

4. Давление света

Фотоны, частицы света, имеют массу покоя равную нулю, движутся в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$, имеют энергию и импульс

Энергия фотона зависит от частоты света: $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$

Из специальной теории относительности нам известна формула связи энергии с массой и скоростью: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$. Если тело покоится, то его энергия равна $E^2 = p^2c^2$. Если масса равна нулю $E^2 = p^2c^2$ или $E = pc$

Тогда импульс (то есть мера количества движения) фотона равен $p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Рассмотрим такую модель: электромагнитная волна падает на металлическую пластину. Пластина содержит свободные электроны, которые двигаются циклично из-за электрического поля в волне, а магнитное поле создает

Свет, падая на поверхность, создает давление. В общем случае, часть фотонов отражается от поверхности, а часть поглощается

Давление света определяется импульсом, который передается поверхности фотонами, падающими на поверхность за время наблюдения

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S\Delta t}$$

При отражении импульс фотона меняется на $2\frac{h}{\lambda}$ (так как направление становится противоположным), а при поглощении – на $\frac{h}{\lambda}$

Пусть α – коэффициент отражения, тогда αN фотонов отразится, а $(1 - \alpha)N$ – поглотится

Полное изменение импульса равно $\Delta p = \alpha 2\frac{h}{\lambda}N + (1 - \alpha)\frac{h}{\lambda}N$ или $\Delta p = (1 + \alpha)\frac{h}{\lambda}N$

Количество фотонов, падающих на поверхность, можно выразить так: $N = nSc\Delta t$

Тогда давление $P = (1 + \alpha)n\frac{hc}{\lambda} = (1 + \alpha)n\hbar\nu$

Введем другую переменную $w = nh\nu$ – объемная плотность световой энергии, тогда $P = (1 + \alpha)w$

Так как $w = \frac{I}{c}$, $P = (1 + \alpha)\frac{I}{c}$, то есть световое давление определяется энергией (интенсивностью света)

Общее давление солнечных лучей на Землю равно 4.3 мкПа, поэтому в земных условиях заметить величину светового давления тяжело. Впервые давление света измерил физик Лебедев в 1899 году

В 1922 году физик Комптон изучал взаимодействие рентгеновского излучения с парафином и графита и наблюдал дифракционные картины рассеянного излучения

Предполагалось, согласно классической волновой теории рассеяния ЭМИ, что длина волны волны не должна изменяться

Под действием периодического электрического поля электромагнитной волны электрон вещества должен колебаться с частотой поля. Поэтому рассеянные веществом вторичные волны должны иметь ту же частоту, что и первичное излучение

Рассеянное рентгеновское излучение состояло не только из компонент с исходной длины волны λ , но и из компоненты с другой длиной волны λ' , которые рассеивались под другим углом

Подобное явление получило название эффекта Комптона – явление упругого рассеяния электромагнитного излучения на свободных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Дело в том, что при столкновении фотона с электроном фотон теряет часть импульса, которая передается электрону, таким образом, фотон меняет длину волны

Сдвиг волны составляет $\Delta\lambda = \lambda_K(1 - \cos\varphi)$, где φ – угол отклонения вторичной волны, а $\lambda_K = \frac{h}{m_{\text{пок}}c} = 2.426 \text{ пм}$ – Комптоновская длина волны

Таким образом, в разных опытах свет ведет себя по-разному. Явления интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии объясняются электромагнитной волновой природой света. В тепловом излучении, фотоэффекте, эффекте Комптона, давления света свет представляется как поток частиц

Поэтому свет обладает двойственностью: он является и частицей и волной. Тогда Луи де Бройль в 1924 году выдвинул гипотезу, что частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами обладают свойствами волны

Тогда $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ (а в релятивистском случае $p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$)

А это значит, что маленькие частицы, такие как электроны, протоны, нейтроны, могут обладать длиной волны

С помощью этого можно измерить период решетки: направляя пучок электронов с известной скоростью (а значит известной длиной волны де Бройля) на монокристалл, измерив углы дифракции, можем получить период по формуле $d \sin \varphi = k\lambda$