

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

ОПЫТ ТЕОРИИ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ.

L. De Broglie. A Tentative Theory of Light Quanta. — Phil. Mag. 47, 446, 1924.

Реферируемая работа представляет собой весьма остроумную и интересную попытку связать воедино волновую и корпускулярную теорию света, крайними представителями которых являются в настоящее время Эйнштейн — с одной стороны и Бор — с другой. Синтетическая теория, предлагаемая автором, основывается на следующих принципах.

1. Противопоставление частиц волнам неправильно; каждая частица связана с „фазовой“ или „ведущей“ волной и, наоборот, всякая электромагнитная волна — с какой-либо частицей, несущейся в направлении одного из ее „лучей“. При этом волны сами по себе никакой энергии не имеют¹⁾; действие их сводится к тому, чтобы вызывать в предварительно „возбужденных“ атомах те регрессивные переходы, связанные с уменьшением механической энергии и излучением, которые в теории Бора тракуются, как „спонтанные“, т.-е. самопроизвольные. Переходы противоположного характера („прогрессивные“), связанные с увеличением механической энергии атомов, т.-е. фотоэлектрическим эффектом, ионизацией и т. п., вызываются не волнами, но соответствующими частями, которыми могут быть как „световые кванты“, так и электроны, и притом за счет кинетической энергии этих частиц. — Таким образом, единственными посетителями энергии являются материальные снаряды — электроны и „кванты“, — тогда как связанные с ними волны играют роль спускового механизма по отношению к „заряженным“ энергией механическим системам.

2. Частота (ν) колебательного процесса, связанного с каждой материальной частицей, пропорциональна ее энергии (ϵ), или — что то же самое — ее массе (m), при чем отношение $\frac{\epsilon}{\nu}$ равно Планковской постоянной h .

Сочетая эти два принципа со специальной теорией относительности как руководящим методом, Л. де-Бройль и строит свою теорию, являющуюся покамест не столько новой теорией световых явлений, сколько новой корпускулярно-волновой динамикой материи.

В противоположность Эйнштейну, который рассматривает световые кванты как атомы энергии, не связанные с каким-либо материальным субстратом, де-Бройль трактует их как обыкновенные материальные частицы, лишённые, в противоположность электронам и протонам, электрического заряда, но обладающие паравне с ними вполне определенной „покоящейся массой“. Эта масса предполагается столь малой ($< 10^{-50}$ г), что ничтожные силы оказываются достаточными для того, чтобы сообщить ей скорость v , весьма близкую к „критической“ скорости $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек., которая

¹⁾ Энергия может быть лишь механической, зависящей от движения и взаимодействия материальных частиц. См. ниже.

рассматривается как „скорость света в пустоте“. На самом деле, следовательно, скорость „световых квантов“ — величина переменная, приближающаяся, но никогда не достигающая c .

Материальная частица (протон, электрон или „нейтрон“, т.-е. квант), обладающая покоящейся массой m_0 , связана с колебательным процессом, частота которого ν_0 определяется формулой

$$m_0 c^2 = \varepsilon_0 = h \nu_0 \quad (1)$$

и фаза которого, в зависимости от времени t_0 , может быть представлена выражением вида

$$\varphi = \sin 2\pi \nu_0 t_0.$$

Когда та же самая частица движется (по отношению к наблюдателю) со скоростью v , то, согласно теории относительности, масса и энергия ее увеличиваются в отношении $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Нетрудно убедиться, что в том же отношении увеличивается и частота соответствующего колебательного процесса. В самом деле, обозначая через x_0, t_0 пространственно-временную систему координат, связанную с рассматриваемой частицей, а через x, t — с наблюдателем. — имеем, согласно одной из формул преобразований Лоренца

$$t_0 = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Подставляя это выражение в предыдущую формулу для φ , получаем

$$\varphi = \sin 2\pi \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(t - \frac{x}{c^2/v} \right) \quad (2)$$

т.-е. уравнение колебательного процесса с частотой $\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Таким образом

равенство (1) превращается в

$$m c^2 = \varepsilon = h \nu = \frac{h \nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2a)$$

Формула (2) имеет вид уравнения волны, распространяющейся в направлении движения частицы, (т.-е. оси x) со скоростью

$$v' = \frac{c^2}{v}, \quad (2b)$$

во столько же раз превышающей c , во сколько c превосходит v . Эту волну де-Бройль и рассматривает, как „ведущую“ или „фазовую“ волну, при чем вопрос о физическом ее строении и свойствах оставляется им покамест совершенно открытым (см. ниже). Если мы представим себе группу подобных волн, соответствующих

ряду бесконечно-близких значений v , то результирующая скорость этой группы выразится, как известно, формулой

$$u = \frac{dv}{d\left(\frac{v}{v'}\right)}$$

Подставляя сюда предыдущие значения v и v' , находим

$$u = \frac{d\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}}{d\left[\frac{v}{c^2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}\right]} = v.$$

Таким образом скорость частицы равна групповой скорости множества волн с частотами $\nu = \frac{1}{h} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ и фазовыми скоростями $v' = \frac{c^2}{v}$, при слегка различных значениях v .

