

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН И СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ \*)

*Макс Борн*

Предложение выступить здесь по случаю 50-летия появления первой работы Эйнштейна о световых квантах («Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света») я рассматриваю как большое отличие, и я счёл долгом чести принять это приглашение. Ибо, во-первых, моя дружба с Эйнштейном длится уже почти пятьдесят лет, а, во-вторых, Берлинский университет был первым университетом, где я получил профессию и единственным местом, где я в течение нескольких лет работал рядом с Эйнштейном и жил в постоянном общении с ним. Однако наряду с желанием принять это предложение возникли и возражения. Когда я полтора года назад оставил свою кафедру в Эдинбурге за достижением предельного возраста, я решил больше не принимать активного участия в физической науке (за исключением окончания двух книг, которые были начаты давно и одна из которых успела появиться). Я поселился в тихом месте, где нет университета, нет библиотеки и продал большую часть моих собственных книг и журналов. Таким образом, у меня отсутствовали литературные средства, которые могли бы освежить мою память. И всё же я решил не уклоняться от приглашения. В самом деле, ведь в живых остались только немногие физики-теоретики из числа тех, кто с самого начала видел и переживал величественную картину возникновения современной физики. Если Вы поэтому примете во внимание, что мой рассказ в существенных чертах основан на воспоминаниях и в некоторых пунктах может быть не вполне точным, то всё же я попытаюсь описать первые годы этого столетия в физике и участие Эйнштейна в её развитии, особенно в развитии представления о квантах света.

В одном и том же 1905 г. и в одном томе журнала «Annalen der Physik» появились также две другие работы Эйнштейна: о тео-

---

\*) Доклад в Берлинском физическом обществе 18 марта 1955 г., Берлин — Шарлоттенбург. Опубликовано в Naturwissenschaften 42, 425 (1955).

рии относительности и о броуновском движении. Сколь ни различными кажутся эти темы, всё-таки между этими работами существует связь. В частности, эйнштейнова теория флуктуаций и броуновского движения покоится на соображениях, совершенно аналогичных его обоснованию представления о световых квантах. Это я попытаюсь выяснить как пример стремления к единообразному всеохватывающему представлению о природе, которое руководило Эйнштейном вплоть до нынешнего дня\*).

Позвольте мне, однако, сначала сказать несколько слов о ранней биографии Эйнштейна и о его внезапном появлении, как новой звезды на небосводе физики. Эйнштейн родился 14 марта 1879 г. в Ульме. Его родители вскоре переселились в Мюнхен, а позднее — в Павию в Италии. Сам он оставался в гимназии в Мюнхене; однако он нашёл школу настолько умерщвляющей дух, что в 1894 г. самовольно оставил её без выпускного экзамена и переехал к своим родителям, которые в то время жили в Милане. Тот же дух независимости побудил Эйнштейна выйти из иудейской религиозной общины и из германского подданства. В 1895 г. он переехал в Швейцарию, поступил в Аарау в кантональную школу, где веяли вольные ветры и где он нашёл таких же вольнодумных друзей, как и он сам.

Выдержав выпускной экзамен, Эйнштейн поступил в 1896 г. в Высшую техническую школу в Цюрихе с тем, чтобы изучать математику и физику. Среди его учителей был Герман Минковский, который впоследствии сыграл выдающуюся роль в разработке теории относительности. Минковский был также и моим учителем (в Геттингене); после появления работы Эйнштейна по теории относительности он как-то мне сказал: «По правде сказать, я этого от Эйнштейна не ожидал...». В 1900 г. Эйнштейн выдержал дипломный экзамен на звание учителя, однако испытал затруднения с получением места. В течение некоторого времени он был вспомогательным учителем в Винибертуре и Шафгаузене до тех пор, пока в 1902 г. не поступил в качестве «эксперта III класса» в Швейцарское патентное Бюро в Берне. После нужды, в которой он провёл свои ученические и студенческие годы, это маленькое, но прочное место казалось ему раем и 8 часов в день, которые он обязан был проводить в Бюро за своим столом, разбирая сухие патентные заявки, не мешали его размышлениям над физическими и философскими проблемами. В этом окружении, вдалеке от стимулов высшей школы, и возникли его великие труды. Когда я, много лет спустя, просил его помощи, чтобы устроить какого-нибудь способного ученика, я обычно получал ответ примерно следующего содержания: «Предоставьте ему быть сапожником или слесарем; если наука у него

---

\*) Доклад Борна был сделан ещё при жизни Эйнштейна, ровно за месяц до его неожиданной смерти. (Прим. ред.)

в крови и он на что-нибудь способен, — он сам найдёт свою дорогу». Тем не менее он помогал всегда, когда мог. Однако идея о том, что потребность в творчестве не должна иметь ничего общего с добыванием хлеба, никогда его не оставляла и ещё сейчас она жива, но по другой причине, к которой я ещё вернусь.

