

# 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)  $\Phi$**  - 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:

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

- ✓ 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  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , то  $d\nu = d(c \cdot \lambda^{-1}) = -c \cdot \lambda^{-2} \cdot d\lambda \Rightarrow d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ ,

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

Таким образом,

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

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

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

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

## Элементы квантовой оптики

### Тепловое излучение и его характеристики

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

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dW_{\lambda,T}^{ногл}}{dW_{\lambda,T}^{над}}.$$

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

$$\alpha_{\lambda,T} = 1 \text{ — абсолютно черное тело;}$$

$$\alpha_{\lambda,T} = 0 \text{ — белое тело;}$$

$$0 < \alpha_{\lambda,T} < 1 \text{ — серое тело.}$$

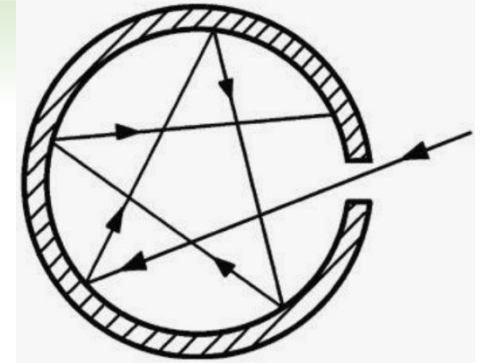
Понятие абсолютно черного тела было введено Кирхгофом (1862). В природе, однако, нет абсолютно черных тел. Хорошим приближением к такому телу является сажа, которая поглощает 99% падающего видимого излучения.

## 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 поглотительности  $\alpha_{\lambda,T}$  тела не зависит от его природы, а зависит только от длины волны  $\lambda$  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:

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

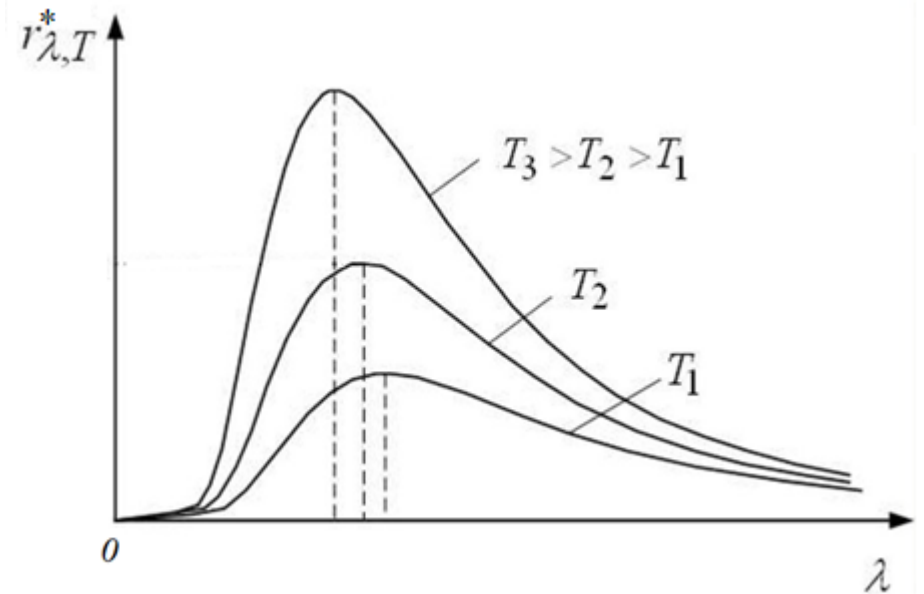
Итак, отношение спектральной плотности излучательности  $r_{\lambda,T}$  к спектральной плотности поглотительности  $\alpha_{\lambda,T}$  одинаково для всех тел с одинаковой температурой, независимо от их природы, и равно спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела  $r_{\lambda,T}^*$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

