МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОВЫХ АТОМОВ (КВАНТОВ).

Я. И. Френкель, Ленинград.

§ 1. Масса и вес световых атомов.

В 1905 г., после почти полуторавекового забвения, ньютоновская гипотеза „истечения света“ вновь появилась на физической арене. Весьма замечательно, что продолжателем Ньютона и здесь, так же как и в механике (включая сюда и теорию тяготения), явился Эйнштейн. Правда, новая корпускулярная теория света возрождала ньютоновскую теорию в несколько преображенном виде. А именно, в то время как в теории Ньютона световые атомы трактовались, как частицы некоторой материи и соответственно этому обладали основным принципом материальности — неразрушимостью, в теории Эйнштейна они получили новый совершенно своеобразный смысл — атомов, или „квантов“ энергии. Световые кванты Эйнштейна, в противоположность материальным частицам, могут создаваться и исчезать — за счет механической энергии испускающих их атомов или, так сказать, „в пользу“ механической энергии атомов, их поглащающих. При этом энергия светового кванта (ε) представляет собой меру той величины (ν), которая на языке волновой теории называется частотой света, т.-е. числом колебаний в секунду. Соотношение между этими двумя величинами выражается известной формулой

$$\varepsilon = h\nu, \tag{1}$$

где h — постоянная Планка.

Теория Ньютона занималась главным образом вопросом о распространении света и, в частности, отражением и преломлением световых лучей на границе двух средин, которые при этом трактовались, как сплошные, лишенные внутреннего строения тела. Эта макроскопическая точка зрения уступила место в теории Эйнштейна микроскопической; в связи с этим, а также в связи с нематериальностью световых атомов, новая оптика занялась, главным образом, вопросом об испускании (создании) и поглощении (уничтожении) этих атомов. Что же касается вопроса об их распространении, то он был разрешен весьма просто: при отсутствии сил тяготения световые кванты движутся прямолинейно и равномерно с предельной скоростью

$$c = 3 \cdot 10^{10} \ см/сек.$$

(само собой разумеется, что при этом речь идет о движении в пустоте, от одного атома — испускающего, к другому — поглощающему). В поле тяготения движение светового кванта совпадает с движением материальной частицы, имеющей ту же самую предельную скорость. — Последний принцип вытекает из того факта, что движение какой-либо частицы в поле тяжести не зависит от массы этой частицы. Поэтому представляется вполне естественным допущение, что законы, установленные для движения материальных частиц в поле тяжести, остаются в силе и по отношению к частицам нематериальным, поскольку последние обладают массой. Согласно же общему принципу, установленному Эйнштейном на основании теории относительности, масса и энергия — понятия эквивалентные, так что световой квант, обладающий энергией ε, обладает вместе с тем массой

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2}, \tag{2}$$

В Эйнштейновской теории световые атомы, как и у Ньютона, столь же весомы, как и атомы материальные. Эта весомость света проявляется наиболее непосредственным и наглядным образом в отклонении, которое испытывают лучи, испускаемые звездами, при прохождении около солнечного диска.

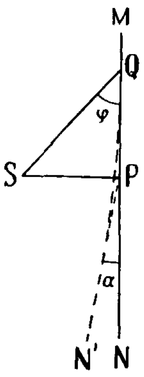

Рис. 1.

Не останавливаясь на строгом выводе этого отклонения, основанном на Эйнштейновской механике и теории тяготения, мы приведем расчет, основанный на теории самого Ньютона.

Представим себе, что при отсутствии сил тяготения световой квант двигался бы равномерно по прямой MN со скоростью c. Под влиянием поля тяготения, исходящего из центра S (солнце), путь кванта искривляется, принимая вид MN'. Вследствие чрезвычайной малости этого отклонения (угол α), можно при вычислении его оперировать с силой, действующей на квант при невозмущенном движении вдоль прямой MN. В точке Q на единицу массы действует сила $\frac{k}{r^2}$, где k — постоянная, а $r = SQ$; поперечная составляющая этой силы (перпендикулярная к MN) равна $\frac{k}{r^2}\sin\varphi$ ($\varphi = \sphericalangle SQN$). Обозначая соответствующую (поперечную) составляющую скорости кванта через v, имеем равенство:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k}{r^2}\sin\varphi.$$

