

530.145.6

## ПОПЫТКА ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРИИ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ\*)

Л. де Бройль (Париж)

(Поступило 1 октября 1923 г.)

## I. СВЕТОВОЙ КВАНТ

Накопленные в последние годы экспериментальные доказательства, по-видимому, решительно свидетельствуют в пользу действительного существования световых квантов. Кажется все более и более правдоподобным, что фотоэлектрический эффект, являющийся основным механизмом обмена энергией между излучением и материей, всегда подчиняется эйнштейновскому закону фотоэффекта. Опыты по фотографическим действиям света и недавние результаты А. Комптона об изменении длины волны рассеянных рентгеновских лучей было бы трудно объяснить без использования представления о световых квантах. С теоретической стороны представления Бора, которые подтверждаются столь многими экспериментальными доказательствами, основаны на том постулате, что атомы могут испускать или поглощать лучистую энергию частоты  $\nu$  только ограниченными количествами, равными  $h\nu$ ; теория Эйнштейна флуктуаций энергии в черном излучении также с необходимостью приводит к подобным представлениям.

В настоящей статье\*\*) я буду предполагать реальное существование световых квантов и постараюсь выяснить, как можно примирить с этим предположением неоспоримые экспериментальные данные, на которых основана волновая теория.

Особенно естественным из-за своей простоты предположением является допущение того, что все световые кванты одинаковы и что различны лишь их скорости. Мы предположим также, что «масса покоя» каждого светового кванта имеет заданную величину  $m_0$ ; поскольку атомы света обладают скоростями, очень близкими по величине к эйнштейновской предельной скорости  $c$ , они должны иметь малую (но не бесконечно малую в математическом смысле) массу; частота соответствующего излучения должна быть связана с полной энергией кванта соотношением

$$h\nu = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \left(\beta = \frac{v}{c}\right),$$

однако, так как величина  $1 - \beta^2$  очень мала, мы можем написать, что

$$\beta = \frac{v}{c} = 1 - \frac{1}{2} \frac{m_0^2 c^4}{h^2 \nu^2}.$$

Световые кванты, вероятно, имеют скорости, несколько различающиеся по величине, однако различие настолько невелико, что разница между значениями этих скоростей и значением  $c$  не может быть установлена

\*) Louis de Broglie, A Tentative Theory of Light Quanta, The London, Edinburgh, and Dublin Phil. Mag. and J. Sci. 47 (No. 278), 446—458 (February 1924). (Представлено Р. Г. Фаулером.) Перепечатывается в переводе А. М. Бродского из сборника «Вариационные принципы механики» (редакция, послесловие и примечания Л. С. Полака, М., Физматгиз, 1959), с. 631—640.

\*\*) Эта ранняя работа де Бройля по теории квантов имеет несколько сумбурный характер, но уже в ней намечены основные результаты, полученные им в его опубликованной позднее основной работе [Recherches sur la théorie des quanta, Ann. de Phys. 3, 22 (1925)]. (Прим. Л. С. Полака.)

с помощью каких-либо экспериментальных средств. Величина  $m_0$  должна иметь, по-видимому, самое большее порядок  $10^{-50}$  г \*).

Как очевидно, световые кванты должны обладать внутренней бинарной симметрией, связанной с симметрией электромагнитных волн и определяемой некоторой осью поляризации. Позднее мы снова вернемся к этому замечанию.

## II. ЧЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ГАЗ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ

Рассмотрим газ, состоящий из описанных нами выше световых квантов. При заданной температуре (не слишком близкой к абсолютному нулю) почти все эти световые атомы имеют скорости  $v = \beta c$ , очень мало отличающиеся по величине от  $c$ . Полная энергия каждого из этих атомов равна

$$W = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

а его количество движения равно

$$G = -\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

так что приближенно

$$G = \frac{W}{c}.$$

Легко видеть, что давление подобного газа на ограждающую стенку равно

$$p = \frac{n}{6} \cdot 2Gc = \frac{1}{3} nW,$$

где  $n$  — число световых квантов в единице объема.

