

## ФОТОНЫ

Темы кодификатора ЕГЭ: фотоны, энергия фотона, импульс фотона.

В результате исследования явлений, связанных с взаимодействием света и вещества (тепловое излучение и фотоэффект), физики пришли к выводу, что свет состоит из отдельных порций энергии — *фотонов*. Излучение света, его распространение и поглощение происходит строго этими порциями.

Фотоны обладают энергией и импульсом и могут обмениваться ими с частицами вещества (скажем, с электронами или атомами). При этом мы говорим о *столкновении* фотона и частицы. При упругом столкновении фотон меняет направление движения — свет рассеивается. При неупругом столкновении фотон поглощается отдельной частицей или совокупностью частиц вещества — так происходит поглощение света.

Словом, фотон ведёт себя как частица и поэтому — наряду с электроном, протоном, нейтроном и некоторыми другими частицами — причислен к разряду *элементарных частиц*.

### Энергия фотона

Выражение для энергии фотона с частотой  $\nu$  мы уже знаем:

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Часто бывает удобно работать не с обычной частотой  $\nu$ , а с циклической частотой  $\omega = 2\pi\nu$ . Тогда вводят другую постоянную Планка «аш с чертой»:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Выражение (1) для энергии фотона примет вид:

$$E = \hbar\omega.$$

Фотон движется в вакууме со скоростью света  $c$  и потому является *релятивистской* частицей: описывая фотон, мы должны привлекать формулы теории относительности. А там имеется такая формула для энергии тела массы  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Если предположить, что  $m \neq 0$ , то формула (2) приводит к бессмысленному заключению: энергия фотона должна быть бесконечной. Чтобы избежать этого противоречия, остаётся признать, что *масса фотона равна нулю*. Формула (2) позволяет сделать и более общий вывод: *только безмассовая частица может двигаться со скоростью света*.

### Импульс фотона

Обладая энергией, фотон должен обладать и импульсом. Действительно, важнейшая формула теории относительности даёт связь энергии и импульса частицы:

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4. \quad (3)$$

Для фотона, имеющего нулевую массу, эта формула сводится к простому соотношению:

$$E = pc.$$

Отсюда для импульса фотона получаем:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}. \quad (4)$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.

Учитывая, что отношение  $c/\nu$  есть длина волны  $\lambda$ , формулу (4) можно переписать так:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (5)$$

В видимом диапазоне наименьшими значениями энергии и импульса обладают фотоны красного света — у них самая маленькая частота (и самая большая длина волны). При движении в сторону фиолетового участка спектра энергия и импульс фотона линейно возрастают с частотой.

## Давление света

Свет оказывает давление на освещаемую поверхность. Такой вывод был сделан Максвеллом из теоретических соображений и получил экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах П. Н. Лебедева. Если понимать свет как поток фотонов, обладающих импульсом, то можно легко объяснить давление света и вывести формулу Максвелла.

Предположим, что на некоторое тело падает свет частоты  $\nu$ . Лучи направлены перпендикулярно поверхности тела; площадь освещаемой поверхности равна  $S$  (рис. 1).

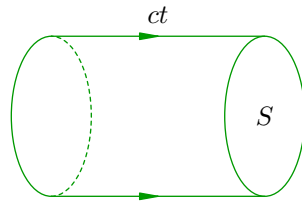


Рис. 1. Давление света

Пусть  $n$  — концентрация фотонов падающего света, то есть число фотонов в единице объёма. За время  $t$  на нашу поверхность попадают фотоны, находящиеся внутри цилиндра высотой  $ct$ . Их число равно:

$$N = nV = nSct.$$

При падении света на поверхность тела часть световой энергии отражается, а часть — поглощается. Пусть  $r$  — коэффициент отражения света; величина  $r < 1$  показывает, какая часть световой энергии отражается от поверхности. Соответственно, величина  $1 - r$  — это доля падающей энергии, поглощаемая телом.