Если $r_0 = SP$ есть ближайшее расстояние световой частицы от притягивающего центра, а $-x = QP$ расстояние ее от точки P, то из треугольника SQP получаем:

$$r = \frac{r_0}{\sin\varphi}, \qquad -x = r_0 \cot\varphi$$

и далее

$$dx = c\,dt = \frac{r_0}{\sin^2\varphi}\,d\varphi.$$

Предыдущее уравнение превращается, следовательно, в

$$\frac{c\sin^2\varphi}{r_0}\cdot\frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{r_0^2}\sin^3\varphi$$

т.-е. в

$$\frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{cr_0}\sin\varphi.$$

Полная величина поперечной скорости, приобретаемой световой частицей на всем ее пути MN' (или MN), получается интегрированием правой части этого уравнения от $\varphi = 0$ до $\varphi = \pi$. Таким образом, окончательно получаем $v = \frac{2k}{cr_0}$, и для углового отклонения

$$a = \frac{v}{c} = \frac{2k}{c^2 r_0}.$$

На самом деле, отклонение световых лучей оказывается как в теории, так и на опыте — вдвое бо́льшим. Предыдущая формула дает для него во всяком случае правильный порядок величины и надлежащую зависимость от расстояния r_0.

§ 2. Энергия и количество движения световых квантов и волн.

В механике Ньютона масса считалась основным признаком материи, неизменным свойством всякой материальной частицы. Результатом этого представления явилось весьма распространенное — даже поныне — отожествление понятий „материи“ и массы. В механике Эйнштейна эти понятия так сказать оторвались друг от друга, при чем понятие массы оказалось непосредственно связанным не с понятием материи, но с понятием энергии, согласно формуле (2). В случае элементарных частиц материи — электронов — роль массы, как основного „инвариантного“ признака материи, перешла к электрическому заряду. Впрочем, на ряду с последним стала так называемая покоющаяся масса m_0, т.-е. масса частицы в состоянии покоя. Масса частицы, движущейся со скоростью v ($< c$), выражается через эту „покоющуюся“ массу формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{3}$$

Соответственно этому для энергии $\varepsilon = mc^2$ получается выражение, которое при малости v в сравнении с c принимает вид

$$c^2 m = c^2 m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2,$$

где $\frac{1}{2} m_0 v^2$ представляет собой обычную кинетическую энергию частицы (в механике Ньютона), а $c^2 m_0$ ее „внутреннюю энергию“, происхождение и сущность которой остаются покамест гадательными.

Необходимо отметить, что масса, определяемая формулой (3), трактуется в теории относительности не как отношение между силой (F) и ускорением $\left(\frac{\overrightarrow{dv}}{dt}\right)$, но как коэффициент при скорости в выражении количества движения частицы

$$\vec{g} = m\vec{v}; \tag{3a}$$

так что уравнение движения имеет вид $d(\overrightarrow{mv}) = \vec{F}$, а не $m\frac{\overrightarrow{dv}}{dt} = \vec{F}$, как в механике Ньютона. Правда, второй закон Ньютона в „Началах“ текстуально выражен именно в первой форме, но фактически эта значительно более широкая формулировка им никогда не применялась.

Если в формуле (3) положить $v = c$ и $m_0 = 0$, то она превращается в неопределенность вида $m = \frac{0}{0}$. Это обстоятельство показывает, что с точки зрения теории относительности вполне мыслимо существование частиц, движущихся со скоростью света и имеющих тем не менее конечную массу и, следовательно, конечную энергию ε. Подобными частицами и являются световые кванты. В отличие от обыкновенных материальных частиц они не обладают покоющейся массой (а также лишены заряда). Они существуют постольку, поскольку движутся со скоростью c. Остановка означает для них исчезновение. Не обладая неразрушимостью, характеризующей частицы материи, они должны трактоваться поэтому как частицы нематериальные — как атомы энергии.

Применяя это представление к световым квантам, мы должны, очевидно, наделить их, на ряду с энергией (1) и массой (2), еще количеством движения

$$\vec{g} = \overrightarrow{mc} = \frac{\vec{\varepsilon}}{c} = \frac{\vec{h}}{\lambda}, \tag{4}$$

где $\lambda = \frac{c}{\nu}$ — величина, которая на языке волновой оптики означает длину волны[1]).

