

---

## ФОТОНЫ. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

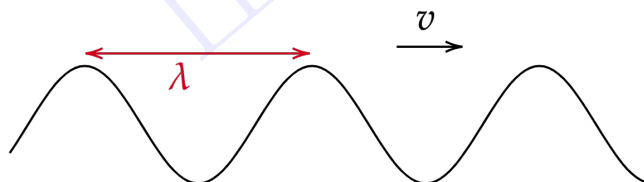
---

### Свет. Корпускулярно-волновой дуализм света

С одной стороны, свет — электромагнитная волна, которая распространяется в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, то есть со скоростью света. Длина волны:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

где  $\nu$  — частота, с которой распространяется свет,  $c$  — скорость света.



С другой стороны, свет — элементарная частица (квант), которая называется фотоном. То есть свет обладает двойственной природой, иными словами, свету присущ корпускулярно-волновой дуализм.

Волновые свойства света проявляются при его распространении, интерференции, дифракции, поляризации. Корпускулярные свойства проявляются при взаимодействии света с веществом.

### Гипотеза Планка. Энергия фотона

Гипотеза Планка: свет (электромагнитная энергия) излучается веществом не непрерывно, а дискретно, то есть отдельными порциями. Энергия фотона и частота электромагнитной волны связаны друг с другом соотношением:

$$E_{\text{ф}} = h\nu$$

где  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

## Масса и импульс фотона

Обладая энергией, фотон должен обладать и импульсом. Связь энергии и импульса частицы из важнейшей формулы теории относительности:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Фотон не обладает массой покоя  $m_0 = 0$ , поэтому эта формула сводится к следующему выражению:

$$E = pc$$

Отсюда для импульса фотона получаем:

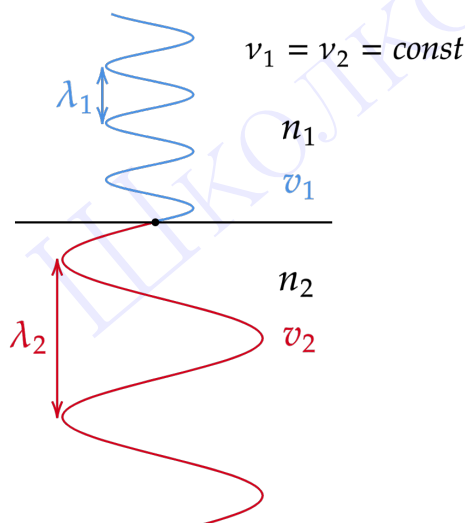
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча. Учитывая, что отношение  $\frac{c}{\nu}$  есть длина волны  $\lambda$ , формулу данную формулу можно переписать следующим образом:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

## Переход света из одной среды в другую

Скорость волны определяется свойствами среды, в которой эта волна распространяется. В любой среде электромагнитная волна движется со скоростью чуть меньшей, чем скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.



Величина, показывающая во сколько раз среда затормаживает электромагнитное излучение, называется абсолютным показателем преломления. Абсолютный показатель преломления — это отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде.

**При переходе из одной среды в другую частота волны не меняется, меняются лишь скорость и длина волны.**

$$\nu_1 = \nu_2 = \text{const}$$

Для первой и второй среды можно записать соотношения  $\nu = \frac{v_1}{\lambda_1}$  и  $\nu = \frac{v_2}{\lambda_2}$ :

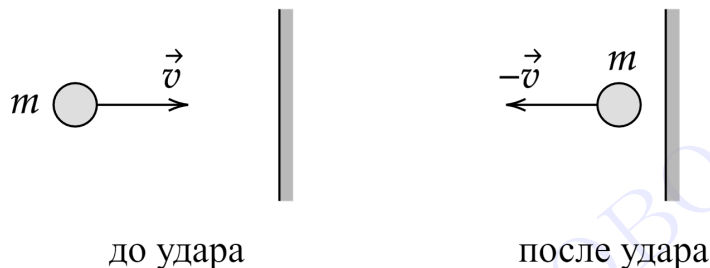
$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

### Абсолютно упругий и абсолютно неупругий удар

Вернемся в мир классической механики и вспомним понятия абсолютно упругого удара и абсолютно неупругого удара.

- Абсолютно упругий удар (стена закреплена)

Пусть шарик массой  $m$  летит со скоростью  $v$  и абсолютно упруго сталкивается с закрепленной стенкой. После абсолютно упругого удара скорость шарика остается той же по модулю, но меняет свое направление.



