

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

Тепловым излучением называется испускание электромагнитных волн всеми телами, имеющими температуру выше 0 К.

Тепловое излучение имеет электромагнитную природу и генерируется колебательным движением электрических зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества тел.

Тепловое излучение является результатом превращения внутренней энергии тел в электромагнитное излучение.

Все остальные виды излучения называются люминесценцией (электролюминесценция, катодолюминесценция, фосфоресценция и др.).

Опыт показывает, что тепловое излучение – единственный вид излучения, которое может быть равновесным. Все остальные виды излучения (люминесценция), оказываются неравновесными.

Если излучающее поместить в адиабатическую оболочку, то с течением времени наступает термодинамическое равновесие с одинаковой для тела и оболочки температурой.

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

В состоянии **теплового равновесия** количество энергии, испускаемой телом за единицу времени, равно количеству энергии, поглощаемой телом за единицу времени.

При этом распределение энергии между телом и излучением для каждой длины волны остаётся неизменным.

Нарушение теплового равновесия приводит к возникновению процессов, восстанавливающих это равновесие.

Кроме того, **экспериментально** установлено, что **тепловое излучение однородно, изотропно, не поляризовано и его спектр - сплошной**.

Рассмотрим основные характеристики теплового излучения:

✓ **Поток энергии (мощность излучения) Φ** - величина, равная энергии, испускаемой всей поверхностью тела за единицу времени:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, \quad [\Phi] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт.}$$

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

- ✓ Энергетическая светимость (полная мощность излучения, или полная излучательность) тела R_T – это поток энергии, испускаемой единицей поверхности тела во всех направлениях и во всем интервале длин волн:

$$R_T = \frac{d\Phi}{dS}, \quad [R_T] = \frac{\text{Дж}}{M^2 \cdot C}.$$

- ✓ Спектральная плотность излучательности или испускательная способность тела:

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_{\lambda,T}}{d\lambda} \quad \text{или} \quad r_{\nu,T} = \frac{dR_{\nu,T}}{d\nu}$$

- это энергия, которая испускается телом за единицу времени с единицы поверхности в единичном интервале длин волн $d\lambda$ или частот $d\nu$

$dR_{\lambda,T}$ - поток энергии с единицы поверхности в интервале длин волн $d\lambda$,
а $dR_{\nu,T}$ - в соответствующем интервале частот $d\nu$.

Очевидно, $dR_{\lambda,T} = dR_{\nu,T}$ или $r_{\lambda,T}d\lambda = r_{\nu,T}d\nu$.

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

Так как $v = \frac{c}{\lambda}$, то $dv = d\left(c \cdot \lambda^{-1}\right) = -c \cdot \lambda^{-2} \cdot d\lambda \Rightarrow dv = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$,

где знак минус указывает на то, что с возрастанием одной из величин (v или λ) другая величина убывает. Поэтому в дальнейшем знак минус будем опускать.

Таким образом,

$$r_{\lambda,T} = r_{v,T} \cdot \frac{c}{\lambda^2}.$$

С помощью этой формулы можно перейти от $r_{\lambda,T}$ к $r_{v,T}$ и наоборот.

Зная спектральную плотность излучательности, можно вычислить **интегральную светимость (полную излучательность)**, просуммировав по всем длинам волн:

$$R_{\lambda,T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} \cdot d\lambda \quad \text{или по всем частотам:} \quad R_{v,T} = \int_0^{\infty} r_{v,T} \cdot dv.$$

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

- ✓ Поглощательная способность (спектральная плотность поглощательности) $\alpha_{\lambda,T}$ равна отношению энергии $dW_{\lambda,T}^{\text{погл}}$, поглощенной единицей поверхности за единицу времени в интервале длин волн $(\lambda, \lambda+d\lambda)$, к энергии $dW_{\lambda,T}^{\text{пад}}$, падающей на эту поверхность:

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,T}^{\text{погл}}}{dW_{\lambda,T}^{\text{пад}}}.$$

Все тела в природе с точки зрения теплового излучения делятся на абсолютно черные, белые и серые, в зависимости от значений $\alpha_{\lambda,T}$:

$\alpha_{\lambda,T} = 1$ – **абсолютно черное тело**;

$\alpha_{\lambda,T} = 0$ – **белое тело**;

$0 < \alpha_{\lambda,T} < 1$ – **серое тело**.