В том самом 1900 г., когда Эйнштейн сдавал свой дипломный экзамен, Макс Планк доложил в Немецком физическом обществе свою формулу излучения (19 октября)<sup>1</sup> и её толкование с помощью гипотезы квантов<sup>2</sup>. О впечатлении, которое произвело это сообщение я не имею никаких личных воспоминаний, так как в то время я был еще в школе и только готовился к выпускному экзамену. Осенью 1901 г. я начал учиться в университете, но не сразу сосредоточился на математике и физике, а изучал такие разнородные предметы, как зоология, политэкономия, астрономия и философия. Однако и в следующие годы, когда я в Бреславле, Гейдельберге, Цюрихе и Геттингене слушал лекции выдающихся математиков и немного занимался физикой, я узнал — главным образом от Минковского — о затруднениях в электродинамике движущихся систем, которые и повели к созданию теории относительности, но решительно ничего не знал о квантах. Последние были достоянием специалистов в области теплового излучения и, несмотря на экспериментальное подтверждение формулы Планка, считались своеобразной гипотезой *ad hoc*, которую не следует принимать серьезно.

Эйнштейн, однако, принял её серьезно. По годам он был старше меня на 4 года, но по интеллектуальному возрасту (как говорят психологи), наоборот, — старше на 8 лет или больше. Уже в возрасте между 12 и 16 годами он овладел го книгам дифференциальным и интегральным исчислением и с воодушевлением изучал другие разделы математики, тогда как я узнал эти вещи студентом нормально — на лекциях — правда тоже со воодушевлением. И хотя Эйнштейн в Цюрихском политехникуме удивлял своих учителей нерегулярным посещением лекций и некоторой безучастностью, причина этого состояла в том, что он почти всё излагавшееся на этих лекциях уже знал и занят был более глубокими проблемами.

В промежутки времени между 1900 и 1905 гг. теория квантов, повидимому, не сделала никаких успехов. Также и в основательной и широко охватывающей книге Э. Уиттекера «История эфира и электричества» (Sir Edmund Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity. Edinburgh, Th. Nelson & Sons Ltd., 1953), недавно вышедший второй том которой охватывает период с 1900 по 1926 год, ничего не сообщается об этом периоде.

Иная картина возникла, когда 50 лет назад появилась первая работа Эйнштейна<sup>3</sup>. Первые шесть параграфов этой работы содержали теоретические соображения, которые, за исключением немногих специалистов, привлекли к себе мало внимания. Однако последние три параграфа были посвящены совершенно новым применениям

квантов, а именно — к объяснению правила Стокса при люминесценции, к фотоэлектрическому эффекту и к ионизации газов. Общая точка зрения состояла в том, что во всех этих случаях речь идёт о превращении кинетической энергии  $E$  электрона в световой квант  $h\nu$  или наоборот, так что должно иметь место линейное соотношение вида

$$E = h\nu + \text{const.}$$

Это соотношение на диаграмме ( $E, \nu$ ) представляется в виде прямой с наклоном  $h$ , где  $h$  — универсальная постоянная Планка, значение которой было определено Планком из измерений излучения. Таким образом, это были доступные экспериментальной проверке утверждения и нет ничего удивительного в том, что физики-экспериментаторы на эту проблему набросились.

В мою задачу не входит излагать здесь историю экспериментальных исследований в этом направлении. Достаточно сказать, что работа Эйнштейна дала повод к многочисленным экспериментам и впервые навела порядок в области разнообразнейших явлений, связанных с возникновением и уничтожением излучения. Я, однако, хотел бы остановиться на упомянутых шести первых параграфах, так как собственно в них заключалась глубина и убедительная сила мыслей Эйнштейна.

Сам Эйнштейн не устаёт подчёркивать, что не существует однозначного логического пути от фактов опыта к теоретическим системам физики; последние, по его мнению, суть дети свободной фантазии. И однако же, ценность теории тем выше, наше доверие к ней тем больше, чем меньше в ней свободы выбора, чем больше её логическая принудительность. Мне представляется, что объединённые деяния Макса Планка и Альберта Эйнштейна удовлетворяют этому идеалу. Я попытаюсь пояснить это утверждение и притом с помощью обычной в настоящее время фразеологии и обозначений.

