

Современный этап развития теории света состоит в создании картины, отражающей диалектическое единство противоречивых корпускулярно-волновых свойств света. Эта картина не может считаться законченной.

Очень важным явилось открытие, сделанное де Бройлем в 1925 г., волновых свойств у частиц вещества (электронов и атомов). Тем самым было доказано, что обе известные нам формы существования материи — свет и вещество — обладают противоречивыми корпускулярно-волновыми свойствами. Наконец, были открыты процессы превращения частиц вещества в фотоны и фотонов в частицы вещества (§ 91).

Любопытно, что еще Ньютон допускал возможность таких процессов. В тридцатом вопросе «Оптики» Ньютон спрашивает: «И среди столь разнообразных и странных превращений почему же природа не может изменять тела в свет и свет в тела?». Физики-идеалисты пытаются истолковать эти процессы как превращение материи в энергию и энергии в материю. Такая трактовка абсолютно неправильна.

Было бы неправильно считать свет одной из форм энергии. *Свет есть одна из форм материи*, но свет, как и всякая форма материи, обладает, конечно, определенной энергией. Свет и вещество — только две качественно различные формы движущейся единой материи. С. И. Вавилов, развивая материалистическое понимание результатов современной физики, писал: «Существующий материальный мир — движущаяся материя — представляется нам в двух основных формах — как *вещество* и *свет*».

Энергия света имеет особую ценность, так как, с одной стороны, она сконцентрирована в сгустки — кванты — и, с другой стороны, легко может быть полностью использована. В частицах вещества сосредоточена огромная энергия (§ 73), но ее полное использование весьма затруднительно. Даже при ядерных реакциях (§ 113) освобождается примерно тысячная доля полной энергии вещества. Наоборот, при различных действиях света используется вся энергия света. К числу таких действий света относятся: фотохимические реакции, в частности фотосинтез органических веществ в растениях (§ 77), фотоэлектрический эффект (§ 51), лучистый нагрев и т. д.

§ 2. Электромагнитная теория света

Как было указано выше, Максвелл является создателем электромагнитной теории света. Правда, сам Максвелл уступал приоритет этого важнейшего открытия Фарадею. Он писал в «Динамической теории электромагнитного поля»: «Концепция распространения поперечных магнитных возмущений с исключением возможности продольных возмущений была отчетливо высказана профессором Фарадеем в его „Мыслях о лучевых колебаниях“. Электромагнитная

теория света, предложенная им, является по существу той же самой, которую я начал развивать в этой статье, за исключением того, что в 1846 г. еще не было данных для вычисления скорости распространения». Однако А. Г. Столетов, много сделавший как раз для уточнения данных, необходимо для вычисления скорости распространения, справедливо указывал: «Мы далеко ушли вперед от смутной грезы Фарадея, который спрашивал себя, не есть ли радиация быстрое дрожание силовых линий, и вслед за тем как бы пугался своих мыслей, сознавая что это лишь „тень умозрения“».

Электромагнитная теория света, в сущности, является одним из следствий знаменитых уравнений Максвелла. Воспроизведем в возможно простой форме ход рассуждений Максвелла.

Рассмотрим плоское электромагнитное поле, в котором электрическое поле E направлено параллельно оси z и зависит только от одной координаты x . Тогда из уравнений Максвелла следует (см. т. II, § 76), что магнитное поле H должно быть направлено параллельно оси y и тоже зависит только от x . Сами уравнения Максвелла в этом случае упрощаются; вместо векторных уравнений

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t},$$

$$\operatorname{rot} H = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$$

останутся только два скалярных уравнения:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (1')$$

Из уравнений (1) и (1') можно исключить либо H , либо E и получить дифференциальные уравнения для каждой из этих величин в отдельности. Например, дифференцируя уравнение (1) по x , а уравнение (1') по t и умножая его на $-\frac{\mu}{c}$, мы можем исключить H и получим:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Такое же точно уравнение получится и для H . Нетрудно видеть, что уравнение (2) есть дифференциальное уравнение электрической волны, распространяющейся по направлению оси x со скоростью, определяемой соотношением

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (3)$$

В самом деле, подстановкой можно проверить, что уравнению (2)

удовлетворяет E , зависящее от x и t , следующим образом:

$$E = f\left(t - \frac{x}{v}\right), \quad (4)$$

где f — произвольная функция, если только v удовлетворяет уравнению (3).

Как было показано ранее (т. I, § 63, 1959 г., в пред. изд. § 73), выражение (4) описывает распространяющуюся волну, причем вид аргумента функции соответствует эффекту запаздывания. Определенное значение E , бывшее в более ранний момент времени t_1 в точке x_1 , будет в более поздний момент t_2 в точке x_2 , причем $x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1)$, ибо при соблюдении указанного условия аргумент функции f в выражении (4) остается постоянным. Таким образом, v есть скорость распространения фазы электромагнитной волны. Согласно формуле (3) в вакууме эта скорость должна быть равна c — отношению электромагнитной и электростатической единиц силы тока (т. II, § 60, 1959 г. и пред. изд.).

Пользуясь уравнением (3), можно уравнению (2) придать следующий вид:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}.$$

В общем случае, когда E зависит от всех трех координат x, y, z , волновое уравнение приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (a)$$

где $E = E_x, E_y$ или E_z .