При абсолютно упругом ударе изменение импульса:

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_k - \vec{p}_0 = -m\vec{v} - m\vec{v} = -2m\vec{v}$$

Модуль изменения импульса:

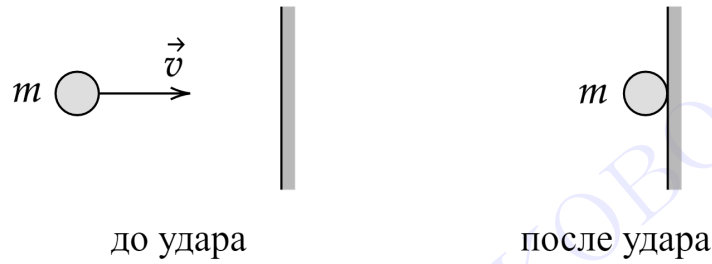
$$|\Delta \vec{p}| = |-2m\vec{v}| = |-2m| \cdot |\vec{v}|$$

$$\Delta p = 2mv = 2p_0$$

- Абсолютно неупругий удар (стена закреплена)

Пусть шарик массой  $m$  летит со скоростью  $v$  и абсолютно неупруго сталки-

вается с закрепленной стенкой. После абсолютно неупругого удара скорость шарика равна нулю.



При абсолютно неупругом ударе изменение импульса:

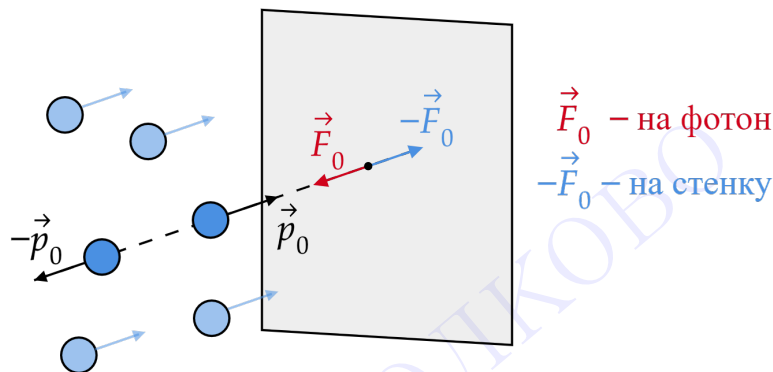
$$\Delta \vec{p} = \vec{0} - m\vec{v} = -m\vec{v}$$

Модуль изменения импульса:

$$\Delta p = mv$$

### Давление света

Пусть на зеркальную поверхность падает поток фотонов. Рассмотрим фотон с импульсом  $\vec{p}_0$ , который абсолютно упруго ударяется о зеркальную поверхность и летит в обратную сторону с импульсом  $-\vec{p}_0$ . Абсолютно упругий удар обеспечивается зеркальностью, которая позволяет поверхности отражать фотоны.



Фотон отражается от стенки, поскольку на него со стороны этой стенки действует некоторая сила  $\vec{F}_0$ . В свою очередь, по 3 закону Ньютона на стенку со стороны фотона действует сила  $-\vec{F}_0$ .

Запишем 2 закон Ньютона в импульсной форме для одного фотона:

$$\vec{F}_0 = \frac{\Delta \vec{p}_0}{\Delta t}$$

С учетом того, что удар фотона о стену абсолютно упругий, запишем модуль

силы:

$$F_0 = \frac{2p_0}{\Delta t}$$

На стенку летит не один, а  $N$  фотонов. Совместно они действуют на поверхность с общей силой:

$$F_{\text{стен}} = NF_0$$

Давление по определению:

$$P = \frac{F_{\text{стен}}}{S} = \frac{N \cdot 2p_0}{S\Delta t}$$

С учетом того, что импульс фотона  $p_0 = \frac{h}{\lambda}$ , найдем давление света:

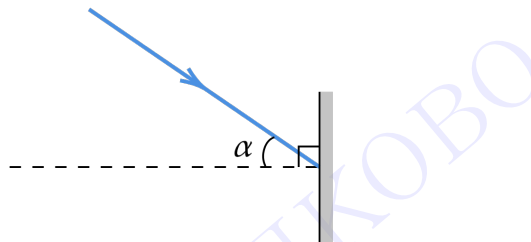
$$P = \frac{2Nh}{S\Delta t\lambda}$$

Обратите внимание, что этой формулы **нет в кодификаторе**, поэтому ее вывод необходимо запомнить.

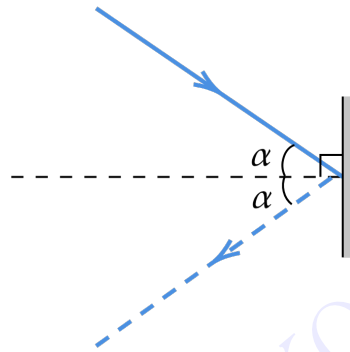
Давление света очень мало и в атмосфере не чувствуется, его можно ощутить только в вакууме.

### Давление света при падении под углом

Пусть свет падает под углом  $\alpha$  на зеркало.

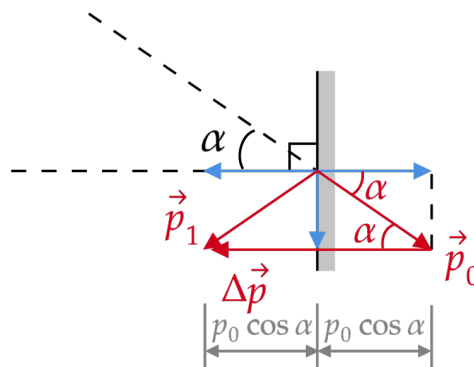


Угол падения всегда отсчитывается как угол между направлением падения и перпендикуляром к поверхности. Так как поверхность зеркальная, то угол падения света равен углу отражения.