Как мы теперь знаем, энергия света пропорциональна числу фотонов. Поэтому можно написать, какое количество фотонов (из общего числа  $N$ ) отразится от поверхности, а какое — поглотится ею:

$$N_{\text{отр}} = rN, \quad N_{\text{погл}} = (1 - r)N.$$

Импульс каждого падающего фотона равен  $p = h\nu/c$ . Поглощённый фотон испытывает неупругое столкновение с телом и передаёт ему импульс  $p$ . Отражённый фотон после упругого

столкновения меняет направление своего импульса на противоположное, и поэтому импульс, переданный телу отражённым фотоном, равен  $2p$ .

Таким образом, от каждого фотона, входящего в световой поток, тело получает некоторый импульс. Вот простая и очевидная причина того, что свет оказывает давление на освещаемую поверхность.

Суммарный импульс, полученный телом от  $N$  падающих фотонов, равен:

$$P = 2p \cdot N_{\text{отр}} + p \cdot N_{\text{погл}} = 2prN + p(1 - r)N = (1 + r)pN.$$

На нашу поверхность  $S$  действует сила  $F$ , равная импульсу, полученному телом в единицу времени:

$$F = \frac{P}{t} = (1 + r)p \frac{N}{t} = (1 + r) \frac{h\nu}{c} \frac{nSct}{t} = (1 + r)h\nu nS.$$

Давление света есть отношение этой силы к площади освещаемой поверхности:

$$p_{\text{света}} = \frac{F}{S} = (1 + r)h\nu n. \quad (6)$$

Выражение  $h\nu n$  имеет простой физический смысл: будучи произведением энергии фотона на число фотонов в единице объёма, оно равно энергии света в единице объёма, то есть объёмной плотности энергии  $w$ . Тогда соотношение (6) приобретает вид:

$$p_{\text{света}} = (1 + r)w.$$

Это и есть формула для давления света, теоретически выведенная Максвеллом (в рамках классической электродинамики) и экспериментально проверенная в опытах Лебедева.

## Двойственная природа света

В результате рассмотрения всей совокупности оптических явлений возникает естественный вопрос: что же такое свет? Непрерывно распределённая в пространстве электромагнитная волна или поток отдельных частиц — фотонов? Теория и эксперименты приводят к заключению, что оба ответа должны быть утвердительными.

1. Явления интерференции и дифракции света, характерные для любых волновых процессов, не оставляют сомнений в том, что свет есть форма волнового движения материи. Таким образом, мы должны признать: да, *свет имеет волновую природу*, свет — это электромагнитная волна.
2. Однако явления взаимодействия света и вещества (например, фотоэффект) указывают на то, что свет ведёт себя как поток отдельных частиц. Эти частицы — фотоны — ведут, так сказать, самостоятельную образ жизни, обладают энергией и импульсом, участвуют во взаимодействиях с атомами и электронами. Излучение света — это рождение фотонов. Распространение света — это движение фотонов в пространстве. Отражение и поглощение света — это соответственно упругие и неупругие столкновения фотонов с частицами вещества.

Все попытки истолковать указанные явления излучения и поглощения света в рамках волновых представлений классической физики окончились неудачей. Оставалось лишь согласиться с тем, что *свет имеет корпускулярную<sup>1</sup> природу*, свет — это совокупность фотонов, мчащихся в пространстве.

<sup>1</sup>От латинского слова *corpusculum* — маленькое тельце, частица.

Таким образом, свет имеет двойственную, *корпускулярно-волновую* природу — он может проявлять себя то так, то эдак. В одних явлениях (интерференция, дифракция) на передний план выходит волновая природа, и свет ведёт себя в точности как волна. Но в других явлениях (фотоэффект) доминирует корпускулярная природа, и свет ведёт себя подобно потоку частиц.

Странно всё это, не правда ли? Но что поделать — так устроена природа. Мы, люди, живём среди макроскопических тел, и наше воображение оказалось не способным полноценно представить себе явления микромира.

Природа, однако, неизмеримо шире и богаче того, что может вместить в себя человеческое воображение. Признав это и руководствуясь не столько собственным воображением, сколько наблюдениями, результатами экспериментов и весьма изощрённой математикой, люди начали успешно создавать квантовую теорию микроскопических явлений и процессов.

О некоторых парадоксальных на первый взгляд — но тем не менее подтверждённых экспериментально! — выводах квантовой теории мы поговорим в следующем листке.