Корпускулярно-волновая динамика, развиваемая де-Бройль, основывается, как уже упоминалось выше, на тождественности всевозможных траекторий (орбит) рассматриваемой частицы в данном силовом поле с ортогональными траекториями (лучами) соответствующих фазовых волн. При этом, по отношению к фазовым волнам, силовое поле (т.е. пространство, в котором действуют электромагнитные силы) играет роль дисперсирующей среды обыкновенной волновой оптики. Таким образом длина волны λ в той из точек силового поля, проходя через которую соответствующая частица имеет (или имела бы) скорость v , равна

$$\lambda = \frac{v'}{\nu} = \frac{c^2}{v\nu} = \frac{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\nu_0}, \text{ т.е. } \lambda = h \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{m_0 v}. \quad (3)$$

Обозначая через ds элемент дуги луча, проходящего через две данные точки (1, 2), мы можем определить форму этого луча с помощью принципа Ферма (скорейшего прохождения)

$$\delta \int_1^2 \frac{ds}{\lambda} = 0 \quad (3a)$$

который, как нетрудно убедиться, совпадает в рассматриваемом случае с принципом Мопертюи (наименьшего действия)

$$\int_1^2 m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) dt = \delta \int \frac{m_0 v^2}{v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} dt = \delta \int \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ds = 0,$$

определяющим траекторию соответствующей материальной частицы.

Представим себе электрон, вращающийся по окружности радиуса r вокруг положительного ядра. Согласно теории Бора, устойчивые орбиты этого рода определяются условием: $mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}$, где n — целое число, т.е. согласно (3)

$$2\pi r \cdot \frac{m_0 v}{h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2\pi r}{\lambda} = n.$$

Таким образом, с точки зрения теории де-Бройля, смысл этого условия сводится к тому, чтобы „фазовая волна“ сопровождающая электрон, „была настроена в резонанс с одним из обертонов длины орбиты“ ($2\pi r$), т.-е., другими словами, чтобы последняя содержала целое число волн. Этот результат легко обобщается на случай замкнутых орбит произвольного типа. А именно, условие „резонанса“, т.-е. устойчивости движения, выражается при этом, согласно де-Бройлю, равенством

$$\int \frac{ds}{\lambda} = n \quad (n - \text{целое число}), \quad (3b)$$

где интеграл берется по замкнутой кривой. Подставляя сюда значение λ из (3), получаем

$$\int \frac{m_0 v^2}{h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} dt = \int \frac{m_0}{h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dt = \frac{1}{h} \int (m v_x dx + m v_y dy + m v_z dz) = n$$

что совпадает с Боровским условием устойчивости в общей форме, данной ему Эйнштейном⁴⁾. Таким образом это условие впервые приобретает определенный физический смысл. Последний станет нам более ясным, если мы примем во внимание, что при наличии условия (3b), фазовая волна, нагоняющая электрон, фактически сливается с той, которая в этот самый момент „впервые“ исходит из него.

Не останавливаясь на подробном изложении оптической стороны теории де-Бройль, которая им лишь намечается, мы ограничимся несколькими общими замечаниями.

Прежде всего, соединение световых квантов с фазовыми волнами даст возможность объяснить явления интерференции, остававшиеся в концепции Эйнштейна совершенно непонятными. Сущность объяснения, предлагаемого де-Бройлем, сводится к следующему. Когда фазовая волна проходит через возбужденный атом, последний имеет некоторую вероятность, пропорциональную интенсивности волны, испустить „атом света“ соответствующей частоты. разумеется не иначе, как вместе с сферической фазовой волной, которая в свою очередь может вызвать излучение в соседних атомах. С другой стороны, способность нескольких световых квантов вызывать фотоэлектрический эффект, или вообще прогрессивные переходы, также обуславливается результирующей интенсивностью в соответствующих точках, связанных с этими квантами фазовых волн. Что касается этой интенсивности, то она должна находиться в определенном соответствии с той величиной, которая в теории Максвелла рассматривается, как энергия электромагнитного поля.

Подобной энергии на самом деле не существует. Мы должны вернуться (как это уже отчасти и делает теория Бора) к прежней механической концепции энергии, как суммы кинетической и потенциальной энергии, т.-е. двух, частей зависящих от движения и взаимодействия рассматриваемых материальных частиц. Таковыми до сих пор считались лишь протоны (ядра) и электроны. Де-Бройль присоединяет к ним „световые кванты“, кинетическая энергия которых должна заменить туманную „лучистую энергию“, еще продолжающую фигурировать в теории Бора; радиационное поле превращается в лишенное энергии поле фазовых волн, определяющих вероятность тех или иных (регрессивных или прогрессивных) материальных процессов. — Заметим, что аналогичная интерпретация электромагнитного поля была недавно предложена самим Боро (Phil. Mag., May 1924), который, однако, не вводит понятия о световых квантах, как материальных частицах, связанных с волнами, и

⁴⁾ $m v_x$, $m v_y$, $m v_z$ суть „моменты“ электрона, соответствующие координатам x , y , z .

потому совершенно отказывается от принципа сохранения энергии. В теории де-Бройля этот принцип остается в силе. Однако, природа световых квантов, законы их взаимодействия друг с другом, а также с протонами и электронами, наконец—механизм их испускания и поглощения, остаются совершенно невыясненными ¹⁾. Несмотря, на всю свою незаконченность и неопределенность — которая со временем может быть устранена, — теория эта представляется нам весьма удачной попыткой связать воедино две стороны световых явлений — интерференционную и фотоэлектрическую — и вместе с тем органически, а не формально, как в теории Бора, слить оптику с динамикой в одно неразрывное целое.

Я. Френкель.