

# Корпускулярные свойства света

В. МОЖАЕВ

**Е**СЛИ интерференция и дифракция света вполне однозначно подтверждают волновые свойства света, то такие явления, как фотоэлектрический эффект или эффект Комптона (упругое рассеяние фотонов на свободных электронах, которое приводит к увеличению длины волны рассеянного фотона), говорят о наличии у света корпускулярных свойств. Свет обладает двойственностью (дуализмом) свойств.

Согласно Эйнштейну, электромагнитное поле можно рассматривать как совокупность движущихся со скоростью света фотонов — частиц с нулевой массой покоя и энергией

$$E = h\nu,$$

где  $\nu$  — частота излучения, а  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — универсальная постоянная, получившая название постоянной Планка. Но если фотон обладает энергией, то он должен обладать и импульсом, как этого требует теория относительности. Фотон является типичной ультрарелятивистской частицей, а для таких частиц связь между энергией  $E$  и импульсом  $p$  имеет простой вид

$$E = pc,$$

где  $c$  — скорость света. Поэтому импульс фотона равен

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

Импульс фотона проявляется, например, в давлении света.

Чем больше частота электромагнитного излучения, тем больше энергия и импульс фотона и тем более отчетливо проявляются корпускулярные свойства света. Если энергия и импульс фотонов видимого света крайне малы — для зеленого света, например,  $E = 4 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,5 эВ — и такие фотоны поддерживают жизнь на нашей Земле, то фотоны, начиная с энергии порядка 5 эВ (ультрафиолет) и далее, благодаря своим корпускулярным свойствам, приводят к разрушению всего живого. Но не будем о грустном и перейдем к разбору задач, в которых фигурируют корпускулярные свойства света.

**Задача 1.** Пылинка освещается импульсом лазерного света с длиной волны  $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-5}$  см. Определите число поглощенных пылинкой фотонов, если она в результате действия света приобрела скорость  $v = 1$  мм/с. Масса пылинки  $m = 0,1$  мг. Считать, что пылинка поглощает весь падающий на нее свет.

Обозначим число фотонов, поглощенных пылинкой, через  $N$ . До поглощения фотоны обладали суммарным импульсом

$$p = \frac{Nh}{\lambda}.$$

По закону сохранения импульса после поглощения фотонов пылинка приобретает импульс, равный импульсу фотонов:

$$mv = \frac{Nh}{\lambda}.$$

Отсюда получаем

$$N = \frac{mv\lambda}{h} = 9,5 \cdot 10^{16}.$$

Рассмотрим энергетический баланс данного процесса. Энергия поглощенных фотонов

$$E = N \frac{hc}{\lambda} = mvc,$$

а кинетическая энергия, которую приобрела пылинка,

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Отношение энергий равно

$$\frac{E_k}{E} = \frac{v}{2c} = 1,7 \cdot 10^{-12}.$$

То, что это отношение пропорционально  $v/c$ , говорит о том, что мы имеем дело с релятивистским эффектом. Однако коэффициент  $1/2$  свидетельствует о том, что одна из частиц — а именно пылинка — является нерелятивистской. Чрезвычайно малое значение отношения  $E_k/E$  означает, что практически вся энергия фотонов переходит во внутреннюю энергию пылинки.

**Задача 2.** Узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией  $W = 0,4$  Дж и длительностью  $\tau = 10^{-9}$  с падает на собирающую линзу парал-

лельно ее главной оптической оси (рис. 1). Расстояние от пучка до главной оптической оси равно фокусному

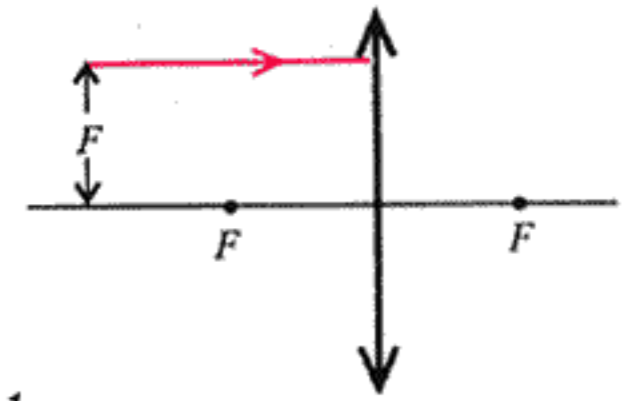


Рис. 1

расстоянию линзы. Найдите величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхностей линзы пренебречь.

Суммарный импульс фотонов, падающих на линзу в единицу времени, равен

$$p_1 = \frac{W}{\tau c}.$$

После преломления в линзе пучок проходит через фокус линзы и пересекает главную оптическую ось линзы под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Импульс фотонов, прошедших линзу за единицу времени, составляет

$$p_2 = \frac{W}{2\tau c}$$

(коэффициент  $1/2$  учитывает поглощение в линзе). По второму закону Ньютона сила, действовавшая на фотоны, равна изменению суммарного импульса фотонов за единичный интервал времени. На рисунке 2 показана соответствующая векторная диаграм-

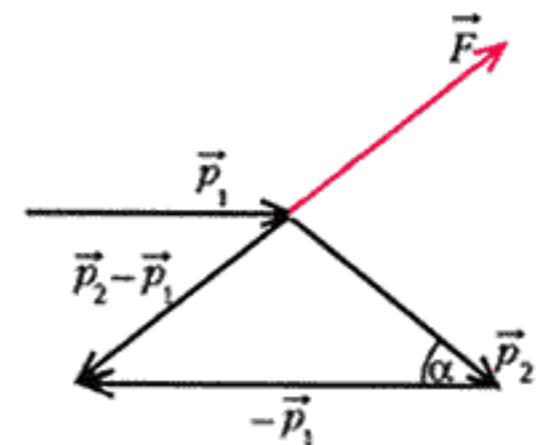


Рис. 2

ма:  $\vec{p}_1$  — импульс фотонов (в единицу времени) до взаимодействия с линзой,  $\vec{p}_2$  — после взаимодействия и  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1$  — их разность, которая и равна силе, действовавшей на фотоны со стороны линзы. По третьему закону Ньютона в противоположную сторону (красная стрелка) будет направлена равная ей по величине сила реакции  $\vec{F}$  со