Рассмотрим некоторый фотон с импульсом  $\vec{p}_0$ , отразившийся от поверхности с импульсом  $\vec{p}_1$ . При отражении модуль вектора  $\vec{p}_0$  остается неизменным, поэтому модули вектора  $\vec{p}_0$  и вектора  $\vec{p}_1$  равны. Однако направления этих векторов различны. Найдем изменение импульса как векторной величины:

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_1 - \vec{p}_0$$



Найдем модуль изменения импульса:

$$|\Delta\vec{p}| = |\vec{p}_1 - \vec{p}_0| = |\vec{p}_1 + (-\vec{p}_0)|$$

Из геометрии можно записать:

$$|\Delta\vec{p}| = 2 \cdot p_0 \cos \alpha$$

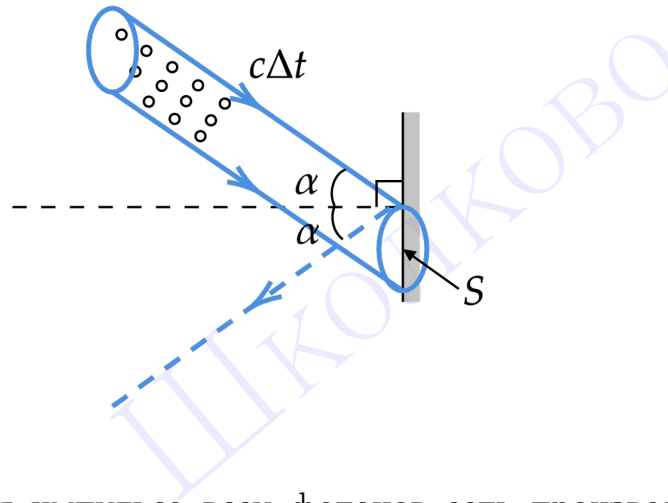
---

**NOTE** Последняя формула применима и в случае, когда свет падает перпендикулярно поверхности. Так как угол  $\alpha = 0^\circ$  и соответственно  $\cos \alpha = 1$ , то можем получить уже известную формулу  $|\Delta\vec{p}| = 2p_0$ .

---

Представим, что за некоторый промежуток времени  $\Delta t$  в некотором объеме  $\Delta V$

летят фотоны на площадку  $S$  зеркальной поверхности. Скорость распространения фотонов равна скорости света. Фотоны, двигаясь в вакууме проходят расстояние  $c\Delta t$ , где  $c$  — скорость света в вакууме.



Модуль изменения импульса всех фотонов есть произведение изменения импульса одного фотона и количества фотонов, которые прилетают по заданному направлению за время  $\Delta t$ :

$$\Delta p_{\Sigma \phi} = 2p_0 \cos \alpha \cdot N_{\phi}$$

Введем понятие концентрации фотонов  $n_{\phi}$ , так как при смене угла наклона падения  $\alpha$  именно концентрация фотонов останется неизменной:

$$n_{\phi} = \frac{\Delta N_{\phi}}{\Delta V}$$

Выразим число фотонов, которые находятся в некотором объеме  $V$  через концентрацию:

$$N_{\phi} = n_{\phi} \cdot V$$

Вычислим объем  $V$ , в котором распространяются фотоны, как произведение площади основания  $S$  «цилиндра» на высоту (ее также найдем из геометрии, см. рисунок):

$$V_{\text{ц}} = S \cdot h = S \cdot (c\Delta t \cos \alpha)$$

Теперь общее число фотонов которые находятся в некотором объеме  $V$ , с учетом этого объема:

$$N_{\text{ф}} = n_{\text{ф}} \cdot V = n_{\text{ф}} \cdot (S \cdot c \Delta t \cos \alpha)$$

С учетом второго закона Ньютона в импульсной форме импульс всех фотонов равен:

$$\Delta p_{\Sigma \text{ф}} = 2p_0 \cos^2 \alpha \cdot (n_{\text{ф}} \cdot S \cdot c \Delta t) = F \Delta t$$

Сократим все на  $t$  и найдем силу:

$$F = 2p_0 \cos^2 \alpha \cdot n_{\text{ф}} \cdot S \cdot c$$

Таким образом, давление, оказываемое пучком фотонов на зеркало при угле падения  $\alpha$ , равно:

$$P = \frac{F}{S} = 2p_0 \cos^2 \alpha \cdot n_{\text{ф}} \cdot c$$

---

**NOTE** В случае не зеркальной, а абсолютно черной поверхности, происходит полное поглощение фотонов, падающих на нее. Тогда в формуле для общего импульса фотонов нет множителя 2 и она имеет вид:

$$\Delta p_{\Sigma \text{ф}} = p_0 \cos \alpha \cdot N_{\text{ф}}$$

Тогда давление, оказываемое пучком фотонов на абсолютно черную поверхность при угле падения  $\alpha$ , равно:

$$P = p_0 \cos^2 \alpha \cdot n_{\text{ф}} \cdot c$$

---