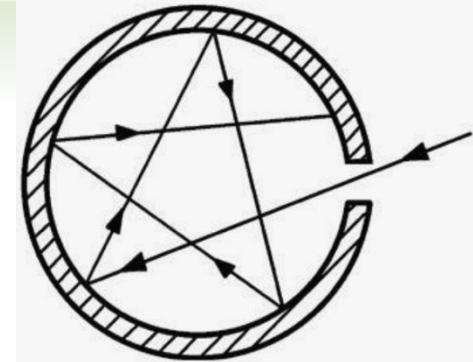
Понятие абсолютно черного тела было введено Кирхгофом (1862). В природе, однако, нет абсолютно черных тел. Хорошим приближением к такому телу является сажа, которая поглощает 99% падающего видимого излучения.

Элементы квантовой оптики

Тепловое излучение и его характеристики

В лабораторных условиях моделью абсолютно черного тела может служить малое отверстие в замкнутой адиабатной полости. Излучение, падающее на отверстие, попадая в полость, многократно отражается от стенок, т.е. практически полностью поглощается отверстием, которое ведет себя как абсолютно черное тело. Если полость поддерживать при какой-то температуре, то излучение, выходящее из отверстия, идентично излучению абсолютно черного тела.

В природе примером абсолютно черного тела является Солнце.



Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Исходя из термодинамических соображений, Кирхгоф сумел доказать (1860г.), что отношение спектральной плотности излучательности $r_{\lambda,T}$ к спектральной плотности поглощательности $\alpha_{\lambda,T}$ тела не зависит от его природы, а зависит только от длины волны λ и температуры T :

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T). \quad f(\lambda, T) \text{ - универсальная функция длины волны и температуры (функция Кирхгофа)}$$

Это заключение представляет собой **закон Кирхгофа**.

Для абсолютно черного тела ($\alpha_{\lambda,T} = 1$) и получаем:

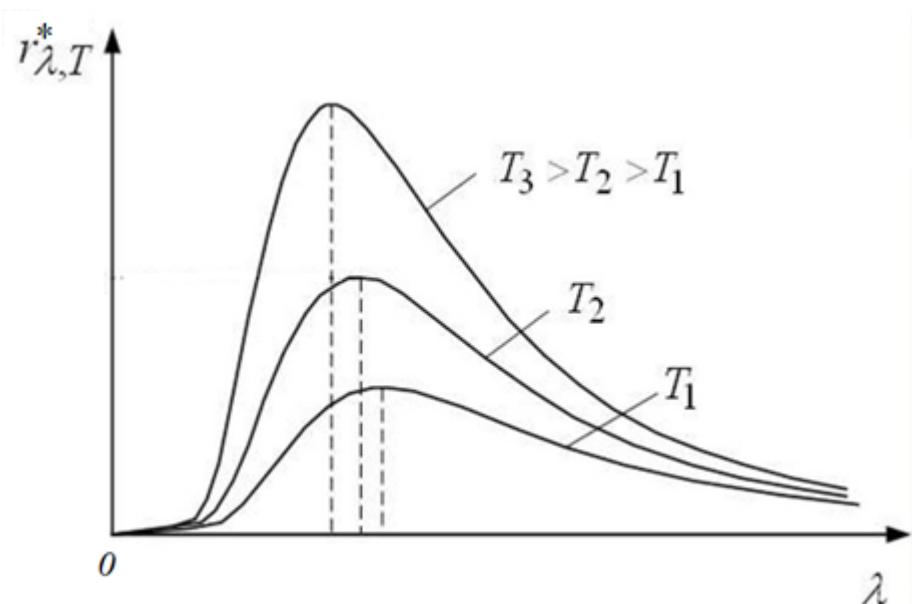
$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right)^* = r_{\lambda,T}^* = f(\lambda, T).$$

Итак, отношение спектральной плотности излучательности $r_{\lambda,T}$ к спектральной плотности поглощательности $\alpha_{\lambda,T}$ одинаково для всех тел с одинаковой температурой, независимо от их природы, и равно спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела $r_{\lambda,T}^*$, имеющего ту же температуру (* - означает абсолютно черное тело).

Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Из сказанного следует, что спектральная плотность излучательности абсолютно черного тела $r_{\lambda,T}^*$ является **функцией Кирхгофа**. С её помощью можно изучать тепловое излучение тел.

Экспериментальное изучение зависимости спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела от длины волны было проведено, основываясь на факте, что излучение малого отверстия в замкнутой полости в рассмотренной модели абсолютно черного тела идентично излучению абсолютно черного тела.



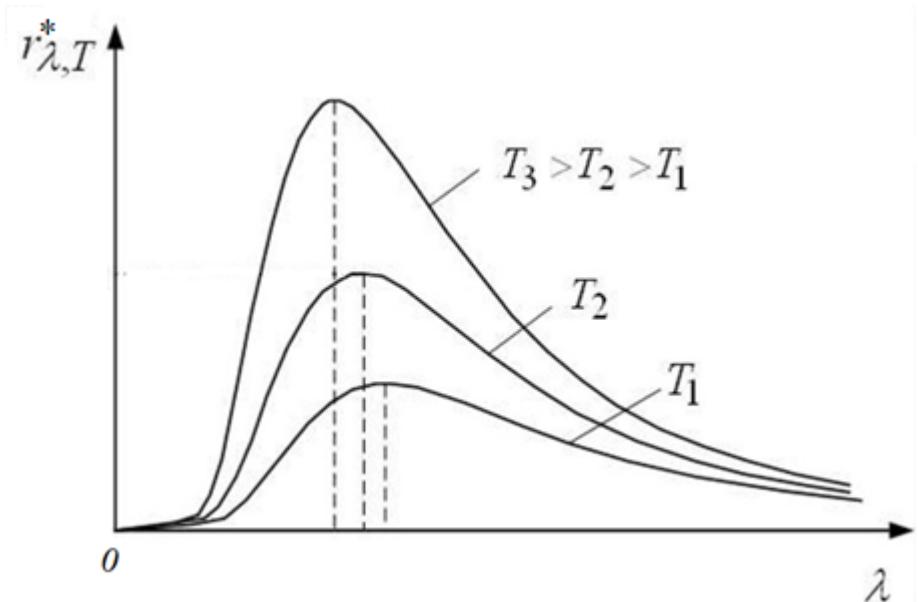
Вид экспериментальных кривых.

Элементы квантовой оптики

Законы теплового излучения

Анализируя изотермы распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, можно сделать выводы:

- площадь фигуры под кривой равна полной излучательности тела;
- спектр излучения сплошной, т.е. в спектре представлен непрерывный ряд длин волн;
- все изотермы имеют общее начало при $\lambda=0$;
- излучательная способность абсолютно черного тела изменяется в области коротких волн значительно быстрее чем в области длинных волн;
- существует максимум излучательной способности, который с повышением температуры смещается в сторону более коротких волн.



Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

И. Стефан (1879 г.) получил экспериментально, а Л. Больцман (1884 г.) доказал теоретически, что **полная излучательность абсолютно черного тела прямо пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени**:

$$R_{\lambda,T}^* = \sigma T^4.$$

Это выражение является математической записью **закона Стефана - Больцмана**.

Коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$ **постоянная Стефана - Больцмана**.

Для реального тела зависимость $R_{\lambda,T}$ от T следует записать так:

$$R_{\lambda,T} = \alpha_{\lambda,T} \cdot \sigma T^4,$$

где $\alpha_{\lambda,T}$ - поглощательная способность тела.

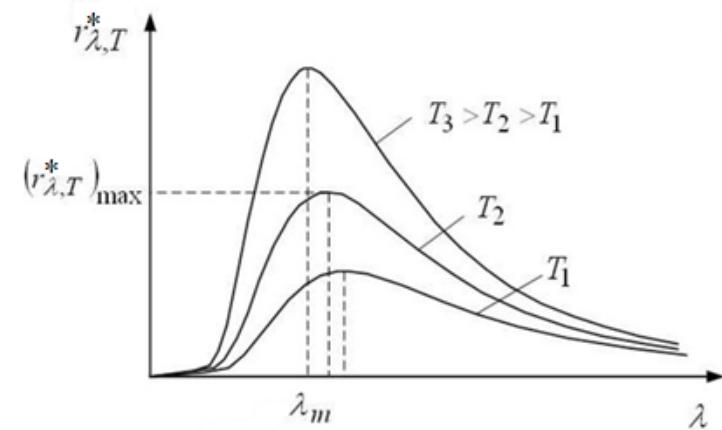
Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Немецкий физик В. Вин (1864—1928), опираясь на законы термо- и электродинамики, установил зависимость длины волны λ_{\max} , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}^*$, от температуры T :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

