-Scientist, 1949.

**) Все ссылки относятся к работам Эйнштейна по квантовой механике. Названия этих работ помещены под тем же номером в отдельном списке в конце этой статьи.

***) Ann. Phys. (4) 9, 417 (1902); 11, 170 (1903); 14, 354 (1904).

****) Ann. Phys. (4) 17, 549 (1905).

*****) Ann. Phys. (4) 17, 891 (1905).

в последующих ²⁻⁴ Эйнштейн выяснял и усиливал лежащую в основе планковской теории термодинамическую точку зрения настолько, что смог сделать однозначные выводы о самих микроскопических явлениях. Больцмановскому уравнению для энтропии S и «вероятности» W

$$S = k \ln W - \text{const} \quad (1)$$

он придал однозначный физический смысл, определив W для данного состояния как относительную длительность этого состояния в замкнутой системе с жестко заданной энергией (причем это состояние может более или менее отклоняться от состояния термодинамического равновесия). Тем самым соотношение Больцмана не только представляет собой определение вероятности W , но и дает также связь между принципиально наблюдаемыми величинами. Например, для среднего значения квадрата флуктуации энергии малого объема в замкнутой системе получается, как следствие (1), выражение

$$\overline{\varepsilon^2} = k \left[- \left(\frac{\partial^2 S}{\partial E^2} \right)_{T,V} \right]^{-1} = kT^2 \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V, \quad (2)$$

где T означает температуру, а E — среднее значение энергии (усложнения формулы, вызываемые флуктуациями плотности, здесь не учитываются, потому что в случае излучения они не происходят). Указанное выше соотношение справедливо независимо от каких-либо модельных представлений. Если из опыта известна энергия системы как функция ее температуры, то модель должна находиться в согласии с флуктуациями, вычисленными из уравнения (2). С другой стороны, принятие такой теоретической модели предписывает выбор состояний, которые в больцмановском соотношении (1) принимаются за равновероятные. Выведем среднее значение квадрата флуктуации энергии для частоты излучения в пределах $\nu, \nu + d\nu$ в малой части объема вакуума, заполненного излучением, находящимся в термодинамическом равновесии. Формула излучения Планка, в согласии с (2), дает выражение, выведенное Эйнштейном ^{4в}:

$$\overline{\varepsilon^2} = h\nu E + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \frac{E^2}{V}, \quad (3)$$

где E означает среднюю энергию излучения в объеме V для рассматриваемого интервала частот. В то время как второй член может быть истолкован в свете классической волновой теории как результат интерференции между парциальными волнами *), первый член, очевидно, находится в противоречии с классической электродинамикой. Однако он может быть истолкован по аналогии с флуктуацией числа молекул идеального газа. Это достигается при помощи картины, согласно которой энергия излучения состоит из дискретных порций энергии $h\nu$, которые концентрируются в ограниченной области пространства и ведут себя как независимые друг от друга частицы. Они получили название «световых квантов» или «фотонов».

Поскольку возникали соображения против применения статистических методов к самому излучению, Эйнштейн провел исследование броуновского движения зеркала, совершенно отражающего излучение в пределах частот $\nu, \nu + d\nu$ и полностью пропускающего все остальные частоты ^{4б}. Если через $P\nu$ обозначить силу трения, соответствующую скорости зеркала ν ,

*) Количественный расчет см.: Н. А. L o r e n t z, Théorie statistique et thermodynamique, Leipzig, 1916, Appendix Nr. IX.

нормальной к его поверхности, то эйнштейновская общая теория броуновского движения дает для беспорядочного изменения импульса Δ зеркала в течение интервала времени τ статистическое соотношение

$$\overline{\Delta^2} = 2Pm\overline{v^2}\tau = 2Pkt\tau, \quad (4)$$

где $m\overline{v^2} = kT$ (m — масса зеркала). Сначала вычисляется P , соответствующее обычным волнам, что приводит к выражению

$$P = \frac{3}{2c} \left(\varrho - \frac{1}{3} v \frac{\partial \varrho}{\partial v} \right) dv \cdot f, \quad (5)$$

где ϱdv есть энергия излучения в рассматриваемом интервале частот $v, v + dv$, приходящаяся на единицу объема, а f — поверхность зеркала. При подстановке (5) в (4) и использовании планковской формулы получаем

$$\frac{\overline{\Delta^2}}{\tau} = \frac{1}{c} \left(hv\varrho + \frac{c^3}{8\pi v^2} \varrho^2 \right) dv \cdot f. \quad (6)$$