Планк в многолетней предварительной работе понял статистический характер чёрного излучения и развил методы его теоретического исследования. При этом он пришёл к убеждению, что энтропия, вследствие открытой Больцманом её связи с вероятностью состояния, является решающей величиной для описания поведения термостатистических систем. Относительно плотности излучения  $\rho$  было известно, что она должна иметь вид, предписываемый законом смещения Вина  $\rho = \nu^3 f(\nu/T)$  (откуда следует закон Стефана—Больцмана для полного излучения), и что имеются два предельные случая: для высоких температур имеет место закон Рэлея (пропорциональность  $\rho$  температуре  $T$ ), для низких — закон Вина (пропорциональность  $\exp(-\frac{a}{T})$ ).

Первый шаг Планка состоял в замене исследования излучения исследованием системы одинаковых линейных гармонических осцилля-

торов частоты  $\nu$ , находящихся в статистическом равновесии с излучением. Чисто электродинамический расчёт даёт для отношения плотности излучения  $\rho$  к средней энергии осциллятора  $U$  величину  $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ . Далее Планк вычисляет вторую производную энтропии  $S$  по энергии  $U$ ; я введу для этой величины сокращённое обозначение, полагая

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -k\gamma, \quad (1)$$

где  $k$  — газовая постоянная на одну частицу идеального газа; далее я буду пользоваться вместо температуры величиной  $\beta = \frac{1}{kT}$ . В таком случае простое термодинамическое рассмотрение; (см. добавление А, стр. 133) даёт

$$\gamma = - \left( \frac{dU}{d\beta} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Преимущество этого способа записи состоит в том, что в обоих упомянутых предельных случаях отнесённая к одному осциллятору энергия  $U$  является особенно простой функцией  $\beta$ , так что можно сразу написать явное выражение для (2). В самом деле, имеем:

$$\begin{array}{l} T \text{ [велико (Рэлей)} \\ T \text{ мало (Вин)} \end{array} \quad U = \begin{cases} \beta^{-1}, \\ U_0 e^{-\beta\varepsilon_0}; \end{cases} \quad \frac{dU}{d\beta} = \begin{cases} -U^2, \\ -\varepsilon_0 U. \end{cases} \quad (3)$$

Планк предпринял смелый шаг: интерполировать между обоими предельными случаями, образовав сумму

$$-U^2 - \varepsilon_0 U,$$

которая в предельных случаях больших или малых плотностей излучения переходит в одно из двух соответствующих выражений. С этим интерполяционным выражением получается путём интегрирования с учётом закона Вина для плотности излучения следующее выражение для средней энергии осциллятора (добавление Б):

$$U = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta\varepsilon_0} - 1}, \quad \varepsilon_0 = h\nu, \quad (4)$$

где  $h$  — константа. Это выражение ведёт с помощью указанного переводного множителя  $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$  к формуле излучения Планка.

Конечно, изложенные соображения едва ли можно считать выводом вследствие произвольности выбора величины  $\gamma$  для интерполяции.

Во второй работе<sup>2</sup> Планк толкует энергию осциллятора (4) как среднюю энергию для больцмановского распределения с конечными

квантами энергии,  $\varepsilon_n = n\varepsilon_0 = h\nu n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ):

$$U = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n e^{-\beta \varepsilon_n}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta \varepsilon_n}} = - \frac{d}{d\beta} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta n \varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta \varepsilon_0} - 1}$$

Только тот, кто, как я, вырос в классических традициях, может полностью оценить смелость этой идеи. Сам Планк был склонён рассматривать распределение энергии конечными квантами не как свойство самого излучения, но как результат его взаимодействия с осцилляторами. Здесь на сцене появился Эйнштейн<sup>3</sup>. Он открыл простое физическое значение использованной Планком для интерполяции величины  $\gamma^{-1}$ , которое непосредственно ведёт к представлению о независимых световых квантах и, кроме того, оправдывает самый метод интерполяции. Эйнштейн основывает свои рассуждения на соотношении Больцмана между энтропией  $S$  и вероятностью  $P$ :

$$S = k \ln P. \quad (5)$$

Так как это соотношение в то время ни в коем случае не было общепринятым, то Эйнштейн даёт сначала простой вывод его (который и сейчас кажется мне самым лучшим). Нижеследующие рассуждения теснейшим образом связаны с эйнштейновской теорией флуктуаций и броуновского движения.

Главная мысль вывода состоит в том, чтобы обратить формулу (5), рассматривая вероятность как функцию энтропии

$$P = e^{S/k}, \quad (6)$$

и использовать термодинамические свойства энтропии.