т. е. длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности излучательности (энергетической светимости) $r_{\lambda,T}^*$ абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре, $b=2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К — постоянная Вина.

Из выражения для λ_{\max} видно, что максимум функции $r_{\lambda,T}^*$ при возрастании температуры смещается в область коротких длин волн, поэтому его называют **законом смещения Вина**.



Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Далее Вин доказал, что

максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости черного тела пропорционально пятой степени абсолютной температуры:

$$\left(r_{\lambda,T}^* \right)_{\max} = b' T^5 \quad \text{- второй закон Вина}$$

$$b' = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5}.$$

Несмотря на то, что законы Стефана —Больцмана и Вина играют в теории теплового излучения важную роль, они являются частными законами, так как не дают общей картины распределения энергии по длинам волн при различных температурах.

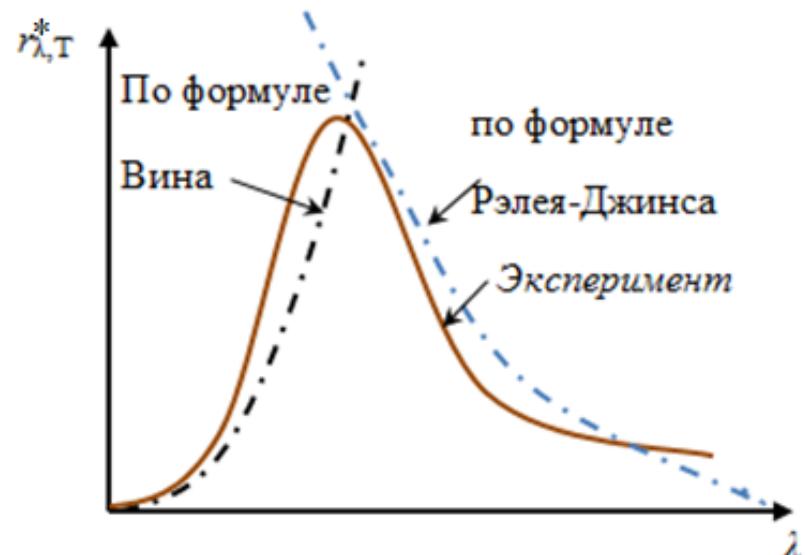
Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Следующая попытка получить выражение для функции Кирхгофа была сделана Д. Рэлеем и Д. Джинсом (1900 г.). Опираясь на классическую теорию электромагнетизма и классическую статистическую физику, Д. Рэлей и Д. Джинс получили для спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела выражение:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT,$$

называемое **формулой Рэлея - Джинса**.

Её анализ показывает, что она согласуется с экспериментом только в области больших длин волн



Кроме того, формула Рэлея -Джинса противоречит законам смещения Вина и Стефана –Больцмана.

Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Согласно формуле Рэлея-Джинса спектральная плотность излучательности монотонно возрастает при уменьшении длины волны, не достигая максимума, а R_T^* стремится к бесконечности при любой температуре:

$$R_T^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^* d\lambda = 2\pi c k T \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{\lambda^4} = \left\{ \left| \frac{d\lambda}{d\nu} \right| = \frac{\lambda^2}{c} \right\} = \frac{2\pi k T}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

Отсюда вывод: последовательное применение законов классической физики при изучении спектра теплового излучения абсолютно черного тела приводит к абсурдным результатам, противоречащим закону сохранения энергии.

Невозможность получения методами классической физики выражения для функции Кирхгофа, которое находилось бы в хорошем согласии с экспериментом в коротковолновой области спектра, получила название **ультрафиолетовой катастрофы**.

Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Выражение для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, согласующееся с опытными данными, было найдено в 1900 г. немецким физиком М. Планком.