Это выражение совпадает с выражением, следующим из электромагнитной теории; используя нерелятивистские формулы, мы получили бы вдвое больший результат.

Теперь возникает вопрос, можем ли мы применять для квантового газа максвелловский закон распределения энергии? В механике Эйнштейна сохраняется силу теорема Лиувилля, на которой основывается статистическая механика; мы можем, далее, взять для величины элементарной фазовой ячейки значение, пропорциональное  $dx dy dz dp dq dr$ , если переменные  $x, y, z$  являются прямоугольными координатами, а  $p, q, r$  — соответствующими импульсами. Вследствие канонического закона распределения число атомов, изображающая точка которых находится в элементе  $dx dy dz dp dq dr$ , должно быть пропорционально величине

$$e^{-W/kT} dx dy dz dp dq dr = e^{-W/kT} \cdot 4\pi G^2 dG dv,$$

где  $dv$  — элемент объема, а  $G$  — импульс. Поскольку  $G = W/c$ , это число определяется также выражением

$$C^4 e^{-W/kT} W^2 dW dv.$$

Каждый квант имеет полную энергию, равную  $h\nu$ ; в этом случае энергия, содержащаяся в объеме  $dv$  и переносимая световыми квантами с энергией  $h\nu$ , равна

$$C^4 e^{-h\nu/kT} \nu^3 d\nu dv.$$

\*) Замечание о конечной, не равной нулю массе фотона неправильно, так как противоречит условию калибровочной инвариантности. (Прим. Л. С. Полака.)

Это, очевидно, виновская предельная форма закона излучения. Два года назад мне удалось \*) показать, что, используя предложенную Планком гипотезу о том, что величина элемента фазового объема равна  $(1/h^3) \times dx dy dz dp dq dr$ , можно получить для плотности лучистой энергии значение

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

Это было хотя и не полным, но обнадеживающим результатом. Казалось, что предположение о конечных элементах фазового объема имеет несколько произвольный и необъяснимый характер. Более того, закон Вина является только предельной формой истинного закона излучения. Для объяснения другого члена ряда я был вынужден предположить существование различных квантовых агрегатов.

Сейчас такие трудности, по-видимому, могут быть устранены, но, прежде чем перейти к соответствующему изложению, нам нужно выяснить ряд понятий; впоследствии мы еще вернемся к газу «черного излучения».

### III. ВАЖНАЯ ТЕОРЕМА О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ

Рассмотрим движущееся тело, масса покоя которого равна  $m_0$ ; движение происходит по отношению к определенному наблюдателю со скоростью  $v = \beta c$  ( $\beta < 1$ ). Вследствие принципа эквивалентности упомянутое тело должно обладать внутренней энергией  $m_0 c^2$ . Квантовые соотношения наводят на мысль приписать эту внутреннюю энергию некоторому периодическому явлению, частота которого равна  $\nu_0 = (1/h)m_0 c^2$ . Для покоящегося наблюдателя полной энергией является величина  $m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$  и соответствующей частотой будет  $\nu = (1/h) m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ .

Однако если на внутреннее периодическое явление смотрит покоящийся наблюдатель, то частота данного явления ему будет казаться более низкой и равной  $\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ , т. е. наблюдателю процесс покажется протекающим пропорционально  $\sin 2\pi \nu_1 t$ . Частота  $\nu_1$  совершенно отлична от  $\nu$ ; однако эти частоты связаны согласно основной теореме, дающей нам физическую интерпретацию величины  $\nu$ .

Предположим, что в момент  $t = 0$  движущееся тело совпадает по длине с волной, обладающей заданным выше значением частоты  $\nu$  и распространяющейся со скоростью  $c/\beta = c^2/v$ . Согласно предположениям Эйнштейна, подобная волна не может переносить энергии.