Соотношение (4) находится в полном соответствии не только с механикой Эйнштейна, но и с электродинамикой, точнее, с электромагнитной теорией света. В классической электродинамике энергия трактуется как некоторая непрерывная субстанция, разлитая в пространстве, с объемной плотностью $\eta = \frac{1}{8\pi}(E^2 + H^2)$, где E — электрическое, а H — магнитное напряжение. Этому представлению об энергии соответствует представление о количестве движения, объемная плотность которого определяется векторным произведением E и H по формуле $\vec{g} = \frac{1}{4\pi c}\vec{E}\times\vec{H}$. При этом оказывается необходимым дополнить понятие об энергии понятием о потоке энергии, определяемым вектором Пойнтинга $\vec{S} = \frac{c}{4\pi}\vec{E}\times\vec{H}$. Сравнение последнего с вектором $\vec{g}$ приводит к соотношению $\vec{g} = \frac{\vec{S}}{c^2}$, которое в известном смысле соответствует соотношению (2) между энергией и массой. Это соответствие становится полным в том случае, если поток энергии может быть представлен в виде $\vec{S} = \eta\vec{c}$, где $\vec{c}$ — вектор, численно равный скорости света. В таком случае, для плотности электромагнитного количества движения получается формула $\vec{g} = \frac{\eta}{c^2}\vec{c}$, из которой явствует, что величину $\mu = \frac{\eta}{c^2}$ следует трактовать как обыкновенную

[1]) Стрелки над буквами обозначают соответствующие векторные величины.

плотность, т.-е. плотность **массы**. — На самом деле соотношение

$$\vec{S} = \eta \vec{c}$$

в точности выполняется лишь для **плоских** электромагнитных волн (или, приблизительно, на больших расстояниях от источников поля). А именно, в этом случае, как известно, векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ численно равны и перпендикулярны как друг к другу, так и к направлению распространения волн. Характеризуя это направление (соответствующее векторному произведению $\vec{E} \times \vec{H}$) единичным вектором $\vec{n}$, мы имеем:

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} \vec{E} \times \vec{H} = \frac{c}{4\pi} E^2 \vec{n} = \frac{c}{8\pi} (E^2 + H^2) \vec{n} = \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \vec{c},$$

где $\vec{c} = c\vec{n}$, т.-е.

$$\vec{S} = \eta \vec{c}$$

Таким образом, поскольку дело касается распространения света (в пустоте), различие между электромагнитной (волновой) теорией и квантовой теорией **Эйнштейна** сводится к тому, что в первой световая энергия представляется распределенной в пространстве непрерывно, а во второй — сконцентрированной практически в отдельных точках (или весьма малых элементах объема).

Это различие имеет двоякое значение. Во-первых, оно означает, что атомы могут терять энергию (при излучении света) или приобретать ее (при поглощении) лишь определенными конечными порциями, а не непрерывно, как это предполагала классическая теория. Во-вторых, из него следует, что при излучении света, так же как и при его поглощении, мы имеем дело с **направленным актом** (Эйнштейновское „Nadelstrahlung“). Применяя к этому акту закон сохранения количества движения, мы приходим к выводу, что при испускании света частоты ν в виде кванта с энергией $h\nu$ и количеством движения $\frac{h\nu}{c}$ атом должен испытывать толчок в обратную сторону, получая при этом количество движения — $\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c}$ („световая отдача“). Наоборот, при поглощении указанного кванта, количество движения последнего, наравне с его энергией, сообщается соответствующему атому.