М. Планк выдвинул гипотезу, согласно которой испускание энергии веществом не происходит непрерывно, как предполагается в классической физике, а дискретно, в виде отдельных порций энергии - **квантов**.

Согласно выдвинутой Планком **квантовой гипотезе, абсолютно черное тело можно представить как совокупность осцилляторов (атомов, молекул и т.д.), испускающих равновесное тепловое излучение, энергия которых кратна минимальной величине $\varepsilon_0 = h\nu$, называемой квантом энергии;**
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν - собственная частота осциллятора.

Таким образом, энергия осциллятора может принимать значения:

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_0 = nh\nu, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

Элементы квантовой оптики Законы теплового излучения

Используя статистические методы, разработанные Больцманом, Планк получил формулу для средней энергии осциллятора

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

В таком случае спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела равна:

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Это формула Планка для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела.

Законы Стефана - Больцмана, Вина и формула Рэлея - Джинса - её частные случаи.

Формула Планка является полным решением основной задачи теплового излучения, поставленной Кирхгофом. Ее решение стало возможным лишь благодаря революционной квантовой гипотезе Планка.

Элементы квантовой оптики

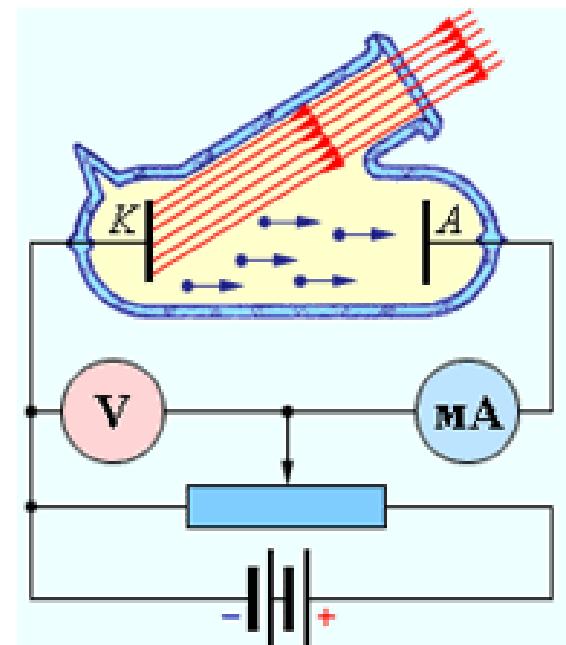
Фотоэлектрический эффект

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения абсолютно черного тела, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэлектрического эффекта.

Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

Это явление было обнаружено Г. Герцем в 1887 г. , наблюдавшим усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовым излучением.

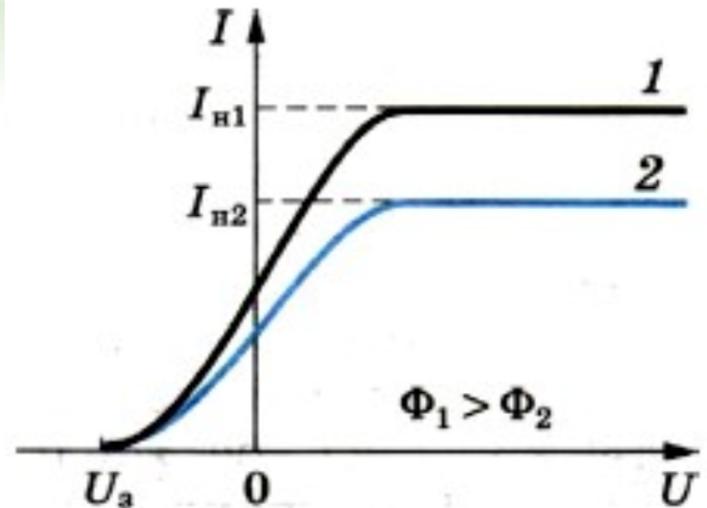
Первые фундаментальные исследования фотоэффекта были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым.



Элементы квантовой оптики

Фотоэлектрический эффект

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов для различных частот падающего на катод излучения и различных энергетических освещенностях катода и обобщении полученных данных были установлены следующие законы фотоэффекта.



- При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода).
- Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой V , и линейно возрастает с увеличением частоты.