Наша теорема заключается в следующем: *Если внутреннее явление в движущемся теле совпадает в начальный момент по фазе с волной, то это фазовое соответствие будет сохраняться и в дальнейшем.* В самом деле, в момент  $t$  движущееся тело находится на расстоянии  $x = vt$  от исходного положения, а происходящее в нем внутреннее явление пропорционально  $2\pi \nu_1 x/v$ ; волна в этой же точке определяется выражением  $\sin 2\pi \nu [t - (\beta x/c)] = \sin 2\pi \nu x [(1/v) - (\beta/c)]$ . Оба эти содержащие синус выражения будут равны, и фазовое соответствие сохранится, если соблюдено следующее условие:

$$\nu_1 = \nu(1 - \beta^2),$$

которое, очевидно, выполняется по определению величин  $\nu$  и  $\nu_1$ . Этот важный результат неявно содержится в лоренцовом преобразовании времени. Если местным временем наблюдателя, движущегося вместе с телом, является  $\tau$ , то это время будет определять внутреннее явление посредством

\*) См. J. de Phys., nov. 1922.

функции  $\sin 2\pi\nu_0 t$ . Согласно преобразованию Лоренца, покоящийся наблюдатель должен описывать то же самое явление посредством функции  $\sin 2\pi\nu_0 (1/\sqrt{1-\beta^2}) [t - (\beta x/c)]$ , которая может интерпретироваться как описание волны с частотой  $\nu_0/\sqrt{1-\beta^2}$ , распространяющейся вдоль оси  $x$  со скоростью  $c/\beta$ .

Мы далее, склоняемся к тому допущению, что, быть может, каждое движущееся тело сопровождается волной и что разделение движения тела и распространения волны является невозможным.

Эта мысль может быть выражена также другим способом. Группа волн с очень мало отличающимися частотами имеет «групповую скорость»,  $U$ , которая недавно была изучена лордом Рэлеем и которая в обычной теории является скоростью «распространения энергии». Эта групповая скорость связана с фазовой скоростью  $V$  соотношением

$$\frac{1}{U} = \frac{d(\nu/V)}{d\nu}.$$

Если частота  $\nu$  равна  $(1/h) m_0 c^2 / \sqrt{1-\beta^2}$ , а величина  $V$  равна  $c/\beta$ , то мы получаем соотношение  $U = \beta c$ , так что можно сказать: *скорость движущегося тела является скоростью распространения энергии группы волн, обладающих при очень мало отличающихся значениях  $\beta$  частотами  $(1/h) m_0 c^2 / \sqrt{1-\beta^2}$  и скоростями  $c/\beta$ .*

#### IV. МЕХАНИКА И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Попытка распространения предыдущих положений на случай переменной скорости является, хотя и весьма трудной, но очень заманчивой задачей. Если движущееся тело описывает в какой-либо среде кривую траекторию, то мы говорим, что существует силовое поле; в каждой точке поля может быть подсчитана потенциальная энергия, и проходя через эту точку, тело обладает скоростью, которая определяется из условия постоянства значения его полной энергии. По-видимому, естественно предположить, что фазовая волна должна иметь в некоторой точке скорость и частоту, определяемые тем значением, *которое имела бы величина  $\beta$ , если бы тело находилось в данной точке.* Распространяясь, фазовая волна обладает постоянной частотой  $\nu$  и непрерывно изменяющейся скоростью  $V$ .

Быть может, какой-либо новый электромагнетизм дает нам законы данного сложного распространения, однако окончательный результат ясен, по-видимому, заранее: *именно, лучи фазовой волны совпадают с динамически возможными траекториями.* В самом деле, траектория лучей может быть здесь подсчитана с помощью принципа Ферма так же, как в средах с переменной дисперсией; в данном случае принцип Ферма может быть записан следующим образом ( $\lambda$  — длина волны,  $ds$  — элемент траектории):

$$\delta \int \frac{ds}{\lambda} = \delta \int \frac{\nu ds}{V} = \delta \int \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} ds = 0.$$

По принципу наименьшего действия в форме Мопертюи динамическая траектория определяется уравнением

$$\delta \int m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - \sqrt{1-\beta^2} \right) dt = \delta \int \frac{m_0 \beta^2 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} dt = \delta \int \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} ds = 0.$$

Данный результат оправдывает приведенное выше утверждение.