Эти представления необходимо дополнить еще следующим, основанным на аналогии между квантовой и волновой теориями. Согласно последней поглощение света происходит следующим образом. Электрическая сила падающих волн вызывает в атомах колебательное движение электронов. Это колебательное движение вызывает в свою очередь вторичные электромагнитные волны. Если энергия атома возрастает, т.-е. амплитуда вынужденных электронных колебаний увеличивается, то вторичные электрические силы оказываются противоположными первичным и ослабляют их. При этом атом испытывает положительное световое давление, направленное в сторону распространения волн. Если, наоборот, энергия атома убывает, т.-е. амплитуда электронных колебаний уменьшается, то вторичные электрические силы совпадают по направлению с первичными и их увеличивают: при этом атом испытывает отрицательное световое давление, противоположное направлению распространения волн. Это соотношение непосредственно вытекает из формулы $\vec{g} = \frac{\vec{S}}{c^2}$, связывающей поток энергии с плотностью электромагнитного количества движения. Оно было удержано Эйнштейном и в его квантовой теории света. А именно, на ряду с обыкновенным поглощением кванта, он ввел в рассмотрение так называемое отрицательное поглощение или вынужденное испускание, при котором квант света не поглощается атомом, но выходит из него вкупе с другим квантом той же величины и направления, испущенным самим атомом. При этом последний, так же как и при обыкновенном „спонтанном“ излучении, испытывает толчок в сторону, обратную испусканию кванта, получая количество движения $-\frac{h\nu}{c}$.

§ 3. Некоторые применения квантовой теории света.

Нетрудно показать, что эти представления в связи с соотношением (1) приведут к тем же формулам для эффекта Допплера, как и волновая теория света.

Представим себе атом с массой M, движущейся по отношению к рассматриваемой координатной системе со скоростью $\vec{v}$ (последнюю мы будем предполагать малой в сравнении со скоростью света). Предположим, что атом обладает некоторой внутренней энергией Σ_0, которую он, оставаясь в покое, должен был бы излучить в виде кванта с частотой $\nu_0 = \frac{\varepsilon_0}{h}$. На ряду с этой внутренней энергией он обладает кинетической энергией $\frac{1}{2} M v^2$. Испускание света связано не только с потерей внутренней энергии, но также с изменением кинетической. Таким образом частота испускаемого кванта ν должна, вообще говоря, отличаться от величины ν_0. Обозначая скорость атома после испускания через v', имеем на основании закона сохранения энергии

$$\frac{1}{2} M v^2 + \varepsilon_0 = \frac{1}{2} M v'^2 + h\nu.$$

С другой стороны, из закона сохранения количества движения вытекает равенство:

$$\overrightarrow{Mv}=\overrightarrow{Mv'}+\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c}.$$

Комбинируя его с предыдущим и замечая, что

$$v^2-v'^2=\left(\vec{v}+\vec{v}'\right)\left(\vec{v}-\vec{v}'\right),$$

получаем:

$$\frac{1}{2}\left(\vec{v}+\vec{v}'\right)\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c}=h\nu-h\nu_0$$

или, так как

$$\frac{1}{2}\left(\vec{v}+\vec{v}'\right)=\vec{v}-\frac{1}{2}\left(\vec{v}-\vec{v}'\right)=\vec{v}-\frac{1}{2M}\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c},$$

$$\frac{v\cdot\overrightarrow{h\nu}}{c}-\frac{1}{2M}\left(\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c}\right)^2=h\nu-h\nu_0$$

Обозначая угол между направлением начальной скорости и направлением выброшенного кванта через θ, получаем окончательно для определения зависимости ν от θ следующее уравнение:

$$\nu_0=\nu\left(1-\frac{v}{c}\cos\varphi+\frac{h\nu}{2Mc^2}\right), \tag{5}$$

которое в первом приближении (если пренебречь весьма малым при обычных условиях членом $\frac{h\nu}{Mc^2}$) превращается в известное уравнение Допплера для частоты света, испускаемого движущимся источником. — Совершенно аналогичным образом можно вычислить эффект Допплера для частоты света, поглощаемого движущимся атомом. Для этого нужно лишь в предыдущем расчете рассматривать ν, как частоту падающего света, $\vec{v}'$ как начальную, $\vec{v}$ как конечную скорость, и, наконец, угол φ между v и $\frac{h\nu}{c}$ заменить углом φ' между $\vec{v}$ и $\frac{\overrightarrow{h\nu}}{c}$. Полагая во этом случае

$$\frac{1}{2}\left(\vec{v}+\vec{v}'\right)=\vec{v}'+\frac{1}{2}\left(\vec{v}-\vec{v}'\right)=v'+\frac{1}{2M}\frac{h\nu}{c},$$