Эта формула тесно связана с (3), а именно, при замене E из соотношения $E = \varrho dvV$ можно получить

$$\frac{\overline{\Delta^2}}{\tau} = \frac{1}{c} f \overline{E^2}. \quad (6a)$$

И опять, аналогично тому, как это было с соотношением (3), в соотношении (6) только последний член может быть объяснен классически, в то время как первый может быть интерпретирован посредством представления о корпускулярном световом кванте с энергией hv и импульсом hv/c , совпадающим с направлением движения.

К этому следует сделать два замечания.

П е р в о е. Если исходят из упрощенного закона Вина для излучения черного тела, который справедлив для $hv \gg kT$, то в (3) получают только первый член.

В т о р о е. Для области, в которой применим закон Вина, Эйнштейн в своей первой работе ¹ подсчитал вероятность крайне редкого состояния, в котором вся энергия излучения содержится в определенной части объема. Этот расчет получается путем непосредственного использования уравнения (1) вместо рассмотрения среднего квадрата энергии флуктуации. И в этом случае он мог интерпретировать свой результат с помощью вышеупомянутой корпускулярной картины световых квантов.

Таким образом Эйнштейн пришел к своей знаменитой «гипотезе световых квантов», которую он сразу же применил к фотоэффекту и стоковскому закону флуоресценции ¹. Позднее последовало применение этой гипотезы к явлению возбуждения вторичных катодных лучей рентгеновским излучением ⁵ и к предсказанию предельной частоты в спектре тормозного излучения ⁹. Все это теперь так хорошо известно, что, по-видимому, едва ли необходимо входить в подробное обсуждение этих результатов. Мы только кратко напомним о том, что эти ранние работы Эйнштейна разъяснили, что существование кванта действия привело к радикальному изменению законов, управляющих всеми микропроцессами. В случае излучения это изменение нашло свое выражение в противоречии между применяемыми в различных явлениях картинами: с одной стороны, корпускулярной, а с другой стороны, волновой.

Результаты теории Планка, в силу которых вещественные гармонические осцилляторы с собственной частотой ν могут иметь ² только дискретные

значения энергии, кратные $h\nu$, были с успехом применены Эйнштейном также и к теории удельной теплоемкости твердых тел³. С методической точки зрения следует отметить, что в этом случае Эйнштейн впервые применил к выводу свободной энергии и средней энергии таких осцилляторов как функции температуры более простой метод канонического распределения. В противоположность этому Планк в более ранних работах вычислял энтропию как функцию энергии с помощью больцмановского метода, в котором использовалась микроканоническое распределение. Учитывая физическое содержание теории, представляется очевидным, что принятие единственного значения для частоты осцилляторов в твердых телах не может быть правильным. Эта проблема обсуждалась Эйнштейном в нескольких последующих работах⁷⁻⁹ в связи с открытием Маделунга *) и Сатерленда **), согласно которому между принятым значением этой частоты и упругими свойствами тела существует некоторая связь. Среди этих работ наиболее интересным является доклад Эйнштейна на Сольвеевском конгрессе 1911 г.⁹, так как он был прочитан после нахождения эмпирической формулы Нернстом и Линдеманом для тепловой энергии твердых тел и непосредственно перед тем, как эта проблема была теоретически решена Борном и Карманом ***) и независимо от них Дебаем ****). Сегодня кажется скорее странным, что эти последние теории не были найдены гораздо раньше, тем более, что метод собственных колебаний был применен к излучению черного тела, с точки зрения классической теории, гораздо раньше, еще Рэлеем и Джинсом. Однако следует обратить внимание на то, что к тому времени еще не было найдено никакого общего правила для определения дискретных значений энергии состояний и, кроме того, физики нерешались применять квантовые законы к состояниям, занимающим в пространстве такой объем, как это имеет место в случае собственных колебаний тела.