После этого настолько просто показать выполнимость теоремы о фазовом соответствии, что дальнейшие детали доказательства приводить, по-видимому, не требуется.

Настоящая теория подсказывает интересное объяснение условий устойчивости Бора. В момент времени  $t = 0$  электрон находится в точке  $A$  своей траектории. Исходящая в этот момент из точки  $A$  фазовая волна опишет всю траекторию и вновь встретится с электроном в точке  $A'$ . Очевидно, необходимо, чтобы при встрече с электроном данная волна находилась с ним в одной фазе. Это можно выразить так: «Движение может быть устойчивым лишь в том случае, если длина фазовой волны соизмерима с длиной траектории». Условием соизмеримости в этом случае будет соотношение

$$\int \frac{ds}{\lambda} = \int_0^T \frac{m_0 \beta^2 c^2}{h \sqrt{1-\beta^2}} dt = n$$

( $n$  — целое число,  $T$  — период вращения).

Мы можем в квантовой теории записывать условия устойчивости во введенной Эйнштейном общей форме, которая в квазипериодических случаях вследствие существования бесконечного количества псевдопериодов вырождается в условия Зоммерфельда. Обозначим импульсы через  $p_x, p_y, p_z$ ; тогда общее условие Эйнштейна примет вид

$$\int (p_x dx + p_y dy + p_z dz) = nh \quad (n — \text{целое число}),$$

или, иначе,

$$\int_0^T \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dt = \int_0^T \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \beta^2 c^2 dt = nh,$$

что в точности совпадает с полученным ранее результатом.

## V. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ И ПРОБЛЕМА КОГЕРЕНТНОСТИ

Используем теперь наши результаты для изучения того, как распространяются свободные световые кванты, скорость которых по величине всегда лишь ненамного меньше, чем  $c$ . Мы можем сказать: «Атом света с полной энергией, равной  $h\nu$ , является областью внутреннего периодического явления, протекающего с точки зрения неподвижного наблюдателя всюду в одной фазе с волной, распространяющейся по тому же направлению, что и атом света, со скоростью, почти совпадающей со скоростью света  $c$  (немного большей)». Световой квант является до известной степени частью этой волны; для объяснения интерференции и других явлений волновой оптики нужно, однако, еще понять, каким образом частью *одной и той же* волны может быть несколько световых квантов. В этом заключается проблема когерентности.

В теории световых квантов приходится, по-видимому, ввести следующую гипотезу: «Возбужденный атом при встрече с фазовой волной приобретает определенную вероятность испустить световой квант; эта вероятность зависит везде от интенсивности указанной волны». Возможно, что эта гипотеза покажется произвольной, но я все же считаю, что любая теория когерентности должна принять какой-нибудь постулат такого рода.

Как известно, испускание радиоактивными веществами  $\gamma$ -лучей является полностью самопроизвольным,<sup>1</sup> тем не менее это обстоятельство

не может рассматриваться как возражение против нашего взгляда, так как «среднее время жизни» каждого из известных радиоактивных атомов всегда намного больше, чем период  $\gamma$ -лучей.

Итак, при испускании некоторым атомом светового кванта одновременно излучается сферическая фазовая волна, которая в свою очередь будет возбуждать, встречаясь с близкими к источнику излучения атомами, новое испускание квантов. Эта нематериальная фазовая волна будет переносить большое количество малых порций энергии, которые постепенно будут данной волной теряться и внутренние явления у которых являются когерентными.

## VI. ДИФРАКЦИЯ НА КРАЮ ЭКРАНА И ПРИНЦИП ИНЕРЦИИ

Корпускулярная теория света встречается в данном случае с большими трудностями. Уже со времен Ньютона известно, что проходящие вблизи края экрана световые лучи не остаются прямолинейными и что некоторые из них проникают в область геометрической тени. Ньютон приписывал это отклонение влиянию некоторых сил, которые якобы действуют со стороны края экрана на световые корпускулы. Мне кажется, что это явление заслуживает, очевидно, более общего объяснения. Так как, по-видимому, между движением тел и распространением волн существует глубокая связь и так как лучи фазовых волн могут теперь рассматриваться как траектории (возможные траектории) квантов энергии, мы склонны отказаться от принципа инерции и утверждаем: «Движущееся тело всегда должно следовать за лучом своей фазовой волны». При распространении волны форма поверхностей равной фазы будет непрерывно изменяться и тело всегда будет двигаться, согласно нашему утверждению, по общему перпендикуляру двух бесконечно близких поверхностей.