Представим себе, что система, находящаяся в термодинамическом равновесии, разделена на малые равные части; тогда, вследствие статистической природы теплоты, энергия  $E$  в любой части не будет равна средней энергии  $\bar{E}$ , приходящейся на каждую из частей, а будут иметь место флуктуации  $\Delta E = E - \bar{E}$ . Энтропию рассматриваемой части (при постоянном объёме) можно считать функцией  $E$  и разложить по степеням  $\Delta E$ . При этом полная энтропия не будет содержать линейного члена, так как для адиабатически изолированной системы суммы по всем частям  $\sum (\Delta E) = 0$ . В таком случае, принимая во внимание сокращённое обозначение (1), имеем:

$$\sum S = \text{const} - \frac{1}{2} k \gamma \sum (\Delta E)^2 + \dots$$

Из (6) теперь следует приближённо

$$P = e^{\frac{S}{k}} = P_0 e^{-\frac{1}{2} \gamma (\Delta E)^2}, \quad (7)$$

откуда получаем по (2) непосредственно (см. добавление В):

$$\overline{(\Delta E)^2} = \frac{1}{\gamma} = -\frac{dU}{d\beta}. \quad (8)$$

Это и есть основная формула флуктуаций энергии, используемая в эйнштейновской теории броуновского движения. Если, например, рассматривать материальную систему при постоянном объёме, то получается известный закон Эйнштейна

$$\overline{(\Delta E)^2} = kT^2 c_v, \quad (9)$$

где  $c_v = \frac{dU}{dT}$  — удельная теплоёмкость.

В случае излучения  $E$  означает полную энергию излучения частоты  $\nu$ , заключённую в выбранном за единицу малом объёме, т. е. величину, в среднем, равную  $\rho$ . Удобно вместо последней рассматривать величину  $U = \rho \frac{c^3}{8\pi\nu^2}$ , не имея ввиду при этом, что  $U$  можно определить как среднюю энергию находящегося в равновесии с излучением осциллятора. Впрочем, позднее выяснилось, что  $U$  имеет значение для самого излучения. Именно, поле излучения можно разложить по Фурье; тогда каждой компоненте Фурье соответствует осциллятор и оказывается, что  $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$  равно числу осцилляторов излучения в единице объёма для интервала частот, равного 1, а  $U$  есть энергия одного из этих осцилляторов.

Эйнштейн рассматривает (виновский) случай низких температур, где энергия излучения  $U$  в указанной мере выражается

$$U = U_0 e^{-\varepsilon_0/\beta};$$

в таком случае из (8) следует

$$\overline{(\Delta E)^2} = \varepsilon_0 U \quad (T \text{ — малое}).$$

Если рассматривать  $E$  как кратное  $n$  малых «квантов энергии»  $\varepsilon_0$

$$E = n\varepsilon_0, \quad (10)$$

то получается  $U = \varepsilon_0 \bar{n}$ , где  $\bar{n}$  — среднее число квантов и для среднего квадрата флуктуации  $n$  будем иметь:

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} \quad (T \text{ — малое}). \quad (11)$$

Но эта формула означает, на основе известных статистических законов, что энергия излучения ведёт себя так, как если бы она состояла из независимых частиц величины  $\varepsilon_0 = h\nu$ .

В этом и состоит в существенных чертах теоретическая часть работы Эйнштейна. Позвольте мне, однако, сделать ещё один шаг.

Такое же рассуждение, как и только что выполненное, ведёт в (рэлеевском) предельном случае высоких температур, где  $U = \beta^{-1}$ , к формуле

$$\overline{(\Delta E)^2} = U^2 \quad (T \text{ — велико}) \quad (12)$$

или

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n}^2 \quad (T \text{ — велико}). \quad (13)$$

Планковская интерполяция путём сложения обоих значений, имеющих место в предельных случаях, оправдывается простым замечанием, что средний квадрат флуктуации аддитивен, если флуктуации вызываются независимыми влияниями.

Каковы же эти процессы? Один из них истолковал Эйнштейн: при низких температурах, т. е. при малых плотностях энергии, излучение ведёт себя как идеальный газ. Но в чём же состоит второй процесс, проявляющийся в чистом виде при высоких температурах? Г. А. Лоренц показал, что статистическое собрание плоских волн с произвольными амплитудами и фазами как раз ведёт к выражению (13) для флуктуаций энергии.

Мы видим таким образом, что неявно в работе Эйнштейна уже полностью содержится дуализм волны-частицы. В случае малых плотностей энергии проявляются частицы, их число испытывает флуктуации по закону (11); для больших плотностей имеет место (13) и, наконец, для средних плотностей

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} + \bar{n}^2 = \bar{n}(\bar{n} + 1). \quad (14)$$

Здесь, таким образом, проявляется та особенность квантовых эффектов, что из классических формул получаются правильные квантовые формулы, если заменить  $n^2$  через  $n(n+1)$ .