Доклад Эйнштейна о свойствах излучения⁵, прочитанный им в 1909 г. на физическом съезде в Зальцбурге, на котором он впервые появился перед большой аудиторией, может рассматриваться как поворотный пункт в развитии теоретической физики. Он изложил в нем как специальную теорию относительности, так и квантовую теорию и пришел к важному заключению, что элементарному процессу следует приписать направление не только в случае поглощения, но и в случае эмиссии излучения (игольчатое излучение). Правда, этот постулат встал в прямое противоречие с классическим представлением об эмиссии сферических волн, которое необходимо принять для объяснения когерентных свойств излучения, как они проявляются в экспериментах по интерференции. Свой постулат о направленном процессе эмиссии Эйнштейн подкрепил дальше в своей следующей работе важными термодинамическими аргументами.

В исследованиях, опубликованных им совместно с Л. Хопфом⁶ (эти исследования привели также к интересной дискуссии с фон Лауэ о степени беспорядка в «черном» излучении¹²), он смог распространить прежнюю работу о флуктуациях импульса зеркала под влиянием поля излучения на соответствующие флуктуации импульса гармонического осциллятора. На этом пути стало возможно — по крайней мере для этой специальной системы, которая в первоначальной теории Планка играет столь важную роль, — привлечь для вычисления равновесного излучения наряду с волнообразным движением, рассмотренным Планком,

*) J. Madelung, Phys. Zs. 11, 898 (1910).

***) W. Sutherland, Phil. Mag. (6) 20, 657 (1910).

****) M. Born und Th. van Karman, Phys. Zs. 13, 297 (1912).

*****) P. Debye, Ann. Phys. (4) 39, 789 (1912).

также и поступательное движение. Результат разочаровал тех, кто все еще напрасно надеялся вывести планковскую формулу излучения исключительно посредством изменения статистических предпосылок, вместо фундаментального разрыва с классическими представлениями о самих элементарных микроявлениях. В самом деле, классическое вычисление флуктуации импульса гармонического осциллятора при его взаимодействии с полем излучения совместимо только с хорошо известным значением $3/2 kT$ для его кинетической энергии в термодинамическом равновесии, если поле излучения удовлетворяет классическому закону Рэлея — Джинса, а не закону Планка. Если же, наоборот, признается только последнее, то флуктуации импульса осциллятора должны происходить от неравномерностей в поле излучения, которые значительно больше, чем соответствующие флуктуации для малой плотности энергии излучения.

После того как Бор успешно применил квантовую теорию к объяснению линейных спектров элементов, применив два хорошо известных «фундаментальных постулата квантовой теории» (1913), началось быстрое развитие, в ходе которого квантовая теория освободилась от ограничения, связанного с использованием столь специальной системы, как осцилляторы Планка.

Отсюда возникла проблема — привести закон излучения Планка в согласие с боровскими постулатами на основе более общих предпосылок, справедливых для атомных систем. Эта проблема была решена Эйнштейном в 1917 г. в его знаменитой работе¹³, которая может рассматриваться как наивысший пункт этого этапа исследований Эйнштейна по квантовой теории (см. также¹⁰ и¹¹) и как зрелый продукт его прежних исследований по броуновскому движению. Планковский закон излучения он смог заново обосновать с помощью более общего статистического закона для спонтанных и индуцированных процессов эмиссии и для обратных им процессов поглощения. При этом он взял два общих соотношения между тремя коэффициентами, которые определяют частоту этих процессов и из которых при задании двух коэффициентов может быть вычислен третий. Поскольку эти результаты Эйнштейна ныне содержатся во всех учебниках по квантовой теории, едва ли необходимо обсуждать здесь частности этой теории, как и ее позднейшее обобщение на более сложные процессы излучения¹⁵. Кроме вывода планковской формулы излучения, в этой работе в законченном и очень общем виде обсуждается также и проблема обмена импульсами между атомной системой и излучением. Снова применяется уравнение (4) из теории броуновского движения, которое связывает средний квадрат обмена импульсом в течение определенного интервала времени с силой трения Pv . Эти последние можно рассчитать, применяя общую гипотезу о том, что процессы эмиссии и соответственно поглощения, вызванные пучками излучения различного направления, независимы друг от друга*). Эта гипотеза внушалась как экспериментом, так и классической электродинамикой. Тогда условие (4) для планковского поля излучения выполняется только в случае, если предполагается, что спонтанная эмиссия имеет такое направление, что для каждого элементарного процесса излучения импульс $h\nu/c$ испускается в направлениях, распределение которых соответствует закону случая, а атомная система испытывает отдачу в противоположном направлении. Последнее заключение было позднее подтверждено экспериментально Фришем**).