Когда принцип Ферма становится более непригоден для подсчета траекторий лучей, то непригоден также более для подсчета траектории тела и принцип наименьшего действия; я считаю, что подобные представления могут рассматриваться как некоторый вид синтеза оптики и механики.

Мы должны еще уточнить некоторые пункты. Луч, который приобретает согласно нашим идеям важное физическое значение, может быть определен так, как указано выше, по *непрерывно* распространяющемуся малому участку фазовой волны; но он не может быть определен в каждой точке посредством задания взятой по всем волнам геометрической суммы векторов, называемой в электромагнитной теории *вектором Пойнтинга*. Обсудим нечто подобное эксперименту Винера. Мы посылаем цуг плоских волн в нормальном направлении к полностью отражающей плоской зеркальной поверхности; образуются стоячие волны; отражающее зеркало является узловой поверхностью для электрического вектора, узловая поверхность для магнитного вектора отстоит от зеркала на расстоянии  $\lambda/4$ , плоскость, отстоящая от зеркала на  $\lambda/2$ , является вновь узловой поверхностью для электрического вектора, и так далее. На каждой узловой поверхности вектор Пойнтинга равен нулю. Можем мы утверждать, что через эти поверхности не проходит энергия? Конечно, нет; мы можем лишь сказать, что интерференционное состояние на этих поверхностях остается все время одним и тем же. В каждом случае интерференции встречается подобное же затруднение. В волновой теории распространение энергии носит до некоторой степени фиктивный характер, зато в этой теории можно без труда проводить точное вычисление интерференционных полос; мы поставимся выяснить причину этого в следующем разделе.

## VII. НОВОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЛОС ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Рассмотрим способы, которыми можно установить присутствие света в некоторой точке пространства: непосредственное восприятие рассеянного света, фотографические испытания, тепловой эффект и другие. Все эти способы в действительности могут быть, по-видимому, сведены к фотоэлектрическому эффекту и к рассеянию света. В самом деле, при встрече с материальным атомом световой квант обладает определенной, зависящей от внешних факторов вероятностью поглощения или рассеяния. Если, далее, теории удастся определить эти вероятности, пренебрегая действительными перемещениями энергии, то можно будет правильно определить в каждой точке средние значения сил взаимодействия между излучением и материей. Следуя электромагнитной теории (в согласии с этой точкой зрения находится также принцип соответствия Бора), я склонен предположить, что для материального атома вероятность поглощения или рассеяния светового кванта определяется геометрической суммой каких-либо из векторов, определяющих сталкивающиеся с этим атомом фазовые волны. Последнее предположение в действительности полностью аналогично гипотезе, принимаемой в электромагнитной теории, где интенсивность наблюдаемого света связывается с величиной равнодействующей электрического вектора. Так, в эксперименте Винера фотографическое действие происходит лишь на узловых плоскостях электрического вектора; согласно электромагнитной теории, магнитная энергия света не является наблюдаемой.

Рассмотрим теперь интерференционный эксперимент Юнга. Несколько атомов света проходят через отверстия и дифрагируют вдоль луча соседних частей своих фазовых волн. В пространстве за перегородкой способность этих атомов к фотоэлектрическому действию будет изменяться от точки к точке в зависимости от состояния интерференции двух фазовых волн, прошедших через два отверстия. Мы увидим, таким образом, полосы интерференции, каким бы ни было малым число дифрагирующих квантов и какой бы незначительной ни была интенсивность падающего света. Световые кванты пересекают все темные и светлые полосы; непрерывно изменяется лишь их способность к взаимодействию с материей. Такое истолкование, которое, по-видимому, устраняет возражения и против предположения о световых квантах, и против предположения о распространении энергии через темные интерференционные полосы, может быть обобщено на все интерференционные и дифракционные явления.