получаем

$$\vec{v}'\cdot\frac{\overrightarrow{h\nu'}}{c}+\frac{1}{2M}\left(\frac{h\nu}{c}\right)^2=h\nu-h\nu_0,$$

т.-е. вместо (5)

$$\nu_0 = \nu\left(1 - \frac{v'}{c}\cos\varphi' - \frac{h\nu}{2Mc^2}\right) \quad (5a).$$

Поглощение света может быть связано с расщеплением атома на две самостоятельно движущиеся части: положительный ион и отрицательный электрон (фотоэлектрический эффект). Считая атом неподвижным, т.-е. пренебрегая явлением Допплера, мы получаем в этом случае известное уравнение Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + \varepsilon,$$

где m — масса, v — скорость фотоэлектрона, а ε — работа, необходимая для его вырывания из атома. При этом v предполагается малым в сравнении с c, точное выражение для кинетической энергии имеет вид:

$$c^2(m - m_0) = c^2 m_0\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right).$$

В случае действия света на свободный электрон, т.-е. систему, внутренняя энергия которой (m_0c^2) остается неизменной, полное исчезновение кванта, т.-е. превращение его энергии и количества движения нацело в энергию и количество движения электрона, оказывается невозможным. Так, например, если считать электрон до столкновения с квантом неподвижным, то после столкновения он должен был бы получить кинетическую энергию $c^2(m - m_0) = h\nu$ и количество движения $mv = \frac{h\nu}{c}$. Отсюда вытекало бы соотношение

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

то-есть

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

Это уравнение имеет два решения $v = c$ и $v = 0$, оба они очевидно лишены физического смысла.

В рассматриваемом случае, как показали Комптон и Дебай, происходит рассеяние света; отдав часть своей энергии и своего количества движения электрону, квант как бы отскакивает от него, имея при этом несколько меньшую частоту (ν') и новое направление движения. Это, связанное с рассеянием света свободными электронами уменьшение частоты колебаний и составляет сущность эффекта Комптона. Заметим, что подобное понижение частоты происходит лишь в том случае, если электрон находится первоначально в покое; в общем случае оно осложняется явлением Допплера и может даже при известных условиях замениться увеличением частоты рассеянного кванта.

Обозначим скорость электрона до „столкновения" с квантом через $v_1 = c\beta_1$, а после столкновения через $v_2 = c\beta_2$; частоты падающего рассеянного кванта обозначим через ν_1 и ν_2.

Предположим далее, что первоначальное направление кванта совпадает с осью X, косинусы углов, образуемых рассеянным квантом с прямоугольными осями X, Y, Z, обозначим через p, q, r, а соответствующие косинусы для векторов $\vec{v'_1}$ и $\vec{v_2}$ через a_1, b_1, c_1 и a_2, b_2, c_2.

В таком случае закон сохранения энергии выразится уравнением

$$h\nu_1 + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta_1^2}} = h\nu_2 + \frac{m_0 c'^2}{\sqrt{1-\beta_2^2}},$$

а закон сохранения количества движения уравнениями

$$\frac{h\nu_1}{c} + \frac{m_0\beta_1 c}{\sqrt{1-\beta_1^2}} a_1 = \frac{h\nu_2}{c} p + \frac{m_0\beta_2 c}{\sqrt{1-\beta_2^2}} a_2$$

$$\frac{m_0\beta_1 c}{\sqrt{1-\beta_1^2}} b_1 = \frac{h\nu_2}{c} q + \frac{m_0\beta_2 c}{\sqrt{1-\beta_2^2}} b_2$$

$$\frac{m_0\beta_1 c}{\sqrt{1-\beta_1^2}} c_1 = \frac{h\nu_2}{c} r + \frac{m_0\beta_2 c}{\sqrt{1-\beta_2^2}} c_2$$

Если из этих уравнений исключить косинусы a_2, b_2, c_2 (пользуясь соотношением $a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 = 1$), а также величину β_2, и ввести обозначения $a_1 = \cos\theta_1$, $p = \cos\theta$ и $a_1 p + b_1 q + c_1 r = \cos\varphi$ ($\varphi = \sphericalangle$ между $\frac{h\nu_2}{c}$ и $\vec{v'}$), то получается следующая формула[1]):

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1-\beta_1\cos\theta_1}{1-\beta_1\cos\varphi + 2a\sqrt{1-\beta_1^2}\sin^2\frac{\theta}{2}}, \qquad (6)$$

где для краткости положено

$$a = \frac{h\nu_1}{m_0 c^2}.$$

---

[1]) См. L. De Broglie — Thèse; Annales de Physique, p. 101, 1925.