*) См. по этому поводу дискуссию между Эйнштейном и Шорданом¹⁶.

**) R. Frisch, Zs. Phys. 86, 42 (1933).

По мнению автора, было слишком мало уделено внимания собственному критическому суждению Эйнштейна о фундаментальной роли, которую играет «случайность» в этом описании процесса излучения посредством статистической закономерности. Поэтому мы процитируем следующее место из его работы 1917 г.

«Слабость теории состоит, с одной стороны, в том, что она не приблизила нас к согласию с волновой теорией, а с другой стороны, в том, что она предоставила время и направление элементарного процесса «случайности»; несмотря на это, я питаю полное доверие к надежности избранного пути».

Противоречие между интерференционными свойствами излучения, для описания которых необходим принцип суперпозиции волновой теории, и свойствами, которыми обладает энергия и импульс при обмене между излучением и веществом и которые могут быть описаны только с помощью корпускулярной картины, не исчезало и прежде всего казалось непримиримым. Как всем известно, позднее де-Бройль дал количественную формулировку идее, в силу которой подобное противоречие должно проявиться и для вещества. Эйнштейн весьма покровительствовал этой идее; автор вспоминает, что в ходе одной дискуссии в Инсбруке осенью 1924 г. Эйнштейн предложил провести поиск явлений интерференции и дифракции пучков молекул *). Как раз в то же время в работе Бозе был дан вывод формулы Планка, в котором была использована только корпускулярная картина, а не волновые представления. Это побудило Эйнштейна применить аналогичные рассуждения к теории так называемого вырожденного идеального газа ¹⁷, которая ныне известна как обобщенное описание термодинамического поведения системы частиц с симметричными собственными функциями (статистика Бозе — Эйнштейна). Интересно, что впоследствии опыт показал, что эта теория применима к жидкому гелию. Фундаментальное различие между статистическими свойствами одинаковых и неодинаковых частиц, которое обсуждается и в названных работах Эйнштейна, согласно волновой механике, связано с тем обстоятельством, что в силу соотношения неопределенности Гейзенберга, которое относится к основам новой теории, исчезает возможность различения одинаковых частиц благодаря непрерывности их движения в пространстве и времени. Вскоре после появления работы Эйнштейна в литературе были продискутированы термодинамические следствия другой альтернативы, а именно — для частиц с антисимметричными волновыми функциями, применимой к электронам (статистика Ферми — Дирака).

Последовавшая вскоре за появлением работ де-Бройля формулировка квантовой механики была, впервые со времени открытия Планка, решающей для новой возможности представить непротиворечивое описание тех явлений, в которых квант действия играет существенную роль. Кроме того, квантовая или волновая механика привела к более глубокому пониманию общей ситуации, касающейся понятий атомной физики, в связи с точкой зрения, названной Бором дополнительностью **). Автор принадлежит к тем физикам, которые убеждены, что эта новая теоретико-познавательная ситуация, лежащая в основе квантовой механики, удовлетворяет как точке зрения физика, так и более широким требованиям человеческого познания вообще. Я сожалею, что Эйнштейн другого мнения об этой ситуации, тем более, что этот новый аспект описания природы, в противоположность идеям, лежащим в основе классической физики,

*) В этой связи следует обратиться к более ранним дискуссиям между Эйнштейном и Эрнестом ¹⁴ по проблемам, касающимся молекулярных пучков.

**) Изложение позиции Эйнштейна в ходе этого развития можно увидеть из напечатанной здесь статьи Н. Бора (см. перевод: УФН 66 (4), 571 (1958). — *Ред.*).

возбуждает надежду на будущее развитие различных частных научных дисциплин в направлении большего единства целого.

Оставаясь в рамках собственно физики, мы сознаем, что современная структура квантовой механики не только еще далека от своей окончательной формы, но она даже оставляет нерешенными и те проблемы, которые уже давно занимали Эйнштейна. В его упомянутой выше работе ⁴⁶, относящейся к 1909 г., он подчеркивает значительность замечания Джинса о том, что элементарный электрический заряд e вместе со скоростью света c определяет константу e^2/c , которая имеет ту же размерность, что и квант действия h (таким образом он намекает этим на ныне хорошо известную константу тонкой структуры $2\pi e^2/hc$). Он подчеркивал (цит. соч., стр. 192), «что элементарный квант электричества e — чужеземец в электродинамике Максвелла — Лоренца», и выражал надежду, «что та же самая модификация теории, которая будет содержать элементарный квант e как следствие, будет так же как следствие содержать и квантовую структуру излучения». Это высказывание оказалось, несомненно, неудачным, поскольку новая квантовая теория излучения и вещества включает в себя электрический элементарный заряд не как следствие, так что и в квантовой механике он тоже остался чужеземцем.