## VIII. КВАНТЫ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

Для вычисления постоянной энтропии и так называемой «химической постоянной» Планк и Нернст были вынуждены ввести квантовые положения в теорию газов. Как было разъяснено ранее, Планк принял за элемент фазового объема величину  $(1/h^3) dx dy dz dp dq dr$  или  $(4\pi/h^3) m_0^{3/2} \sqrt{2w} \times dw dx dy dz$ .

Мы попытаемся теперь оправдать это предположение.

Каждый атом,двигающийся со скоростью  $\beta c$ , можно считать связанным с волновой группой, фазовая скорость которой равна  $V = c/\beta$ , частота равна  $(1/h) m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$  и групповая скорость равна  $U = \beta c$ . Состояние газа может быть устойчивым лишь тогда, если соответствующие атомам волны образуют систему стоячих волн. Используя известный метод, предложенный Джинсом, мы получаем, что отнесенное к единице объема

число волн, частота которых изменяется в интервале  $\nu, \nu + d\nu$  \*), равно

$$n_\nu d\nu = \frac{4\pi}{UV^2} \nu^2 d\nu = \frac{4\pi}{c^3} \beta \nu^2 d\nu.$$

Если  $w$  — кинетическая энергия атома и  $\nu$  — соответствующая ему частота, то имеет место равенство

$$h\nu = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = w + m_0 c^2 = m_0 c^2 (1 + \alpha),$$

где  $\alpha = w/m_0 c^2$ .

Теперь легко получить, что величина  $n_\nu d\nu$  определяется соотношением

$$n_\nu d\nu = \frac{4\pi}{h^3} m_0^3 c (1 + \alpha) \sqrt{\alpha(2 + \alpha)} dw.$$

Каждая фазовая волна может нести с собой один, два или более атомов, так что согласно каноническому закону число атомов с энергией  $h\nu$  будет пропорционально величине

$$\frac{4\pi}{h^3} m_0^3 c (1 + \alpha) \sqrt{\alpha(2 + \alpha)} dw dx dy dz \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nh\nu/kT}.$$

Рассмотрим сначала материальный газ, атомы которого обладают относительно большой массой и относительно малыми скоростями. Мы в этом случае можем пренебречь всеми членами разложения по  $\alpha$ , кроме первого, и можем, таким образом, положить, что  $1 + \alpha = 1$ . Число атомов с кинетической энергией  $w$  будет с точностью до постоянного множителя равняться

$$\frac{4\pi}{h^3} m_0^{3/2} \sqrt{2w} dw dx dy dz e^{-w/kT}.$$

Этот результат оправдывает метод Планка и приводит к обычной форме закона Максвелла.

В случае газа световых квантов величина  $\alpha$  всегда велика, и мы должны брать все члены ряда. Вводя вследствие внутренней симметрии светового кванта множитель 2, находим, что плотность лучистой энергии пропорциональна

$$\frac{8\pi}{h^3 c^3} w^3 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nh\nu/kT} dw = \frac{8\pi^3}{ch} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu.$$

Изложенный в «Journal de Physique» (ноябрь 1922 г.) метод показывает, что коэффициент пропорциональности равен в данном случае единице, так что мы получили истинный закон излучения.

## IX. ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ

В случае принятия сформулированных в этой статье концепций придется значительно видоизменить электромагнитную теорию. Так называемые электрическая и магнитная энергии окажутся некоторыми усредненными величинами, и вся истинная энергия полей будет обладать, вероятно, корпускулярной, мелкозернистой структурой. Построение нового электромагнетизма является, по-видимому, очень трудной задачей, но у нас уже есть одно руководящее положение: согласно принципу соответствия

\*) L. Brillouin, Théorie des quanta Paris, A. Blanchard, 1922, p. 38.



и вышеизложенному, характеристический вектор старой электромагнитной теории должен определять вероятность взаимодействия между материей и разделенной на мелкие порции энергией.