Как же были приняты эти идеи? Я позволю себе говорить о моём собственном опыте. В Геттингене, насколько я припоминаю, я ничего не слышал о квантах; также и в Кэмбридже, где я весной и летом 1906 г. несколько месяцев слушал лекции Дж. Дж. Томсона и Лармора и прошёл экспериментальный курс в Кэвэндишской лаборатории. Только тогда, когда я осенью 1906 г. приехал в Бреславль к Луммеру и Прингсгейму, я попал в настоящую квантовую атмосферу. Ибо оба они сделали существенный вклад в экспериментальное изучение чёрного излучения. Но хотя в центре дискуссии стояла формула Планка, обсуждающие склонны были гипотезу Планка о квантовании энергии осциллятора рассматривать как предварительную рабочую гипотезу, а световые кванты Эйнштейна всерьёз не принимали. Ведь, в самом деле, Луммер был большой специалист в области волновой оптики — вспомните пластинку Луммера — и было бы слишком много требовать от того, кто каждый



день наблюдал интерференцию, чтобы он поверил в возрождение корпускулярной теории. Делались попытки понять закон  $E = h\nu$  классически. Также и я повинен в этом прегрешении; приведу Вам, шутки ради, мои рассуждения. Вообразите яблоню, у которой длина  $l$  черенков яблок убывает пропорционально квадрату высоты  $H$  над землёй, тогда  $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{l}} \sim H$ . Если теперь трести

яблоню с определённой частотой, то яблоки, висящие на определённой высоте, раскачаются в резонанс, упадут вниз и долетят до земли с кинетической энергией, пропорциональной высоте, с которой они упали, а потому и пропорциональной частоте  $\nu$ : Voilà! Теперь нам это рассуждение кажется наивным, чтобы не сказать — детским. Но в извинение моё могу сообщить, что сам Макс Планк привёл эту модель в какой-то сбое лекции. Откуда он её взял — не знаю.

В начале 1907 г. Эйнштейн сделал второй существенный шаг в теории квантов. Я имею в виду его теорию теплоёмкости<sup>4</sup>. Последняя ясно показывает, что дело отнюдь не сводится к смене энергией между излучением и частицами, как это думал Планк, но что речь идёт о весьма общем принципе, охватывающем электродинамику и механику. Каким образом этот взгляд сформировался в моём мозгу, я точно не могу припомнить. Я познакомился тем временем с Эйнштейном и в разговорах с ним научился большому, нежели из его статей. Внешне моё присоединение к точке зрения Эйнштейна проявилось в опубликованной мною совместно с моим другом Теодором Карманом теории теплоёмкости кристаллической решётки, — теории, в которой соображения Эйнштейна уточнены путём учёта колебательного спектра, в чём, впрочем, нас на несколько недель предупредил Дебай. Но это было уже в 1912 г. В следующем году созрел план Берлинской Академии наук, состоявший в том, чтобы пригласить в Берлин Эйнштейна, который в то время был профессором Высшей технической школы в Цюрихе. Для поддержания этого плана четыре наиболее выдающихся германских физика — Планк, Нернст, Рубенс и Варбург — сделали Прусскому Министерству просвещения представление, в котором они перечислили и оценили заслуги Эйнштейна. При этом произошёл удивительный пассаж, о котором я могу рассказать Вам, не рискуя быть нескромным, так как он напечатан в прекрасной книге Карла Зелига «Альберт Эйнштейн и Швейцария»<sup>\*)</sup>. В представлении, о котором шла речь, говорится: «Подводя итог, можно сказать, что среди больших проблем, которыми так богата современная физика, не существует ни одной, в отношении которой Эйнштейн не занял бы примечательной позиции. То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком сильно ставить ему в упрёк.

<sup>\*)</sup> Carl Seelig, Albert Einstein und die Schweiz. Zurich: Europa—Verlag, 1952.

Ибо не решившись пойти на риск, нельзя осуществить истинно-нового даже в самом точном естествознании».

Эта цитата иллюстрирует тот скепсис в отношении представления о световых квантах, который в то время был всеобщим. В мою задачу не входит описывать постепенную перемену настроений. Хочу отметить только несколько важнейших событий. К числу их относится прежде всего замечание Дж. Дж. Томсона, сделанное в 1907 г. и состоявшее в том, что число атомов, ионизованных рентгеновскими лучами, по мере удаления от источника лучей убывает, между тем как для каждого акта ионизации должна быть доставлена одна и та же энергия. Из этого он заключил, что излучение состоит не из сферических волн, но что оно скорее ведёт себя, как дождь частиц. Позднее (1916 г.) Эйнштейн обосновал эту идею «игольчатого излучения» (Nadelstrahlung) статистически<sup>1)</sup>, вычислив импульс, который получает и отдаёт взвешенная в световом поле частица при поглощении и испускании. Оказалось, что требование, чтобы при этом не нарушалось нормальное броуновское движение, выполнимо только в том случае, если излучение ведёт себя как газ частиц с энергией  $h\nu$  и импульсом  $h\nu/c$ .