В случае покоющегося электрона ($\beta_1 = 0$) предыдущая формула превращается в известную формулу Дебая — Комптона:

$$\nu_2 = \frac{\nu_1}{1 + 2a \sin^2 \frac{\theta}{2}}. \tag{6a}$$

Пренебрегая величиной a, которая характеризует эффект Комптона, мы получаем изменение частоты, обусловленное двойным эффектом Допплера (ибо электрон как бы одновременно поглощает свет и вновь его испускает):

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 - \beta_1 \cos\theta_1}{1 - \beta_1 \cos\varphi}. \tag{6b}$$

Мы должны упомянуть еще об одном применении Эйнштейновской теории излучения, а именно о применении ее к вопросу о тепловом равновесии между материей и излучением. Взаимодействие между атомами материи и атомами света должно быть таково, чтобы первые даже при отсутствии столкновений между собой имели в среднем кинетическую энергию $\frac{3}{2}kT$, где T — абсолютная температура.

Действительно, расчет, который мы не имеем возможности воспроизвести в этой статье[2]), показывает, что толчки, испытываемые атомами при испускании или поглощении световых квантов, сообщают им кинетическую энергию вышеуказанной величины. При этом необходимо исходить из спектрального распределения световой энергии, определяемого известной формулой Планка.

§ 4. Поляризация света и электромагнитный момент световых квантов.

Мы видели выше (§ 2), что механические свойства световых квантов — энергия, масса, количество движения — присущи также и электромагнитным волнам, которые они в известном смысле заменяют. Однако эти механические величины являются, так сказать, лишь вторичными, „производными" свойствами электромагнитных волн; основными величинами, которыми эти волны характеризуются, являются электрическое и магнитное напряжение. Что же соответствует этим напряжениям в случае световых квантов? Нетрудно видеть, что этот вопрос может быть перефразирован следующим образом: какими свойствами необходимо наделить кванты для того, чтобы они могли выполнять функции поляризованных световых лучей?

---

[2]) См. замечательную работу Эйнштейна — Phys. ZS 1917, p. 127.

Представим себе сначала, что мы имеем дело с прямолинейно поляризованным светом. В этом случае, согласно волновой теории, электрический и магнитный вектор колеблются в двух неизменных направлениях, перпендикулярных как друг к другу, так и к самим лучам. Эти направления могут быть обнаружены экспериментально, например, по направлению, в котором выбрасываются фотоэлектроны; как известно, максимальное количество последних приходится на направление, соответствующее электрическому вектору. Если мы хотим трактовать фотоэлектрический эффект как результат поглощения световых квантов, мы должны наделить последние некоторым векторным свойством, соответствующим электрическому напряжению. Простейшим свойством этого рода является электрический момент. Естественно поэтому предположить, что световой квант ведет себя как элементарный диполь, т.-е. совокупность двух электрических зарядов противоположного знака[1]). Электрический момент кванта, характеризующего прямолинейно поляризованный свет, мы будем трактовать как постоянный вектор, а не как колеблющуюся величину, подобно электрическому напряжению, которое, или вернее амплитуда которого, им, так сказать, „представляется". Численное значение этого вектора (p) мы оставим покамест неопределенным.

Точно также магнитное напряжение световой волны может быть „представлено" в квантовой теории света магнитным моментом кванта (μ), перпендикулярным к электрическому и численно ему равным. Оба вектора $\vec{p}$ и $\vec{\mu}$ должны быть перпендикулярны к направлению движения кванта (при чем это движение происходит в ту сторону, куда движется правый винт, вращаемый от $\vec{p}$ к $\vec{\mu}$).

Оставляя в стороне вопрос о том, каким образом наличие электрического и магнитного момета сообщает световому кванту способность к направленному (по отношению к одному из них) действию на материальные частицы, мы попытаемся вкратце осветить другой — чисто-формальный вопрос — о совместимости предыдущего представления с требованиями теории относительности.