Новый электромагнетизм даст решение многих проблем. Законы распространения волн в теории Максвелла будут, вероятно, справедливы и для не несущих энергию световых фазовых волн, а рассеяние лучистой энергии будет объясняться как результат изгибания лучей (т. е. траекторий световых квантов). По-видимому, имеется большая аналогия между рассеянием излучения и рассеянием частиц; уменьшение скорости частиц при проходе через перегородку можно, таким образом, сравнивать с уменьшением частоты рентгеновских лучей при рассеянии, которое недавно было вычислено и экспериментально исследовано А. Комптоном.

Объяснение оптической дисперсии окажется более затруднительным. Классические теории (включая электронную теорию) описывают лишь усредненный результат этого явления, которое вызвано сложными элементарными взаимодействиями между излучением и атомами; мы будем здесь, несомненно, вынуждены тщательно отличать истинное движение энергии от распространения суммарного интерференционного состояния. Вид резонанса, проявляющийся в изменении показателя преломления, более не представляется несовместимым с прерывностью света.

Остаются открытыми и многие другие вопросы. Каков механизм брэгговской абсорбции? Что происходит, когда атом переходит из одного стабильного состояния в другое, и как атом испускает одиночный квант? Как можно ввести прерывную структуру энергии в нашу концепцию упругих волн и в теорию удельных теплоемкостей Дебая?

Наконец, мы должны отметить, что квантовые соотношения остаются пока некоторыми постулатами, определяющими постоянную  $h$ , истинное значение которой совершенно не ясно; впрочем, кажется, что вся квантовая загадка сведена теперь к этому одному-единственному пункту.

## ВЫВОДЫ

В настоящей статье принято, что свет состоит по существу из световых квантов, каждый из которых обладает одной и той же чрезвычайно малой массой. Математически показано, что преобразование Лоренца — Эйнштейна совместно с квантовыми соотношениями приводит к необходимости связать движение тела и распространение волны и что это представление дает физическую интерпретацию аналитических условий устойчивости Бора. Дифракция является, по-видимому, совместимой с обобщением ньютоновской динамики. Далее, оказывается возможным сохранить как корпускулярный, так и волновой характер света и дать с помощью гипотез, подсказываемых электромагнитной теорией и принципом соответствия, правдоподобное объяснение когерентности и интерференционных полос. Наконец, показано, почему кванты должны входить в динамическую теорию газов и почему закон Планка является предельной формой закона Максвелла для газа световых квантов.

Хотя возможно, что многие из этих предположений будут оспорены и изменены, все же сейчас не может оставаться ни малейших сомнений в реальности существования световых квантов. Кроме того, если наше мнение будет признано, то, так как оно основано на относительности времени, вся совокупность экспериментальных доказательств существования «квантов» будет подтверждать концепции Эйнштейна.

*Примечание.* После того как я написал эту статью, мне удалось получить содержащиеся в четвертом разделе результаты в несколько отличной и значительно более общей форме.

Принцип наименьшего действия для материальной точки может быть выражен в четырехмерной записи уравнением

$$\delta \int \sum_{i=1}^4 J_i dx^i = 0,$$

где величины  $J_i$  являются ковариантными компонентами четырехмерного вектора, временная компонента которого равна энергии точки, деленной на  $c$ , а пространственные компоненты равны компонентам вектора количества движения.

Аналогично, при изучении распространения волн мы должны написать

$$\delta \int \sum_{i=1}^4 O_i dx^i = 0,$$

где величины  $O_i$  являются ковариантными компонентами четырехмерного вектора, временная компонента которого равна деленной на  $c$  частоте, а пространственные компоненты направлены вдоль луча и равны  $v/V = 1/\lambda$  ( $V$  — фазовая скорость). Далее, из квантовых соотношений следует, что  $J_4 = hO_4$ . Я предлагаю вообще положить, что  $\vec{J} = h\vec{O}$ . Из этого утверждения непосредственно следует идентичность принципов Ферма и Мопертюи, причем становится возможным строгий вывод скорости фазовых волн в любом электромагнитном поле.