Тем временем, начиная с 1913 г., стали появляться работы Бора о квантовой теории электронных орбит в атомах и о происхождении спектров. С тех пор стало ясно, что в физике будущего идея квантов должна играть доминирующую роль. За дискуссией о квантовых условиях и правилах отбора, необходимых для описания движения электронов, квантовая структура света была почти забыта до тех пор, пока в 1922 г. она снова стала актуальной благодаря открытию эффекта Комптона и его объяснению как следствия соударения фотонов и электронов. Это истолкование основано на применении законов сохранения энергии и импульса, причём используются оба открытия Эйнштейна, которые мы в эти дни особенно отмечаем\*), а именно используются релятивистские формулы

$$E = mc^2, \quad p = mc, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

для электрона и квантовые формулы

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c}$$

для фотона.

К тому же кругу идей принадлежит работа Смекала, который в следующем 1923 г. обратил внимание на то, что согласно закону сохранения энергии в случае системы, состоящей из атома (или молекулы) и фотона, следует ожидать существования нового вида

\*) Доклад Борна был сделан по случаю 50-летия специальной теории относительности. (Прим. ред.)

рассеяния света, а именно рассеяния с изменением длины волны. Это дало повод к пересмотру теории дисперсии с точки зрения квантовых представлений Ладенбургом, Крамерсом и Гейзенбергом, — важный шаг в медленном развитии, которое привело в конце концов к квантовой механике. Предсказанное Смекалем явление, которое теперь называется эффектом Рамана\*), было открыто только в 1928 г. Раманом на молекулах и Ландсбергом и Манделыштамом — на кристаллах.

Что же касается формулы излучения, то Эйнштейн вывел её в 1916 г. на основе постулатов Бора о стационарных состояниях<sup>6</sup>, рассматривая испускание и поглощение световых квантов по аналогии с радиоактивным распадом. Имеющая место при этом симметрия вероятностей перехода  $A_{mn}$  между состояниями  $m$  и  $n$ ,  $A_{mn} = A_{nm}$  также была важным предвестником квантовой механики. Этот вывод формулы излучения из вероятностей перехода соответствует в теории газов использованию формулы соударений Больцмана. Но законы равновесия газа можно вывести также, не рассматривая процессов соударения, путём отыскания наивероятнейшего состояния. Нельзя ли получить также и формулу излучения как энергетическое уравнение состояния фотонного газа? Первоначальные рассуждения Эйнштейна, связанные с флуктуациями, шли в этом направлении, однако они привели только для случая малых плотностей излучения к формуле (11), характерной для газа, тогда как в общем случае имеет место более сложная формула (14). Этот вопрос долгое время занимал и беспокоил Эйнштейна и когда в 1924 г. индусский физик Бозе нашёл решение, учитывая в статистике принципиальную неразличимость фотонов, Эйнштейн тотчас воспринял эту идею и распространил её на материальные частицы<sup>7</sup>. Он тогда уже знал о смелых идеях де-Бройля, лёгших в основу волновой механики (работы де-Бройля публиковались в виде коротких сообщений, начиная с 1923 г., а в 1924 г. были собраны в его знаменитой диссертации). Статистика Бозе—Эйнштейна является последним положительным вкладом Эйнштейна в развитие квантовой механики. На этом я могу оборвать мой исторический обзор. Начиная с этого момента, отношение Эйнштейна к заложенным им самим основам квантовой теории становится всё более критическим и скептическим.

Он сам выявил парадоксальный дуализм волны-частицы. Главная задача теоретической физики состояла в преодолении этого кажущегося дуализма. Это было осуществлено двумя путями: путём обобщения представлений Бора об электронных орбитах возникла матричная механика, которая была основана Гейзенбергом и разработана им совместно с П. Иорданом и со мною, а также независимо от нас — Дираком; из гипотезы де-Бройля возникла волновая

\*) В советской литературе принят термин «комбинационное рассеяние». (Прим. ред.)

механика Шредингера. Вскоре, однако, оказалось, что оба метода являются лишь различными представлениями одной и той же теории.

Формализм теории был уже хорошо разработан и обоснован прежде чем удалось найти разумную интерпретацию. Эта интерпретация отличается от классической теории отказом от точного предвычисления физических ситуаций; она позволяет лишь вычислять вероятности. Подавляющее большинство физиков приняло эту интерпретацию, — особенно экспериментаторы, так как эта интерпретация точно соответствует эмпирическому положению в исследовании атомов.