Элементы квантовой оптики

Фотоэлектрический эффект

- Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота V_0 (максимальная длина волны) света, зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности, при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.
- Фотоэлектрический эффект безынерционен.

Законы фотоэффекта необъяснимы с точки зрения волновой теории света.

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта.

Согласно Эйнштейну, свет частотой V не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\varepsilon_0 = hV$.

Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью света в вакууме.

Элементы квантовой оптики Фотоэлектрический эффект

Эти кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv_{\max}^2}{2}$.

$$\text{По закону сохранения энергии, } h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Это уравнение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**, которое объясняет рассмотренные законы.

Элементы квантовой оптики

Масса и импульс фотона. Давление света

Как было отмечено ранее, энергия светового кванта $\mathcal{E}_0 = h\nu$.

Следовательно, энергия фотона равна:

$$\mathcal{E}_f = h\nu.$$

Массу фотона можно найти, пользуясь законом взаимосвязи массы и энергии ($E = mc^2$):

$$m_f = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Фотон - элементарная частица, которая всегда движется со скоростью света в вакууме и имеет массу покоя, равную нулю.

Импульс фотона $p_f = \frac{\mathcal{E}_f}{c} = \frac{h\nu}{c}$.

Таким образом, **фотон, как и любая другая частица, характеризуется энергией, массой и импульсом.**

Данные выражения связывают корпускулярные характеристики фотона (массу, импульс и энергию) с волновой характеристикой света — его частотой ν .

Элементы квантовой оптики

Масса и импульс фотона. Давление света

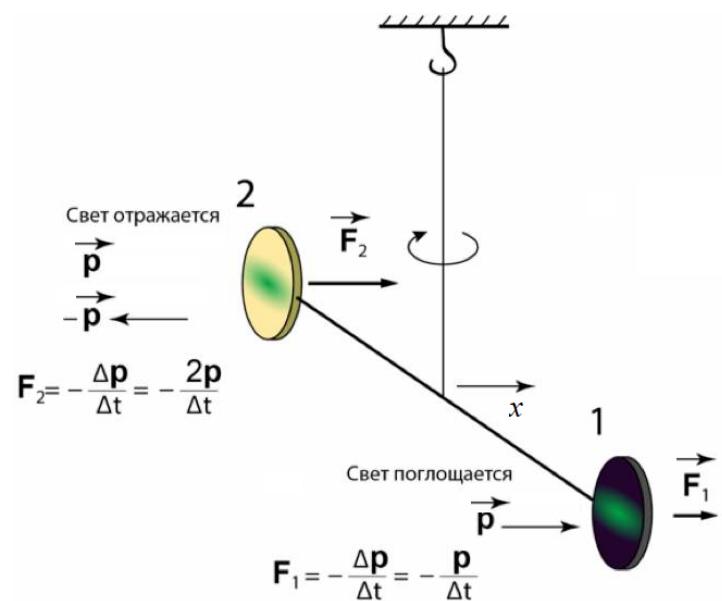
Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. С точки зрения квантовой теории, давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения ρ света от поверхности тела ρN фотонов отразится, а $(1-\rho)N$ — поглотится.

Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс $p_f = \frac{h\nu}{c}$,

а каждый отраженный $2p_f = \frac{2h\nu}{c}$,

т.к импульс отраженного фотона равен $-p_f$.



Элементы квантовой оптики

Масса и импульс фотона. Давление света

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности в 1 с N фотонов:

$$P = 2p_f(\rho N) + p_f(1 - \rho)N \Rightarrow P = 2p_f\rho N + p_f - p_f\rho N \Rightarrow$$
$$P = p_f N(1 + \rho) = \frac{h\nu N}{c}(1 + \rho).$$

$Nh\nu = E_e$ - это энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т. е. энергетическая освещенность поверхности.

$$P = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho),$$

где $\frac{E_e}{c} = \omega$ — объемная плотность энергии излучения.

Формула давления света, выведенная на основе квантовых представлений, совпадает с выражением, полученным, исходя из электромагнитной (волновой) теории Максвелла.

Таким образом, давление света одинаково успешно объясняется и волновой, и квантовой теориями.

Элементы квантовой оптики
Масса и импульс фотона. Давление света