Теоретическое определение константы тонкой структуры, несомненно, является наиболее важной еще не разрешенной проблемой современной физики. Мы убеждены, что всякий возврат к идеям классической физики (как, например, использование классического понятия поля) не может приблизить нас к этой идее. Чтобы ее постигнуть, мы должны, наверное, согласиться на еще более глубокие революционные изменения фундаментальных понятий физики, которые еще больше отдалят нас от понятий классических теорий.

РАБОТЫ ЭЙНШТЕЙНА ПО КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

1. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.— Ann. Phys. (Leipzig) 17(4), 132 (1905).
2. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption.— Ann. Phys. (Leipzig) 20(4), 199 (1906).
3. Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme.— Ann. Phys. (Leipzig) 22(4), 180, 800 (1907).
4. Дискуссия с В. Ритцем: а) W. R i t z, Phys. Zs. 9, 903; 10, 224 (1908); б) A. E i n s t e i n, Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems, Phys. Zs. 10, 185 (1909); в) W. R i t z und A. E i n s t e i n, Zur Aufklärung, Phys. Zs. 10, 323 (1909).
5. Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung (Bericht anlässlich der physikalischen Tagung in Salzburg, September 1909).— Phys. Zs. 10, 817 (1909).
6. а) A. E i n s t e i n und L. H o p f, Über einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung in der Quantentheorie, Ann. Phys. (Leipzig) 33, 1096 (1910) (см. также ¹²); б) A. E i n s t e i n und L. H o p f, Statistische Untersuchung der Bewegung eines Resonators in einem Strahlungsfeld, Ann. Phys. (Leipzig) 33, 1105 (1910).
7. Eine Beziehung zwischen dem elastischen Verhalten und der spezifischen Wärme bei festen Körpern mit einatomigem Molekül.— Ann. Phys. (Leipzig) 34, 170, 590 (1911).
8. Elementare Betrachtungen über die thermische Molekularbewegung in festen Körpern.— Ann. Phys. (Leipzig) 35, 679 (1911).
9. Доклад и дискуссия на Сольвеевском конгрессе, 1911 г.: La Théorie du rayonnement et les quanta, Paris, 1912; доклад L'État actuel du problème des chaleurs spécifiques.
10. Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes.— Ann. Phys. (Leipzig) 37, 832; 38, 881 (1912).
11. A. E i n s t e i n und O. S t e r n, Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt, Ann. Phys. (Leipzig) 40, 551 (1913).

12. Дискуссия между Эйнштейном и Лауэ: а) M. v o n L a u e, Ann. Phys. (Leipzig) 47, 853 (1915); б) A. E i n s t e i n, Ann. Phys. (Leipzig) 47, 879 (1915); в) M. v o n L a u e, Ann. Phys. (Leipzig) 48, 668 (1915).
 13. Zur Quantentheorie der Strahlung.— Phys. Zs. 18, 121 (1917) (см. также: Verhandl. Deutsch. phys. Ges., Nr. 13/14 (1916); перевод — на стр. 371 этого выпуска УФН.— *Ред.*).
 14. A. E i n s t e i n und P. E h r e n f e s t, Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach, Zs. Phys. 11, 326 (1922).
 15. A. E i n s t e i n und P. E h r e n f e s t, Zur Quantentheorie des Strahlungsgleichgewichtes, Zs. Phys. 19, 301 (1923) (см. также: W. P a u l i, Zs. Phys. 18, 272 (1923)).
 16. Дискуссия Иордан — Эйнштейн: а) P. J o r d a n, Zs. Phys. 30, 297 (1924); б) A. E i n s t e i n, Zs. Phys. 31, 784 (1925).
 17. Zur Quantumtheorie des einatomigen idealen Gases.— Berliner Ber., 261 (1924); 3, 18 (1925) (см. также: S. N. B o s e, Zs. Phys. 26, 178; 27, 384 (1924)).
-