Но Эйнштейн считал статистическую интерпретацию неудовлетворительной и вновь и вновь пытался её опровергнуть. При этом, однако, интерпретация квадрата волновой функции, как вероятности, принадлежит самому Эйнштейну. Это он высказал мысль, что средняя плотность фотонов в световом луче должна совпадать с плотностью энергии электромагнитных волн, описывающих этот луч. Эту же самую идею я выдвинул в 1927 г. для истолкования волновой функции Шредингера; с соответствующими обобщениями она в настоящее время общепринята. Кажущееся противоречие в одновременном использовании волновых и корпускулярных представлений было снято соотношениями неопределённости Гейзенберга. Выдвинутое Нильсом Бором понятие дополнительности дало всему зданию квантовой механики теоретико-познавательный фундамент.

Сам фотон есть, конечно, особая частица: у него нет массы покоя и он всегда движется с одной и той же скоростью. Он относится, собственно, не к квантовой механике, а к квантовой электродинамике. Уже в первых работах Гейзенберга, Йордана и моих выполнено квантование электромагнитного поля путём установления перестановочных соотношений между компонентами поля и в качестве важнейшего применения дан вывод формулы флуктуаций (14) для электромагнитного поля путём интерференции квантованных волн, причём сумма  $n + n^2$  появляется автоматически. Это и было началом, из которого возникла современная рафинированная квантовая электродинамика Швингера, Фейнмана и др.

Но ни философия Бора, ни огромные успехи обыкновенной квантовой механики, ни поразительная точность полученных с помощью квантовой электродинамики результатов не могли заставить Эйнштейна признать эти теории. Он не отрицал их применимость, но считал их неполными, предварительными вспомогательными средствами, которые в будущем должны быть заменены чем-то лучшим.

Позиция Эйнштейна покоилась на его философских убеждениях. Я процитирую два места из его писем ко мне, которые я, впрочем, с его разрешения, опубликовал в одной моей книге (*Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon Press, Oxford, 1949).

В письме от 7 ноября он писал:

«В наших научных взглядах мы развились в антиподы. Ты веришь в играющего в кости бога, а я — в полную закономерность в мире

объективно сущего, что я пытаюсь уловить сугубо-спекулятивным образом. Я надеюсь, что кто-нибудь найдёт более реалистический путь и соответственно более осязаемый фундамент для подобного воззрения, нежели это удалось сделать мне. Большие первоначальные успехи теории квантов не могли меня заставить поверить в лежащую в основе игру в кости».

От 3 декабря 1947 г.:

«Мою физическую позицию я не могу для тебя обосновать так, чтобы ты её признал сколько-нибудь разумной. Конечно, я понимаю, что принципиально статистическая точка зрения, необходимость которой впервые ясно осознана была тобой, содержит значительную долю истины. Однако я не могу в неё серьёзно верить потому, что эта теория несовместима с основным положением, что физика должна представлять действительность в пространстве и во времени без мистических дальнедействий... В чём я твёрдо убеждён, так это в том, что в конце концов останутся на теории, в которой закономерно связанными вещами будут не вероятности, но факты, как это и считалось недавно само собой разумеющимся. В обоснование этого убеждения я могу привести не логические основания, а мой мизанец, как свидетеля, — т. е. авторитет, который не внушает доверия за пределами моей кожи».

Год с небольшим назад у меня снова была переписка с Эйнштейном по поводу небольшой статьи, в которой он развивает на конкретном примере ту же мысль: отрицание вероятностей как единственного объекта физической теории. При анализе этой модели у меня возникло сомнение в том, может ли на самом деле классическая механика делать детерминистические утверждения. В результате я убедился в том, что механистический детерминизм покоится на допущении, противоречащем методу мышления современной физики, обоснованному самим Эйнштейном, а именно противоречит постулату, согласно которому не имеют смысла утверждения, принципиально недоступные экспериментальной проверке. Небольшое сообщение по этому поводу я опубликовал недавно в журнале «Physikalische Blätter». В нём я обосновываю мысль о том, что и классическая механика может высказывать лишь вероятностные положения.

Поэтому возражение Эйнштейна против статистической интерпретации квантовой механики мне представляется беспредметным. Однако из цитированных выдержек из писем, а также и из позднейшей переписки вытекает, что отклонение Эйнштейном современной квантовой физики обусловлено не столько вопросом о детерминизме, сколько его верой в объективную реальность физического бытия независимо от наблюдателя. В другом месте я показал, что возражения Эйнштейна можно отвести, если проанализировать понятие реальности физических объектов и при этом соответственно использовать математическое понятие инвариантности относительно преобразований. Эйнштейн не ограничился критикой статистической интерпретации

квантовой механики, но непрерывно стремился создать другую основу для физики. Исходной позицией для него служила при этом общая теория относительности, которую он пытался обобщить в надежде прийти в конце концов к объяснению квантовых явлений и элементарных частиц. Положительных результатов он не получил, и физики мало знали о его больших и трудных работах.