Для монохроматической волны с частотой ν можно исключить время из уравнения (a). Положим

$$E = E_0(x, y, z) \cos 2\pi\nu t, \quad (b)$$

где E_0 — амплитуда E . Тогда

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -4\pi^2\nu^2 E, \quad (в)$$

так как двойное дифференцирование по t эквивалентно умножению на $-4\pi^2\nu^2$. Подставив в формулу (a) вместо $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$ выражение этой производной по (в), после сокращения на $\cos 2\pi\nu t$ получим:

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_0}{\partial z^2} + \frac{4\pi^2\nu^2}{v^2} E_0 = 0. \quad (5)$$

Это уравнение также называют волновым. Иногда его записывают в несколько ином виде, а именно используют соотношение $\lambda\nu = v$:

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_0}{\partial z^2} + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} E_0 = 0. \quad (5')$$

Максвелл предположил, что свет представляет собой одну из разновидностей электромагнитных волн, и проверил свое предположение, сравнив скорость света, которая была определена Физо, с константой c , вычисленной из чисто электромагнитных измерений. Обе цифры совпали с точностью до тысячных долей процента! Нельзя не отметить, что такое прекрасное совпадение было в известной мере результатом случайности, так как обе величины были в то время измерены с ошибками порядка 3%. В проверке теории Максвелл оказался удачливее Ньютона, который по вине неточных астрономических данных на 20 лет отложил опубликование закона всемирного тяготения. Полученное Максвеллом совпадение послужило серьезным аргументом в пользу электромагнитной теории света, и новые измерения подтвердили это совпадение с большой точностью.

Вместе с тем электромагнитная теория света далеко не сразу получила общее признание. Только после известных опытов П. Н. Лебедева по световому давлению (§ 41) всякие сомнения в правильности этой теории исчезли. Кельвин сказал как-то К. А. Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, и вот ваш Лебедев своими опытами заставил меня сдаться».

При распространении света в среде скорость v изменяется согласно уравнению (3). Из этого уравнения следует, что показатель преломления n должен быть связан с электрическими и магнитными параметрами среды формулой Максвелла

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (6)$$

Соотношение (6) хорошо согласуется с экспериментальными данными для ряда газов (азот, водород, углекислота) и жидкостей типа бензола и толуола. Но для многих других жидких и твердых тел наблюдаются серьезные расхождения, которые, однако, вызваны особыми причинами (§ 43).

В электромагнитной теории поперечность световых колебаний получила простое объяснение. Электрическое и магнитное поля волны направлены перпендикулярно к направлению распространения волны.

Геометрическое место точек с одинаковой фазой светового колебания называется *волновой поверхностью*. Реальные волновые поверхности имеют довольно сложную форму. Световая волна, испущенная отдельным атомом, с достаточной степенью точности может считаться *сферической*.

Очевидно, что чем дальше ушла сферическая волна от своего источника, тем меньше ее кривизна. В оптике часто оперируют с понятием *плоская волна*. Например, выше мы рассмотрели именно случай плоской волны. Следует, однако, помнить, что плоская волна представляет собой идеализацию, соответствующую бесконечно удаленному источнику света. Поскольку напряженности полей E и H

обратно пропорциональны расстоянию от источника (т. II, § 89, 1959 и пред. изд.), то в абсолютно плоской волне E и H должны быть равны нулю. Практически плоской волной с конечными E и H считают часть волновой поверхности любой формы, кривизной которой можно в данной конкретной задаче пренебречь.

Поток энергии в световой волне определяется *вектором Умова — Пойнтинга* (т. II, § 89). Световые лучи совпадают с направлениями этого вектора. В изотропной среде световые лучи нормальны к волновым поверхностям. Согласно сказанному абсолютно плоская волна не может нести конечный поток энергии. Конечные потоки световой энергии всегда заключены в конечных телесных углах, образуемых световыми лучами. Если в выражении для численного значения вектора Умова — Пойнтинга заменить H через E [пользуясь соотношением (11), т. II, § 89], то мы получим, что поток энергии световой волны пропорционален E^2 . Таким образом, энергия световых волн, так же как и волн любой другой природы, пропорциональна квадрату амплитуды.

§ 3. Скорость света

Свет, посылаемый каким-либо источником, достигает наблюдателя не мгновенно, а через некоторое время.

Скорость распространения в пустоте всех электромагнитных волн одинакова.

Благодаря колоссальной величине этой скорости свет пробегает большие расстояния в чрезвычайно короткие промежутки времени. Понятно поэтому, что для опытного определения скорости света необходимы либо расстояния астрономических масштабов, либо приборы, позволяющие измерять промежутки времени порядка ничтожных долей секунды.

При астрономическом наблюдении какого-либо явления, происходящего на удаленном от нас небесном светиле, мы тем позже получим световой сигнал об этом явлении, чем дальше находится Земля от светила. Очевидно, что мы будем наблюдать явление с запозданием, равным времени, которое необходимо свету для прохождения пути от светила до Земли. Это время равно расстоянию от светила до Земли, деленному на скорость света.

Если мы наблюдаем какой-либо периодический процесс, происходящий в удаленной от Земли системе, то при неизменном расстоянии между Землей и системой указанное выше запоздывание не будет влиять на наблюдаемый период процесса. Времена, соответствующие началу и концу периода, мы определим с одинаковыми запозданиями, и разность этих времен, равная величине периода, останется неизменной. Иное дело, если за время периода Земля удалится или приблизится к системе. В первом случае конец периода будет зарегистрирован с большим запозданием, чем начало, что при соответствующем вычитании приведет к кажущемуся увеличению периода.