В теории относительности электрическое и магнитное напряжение объединяются в единую четырехмерную величину с 6 различными составляющими („Sechservektor") $F_{\alpha\beta} = -F_{\beta\alpha}$ ($\alpha,\beta = 1, 2, 3, 4$) по следующей схеме:

F_{23}	F_{31}	F_{12}	F_{14}	F_{24}	F_{34}
H_1	H_2	H_3	$-iE_1$	$-iE_2$	$-iE_3$,

где значки 1, 2, 3 относятся к трем взаимно перпендикулярным пространственным осям, а 4 — к оси времени (умноженного на $C\sqrt{-1}$). При этом электрическое и магнитное напряжение не являются сами

[1]) Эта задача была формулирована проф. П. Эренфестом.

по себе инвариантными величинами; они зависят от выбора координатной системы, в которой определяются. Предположим, например, что в некоторой „покоющейся" координатной системе K^0 магнитное напряжение равно нулю, а электрическое $\vec{E}^0$. Рассматривая то же самое поле с точки зрения другой систеты K, по отношению к которой K^0 движется с постоянной скоростью $\vec{v}$, мы получаем, на ряду с некоторым электрическим полем $\vec{E}$, слегка отличным от E^0, магнитное поле, определяемое формулой

$$\vec{H} = \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{E}.$$

В первом приближении, т.-е. с точностью до величины порядка $\frac{v}{c}$, E совпадает при этом с E^0.

Если, наоборот, в системе K^0 магнитное напряжение H^0 отлично, а электрическое равно нулю, то в движущейся системе K мы получаем

$$\vec{E} = -\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H}$$

при $\vec{H}$, совпадающем в первом приближении с H^0.

Мы видим, следовательно, что электрическое и магнитное напряжение являются некоторой реальностью не сами по себе, но лишь взятые вместе: одно из них не может существовать без другого.

То же самое относится к тем величинам — электрическому и магнитному моменту, — которые в случае атомной теории света „представляют" собой электрическое и магнитное напряжение. Электрический и магнитный момент не образуют самостоятельных реальностей, но имеют определенный инвариантный смысл лишь вместе взятые. Если в покоющейся системе K^0 рассматриваемая частица представляет собой электрический диполь с моментом $\vec{p}^0$, то с точки зрения движущейся системы она ведет себя, как комбинация электрического диполя с (приблизительно) тем же моментом $\vec{p}$ и магнитного диполя с моментом

$$\vec{\mu} = -\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{p}. \tag{7}$$

Наоборот, в случае если в системе K^0 частица ведет себя, как магнитный диполь с моментом $\vec{\mu}^0$, то в системе K она приобретает, кроме того, свойства электрического диполя с моментом

$$\vec{p} = +\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{\mu}, \tag{7a}$$

где $\vec{\mu} \cong \vec{\mu}^0$.

Представим себе теперь, что рассматриваемая частица движется со скоростью c. В этом случае соотношения (7) и (7 а), — вообще говоря, т.-е. при $v < c$, не совместимые друг с другом, — могут быть выполнены одновременно. Для этого, как нетрудно убедиться, необходимо и достаточно, чтобы векторы $\vec{p}$ и $\vec{\mu}$ были численно равны друг другу, взаимно перпендикулярны и перпендикулярны к направлению движения. Мы получаем, таким образом, основываясь на теории относительности, то самое соотношение между электрическим и магнитным моментом световых квантов, которое необходимо для того, чтобы обеспечить соответствие между ними и волнами электромагнитной теории света.

Мы не будем углубляться здесь в исследование этого вопроса. Заметим лишь, что электрически поляризованный свет может быть представлен квантами с комплексными значениями векторов $\vec{p}$ и $\vec{\mu}$. Во всяком случае, можно думать, что все свойства света, не связанные с его колебательным характером, могут быть интерпретированы в терминах теории световых квантов. Что же касается колебательных свойств, т.-е. характеризующей свет периодичности во времени и пространстве, то здесь квантовая теория является, повидимому, бессильной и должна быть дополнена волновыми представлениями, как это делается в теории Л. де Бройля, или даже, быть может, совершенно заменена ими, в соответствии с волновой механикой Шредингера.