## Элементы квантовой оптике

### 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.

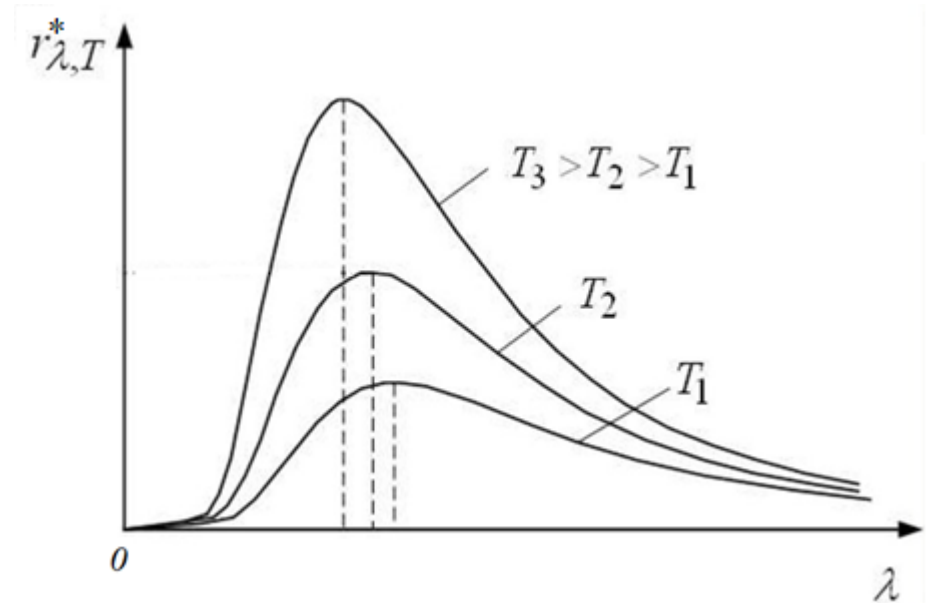


## Элементы квантовой оптики

### Законы теплового излучения

Анализируя изотермы распределения энергии в спектре излучения абсолютного 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 абсолютного 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  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}$  **постоянная Стефана - Больцмана.**

Для реального тело 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

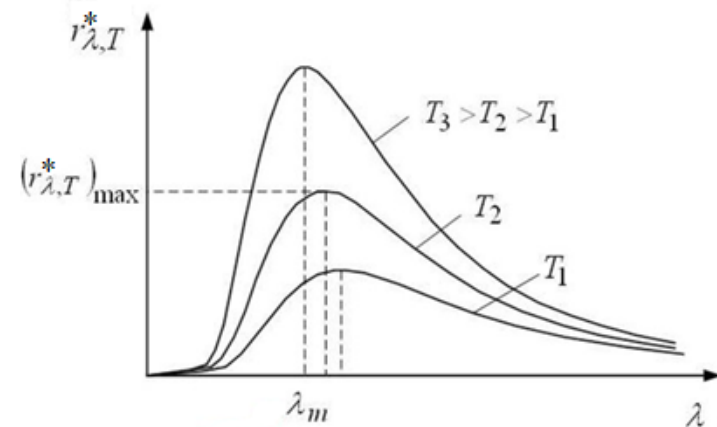
### Законы теплового излучения

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

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

т. е. длина волны  $\lambda_{\max}$ , 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  $\lambda_{\max}$  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

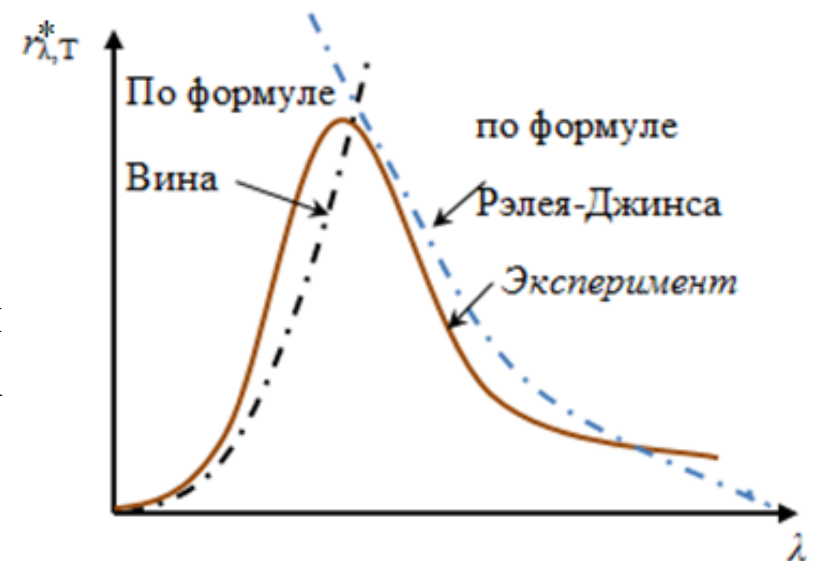
### Законы теплового излучения

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 Рэля - Джинса**.