Тем самым Эйнштейн оказался в изоляции, которая была бы трагической, если бы не его радостный, оптимистический темперамент, который охранял его от горечи. Он ведь всегда был одиночкой. Он стремился к познанию не для материальных выгод и не для славы. Трагедия его жизни есть трагедия науки вообще, — трагедия злоупотребления наукой в политическом состязании государств. Что думал он сам по этому поводу, показывает его короткое письмо к редактору американской газеты «The Reporter»:

«Вы спрашиваете меня, что я думаю о Ваших статьях по поводу положения естествоиспытателей в Америке. Вместо того, чтобы пытаться анализировать проблему, я хочу выразить моё ощущение в виде короткого замечания: если бы я снова стал молодым человеком и должен бы был выбирать профессию, то я бы не пытался стать научным работником — учёным или педагогом. Я предпочёл бы быть жестянщиком или разносчиком в надежде получить ту небольшую независимость, которая при современных обстоятельствах ещё возможна». Эту же самую мысль он высказывал мне ещё в относительно спокойное время, свыше 40 лет назад, в качестве совета молодому физику. Едва ли возможна более скромная и вместе с тем более резкая форма осуждения современного применения науки, которая служит в этом мире не духу, но силе. Однако это не относится к нашей теме.

Характеристика Эйнштейна как учёного и мыслителя была бы, однако, не полна, если не сказать хотя бы несколько слов об Эйнштейне, как о человеке. Позвольте мне поэтому закончить несколькими строками из одного его письма ко мне:

«Ощущение того, как надо поступать и как не надо, растёт и умирает подобно дереву, но никакое удобрение не может в этом сыграть существенной роли. Что должен делать каждый человек — это давать пример чистоты и иметь мужество серьёзно сохранять этические убеждения в обществе циников. С давних пор я стремлюсь поступать таким образом — с переменным успехом».

Это — слова разочарования того, кто верил в предопределение также и в человеческих делах, но кто учитывал влияние этической личности. Вероятно, этот своеобразный метод спасения моральной свободы философски весьма спорен. Но и эйнштейнова философия физики кажется мне спорной. Это не должно нарушить нашу дружбу, ибо речь идёт не о доктринах, но о чистоте и о честности в мыслях и в чувствах. И в том, и в другом отношении мы чтим Эйнштейна как образец и как учителя.

## ДОБАВЛЕНИЯ

А. Для каждой термодинамической системы имеет место при постоянном объеме

$$dS = \frac{dU}{T} = k\beta dU; \quad (1)$$

поэтому

$$\left. \begin{aligned} -k\gamma &= \frac{d^2S}{dU^2} = \frac{d}{dU}(k\beta) = k \frac{d\beta}{dU}, \\ \gamma &= -\left(\frac{dU}{d\beta}\right)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Б. Если положить вместе с Планком

$$\frac{dU}{d\beta} = -U^2 - \varepsilon_0 U, \quad (3)$$

то, выполняя элементарное интегрирование и принимая во внимание граничное условие, состоящее в том, что при  $\beta = 0$  имеет место закон Рэлея  $U = \beta^{-1}$ , получаем:

$$U = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta\varepsilon_0} - 1}. \quad (4)$$

Из закона смещения Вина

$$\rho = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

следует для

$$U = \rho \frac{c^3}{8\pi\nu^2},$$

$$U = \nu F(\nu\beta), \quad (5)$$

т. е. должно быть

$$\varepsilon_0 = h\nu. \quad (6)$$

В. (7) есть распределение Гаусса в переменных  $\Delta E = x$ . Если нормировать полную вероятность к 1,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P dx = P_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\gamma x^2} dx = P_0 \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} = 1, \quad (7)$$

откуда

$$P_0 = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}},$$

так что

$$P(x) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\gamma x^2}. \quad (8)$$

Отсюда получаются средние значения

$$\overline{\Delta E} = \overline{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x P(x) dx = 0,$$

$$(\overline{\Delta E})^2 = \overline{x^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-\frac{1}{2} \gamma x^2} dx = \frac{1}{\gamma}.$$

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Planck M., Verh. deutsch. phys. Ges. 2, 202 (1900).
2. Planck M., Verh. deutsch. phys. Ges. 2, 237 (1900).
3. Einstein A., Ann. Phys. 17, 132 (1905); 20, 199 (1906); Phys. Zeits. 10, 185, 817 (1909).
4. Einstein A., Ann. Phys. 22 180 (1907).
5. Einstein A., Mitt. phys. Ges., Zürich, № 18 (1916); Phys. Zeits. 18, 121 (1917).
6. Einstein A., Ber. deutsch. phys. Ges. 18, 318 (1916).
7. Einstein A., Sitzungsber. preuß. Akad., Berlin, 261 (1924); 3, 18 (1925).