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



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

## Элементы квантовой оптики

### Законы теплового излучения

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

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

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 порции 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,  $\nu$  - 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 Рэля - 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

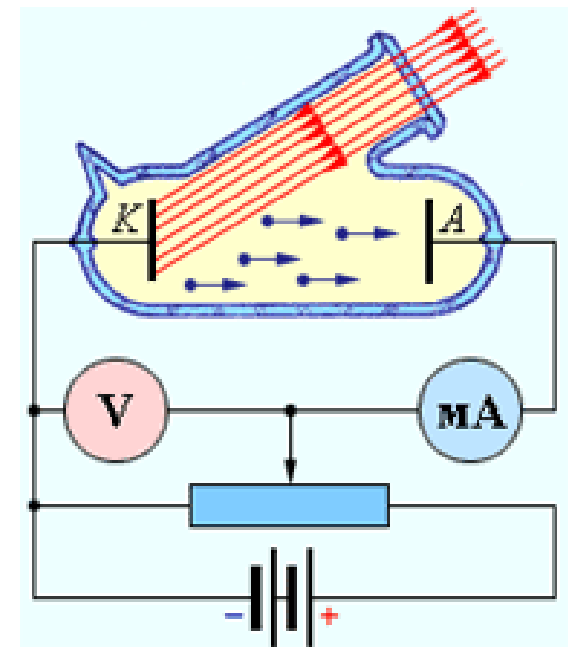
### Фотоэлектрический эффект

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.

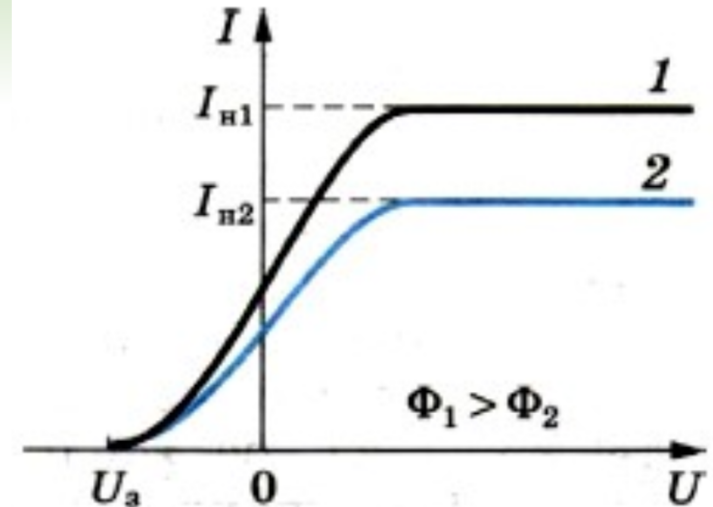
Первые фундаментальные исследования фотоэффекта были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым.



## 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  $\nu$ , и линейно возрастает с увеличением частоты.

## Элементы квантовой оптики

### Фотоэлектрический эффект

- Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота  $\nu_0$  (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  $\nu$  не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых  $\varepsilon_0 = h\nu$ .

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  $\frac{mv_{\max}^2}{2}$ .

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  $\varepsilon_0 = h\nu$ . Следовательно, энергия фотона равна:

$$\varepsilon_f = h\nu.$$

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  $p_f = \frac{\varepsilon_f}{c} = \frac{h\nu}{c}$ .

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  $\nu$ .

## Элементы квантовой оптики

### Масса и импульс фотона. Давление света

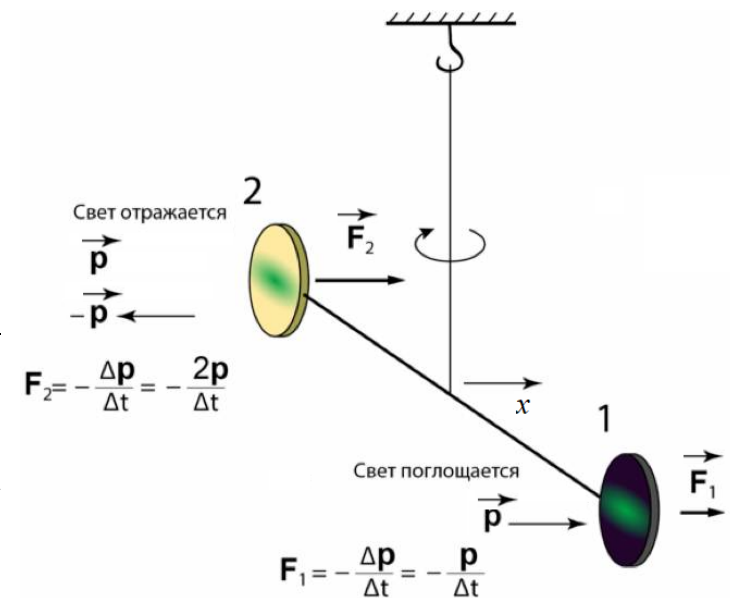
Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. С точки зрения квантовой теории, давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает  $N$  фотонов, то при коэффициенте отражения  $\rho$  света от поверхности тела  $\rho N$  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.