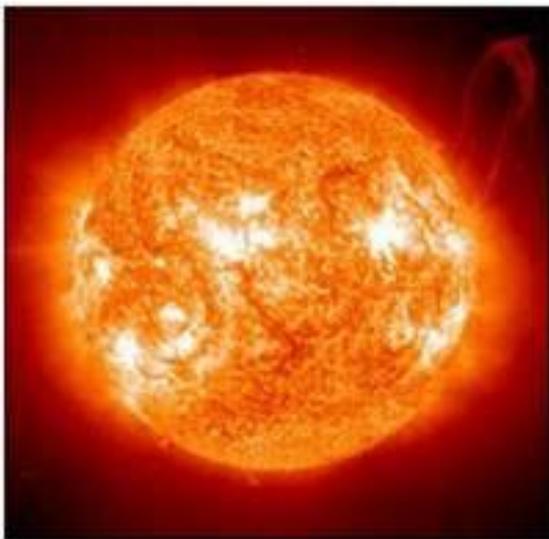


# Тепловое излучение и его характеристики



# Тепловое излучение



Испускание электромагнитных волн нагретыми телами за счет внутренней энергии (тепловой) энергии.

**Тепловое излучение** – процесс обратимый, равновесный, подчиняется законам термодинамики.

**Тепловое излучение** – следствие теплового движения частиц, присуще всем телам, интенсивность излучения зависит от температуры.

Все остальные виды свечения тел, возбуждаемые за счет любых других видов энергии, кроме тепловой энергии.

Например: **люминесценция** (энергия хим. реакций), **электролюминесценция** (электрический разряд в газах), **катодолюминесценция** (бомбардировка частицами), **фотолюминесценция** (под действием света).

# Тепловое излучение

## Характеристики теплового излучения

1) Энергетическая светимость (интегральная излучательная способность тела)

$$R_{\varepsilon}$$

$$R_{\varepsilon} = \frac{dW_{\text{изл}}}{dS \cdot dt}, \quad [R_{\varepsilon}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Полная мощность теплового излучения или энергия, испускаемая единицей поверхности тела во всех направлениях в единицу времени на всех частотах.

$W_{\text{изл}}$  - энергия, испускаемая всей поверхностью тела за определенный промежуток времени.

2) Испускательная способность (спектральная плотность энергетической светимости)

$$r_{\nu, T}$$

Мощность теплового излучения (энергия, излучаемая в единицу времени) с единицы поверхности тела по всем направлениям в узком интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

# Тепловое излучение

$$r_{\nu,T} = \frac{dW_{\text{изл}}}{S \cdot dt \cdot d\nu}, \quad [r_{\nu,T}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$$

Энергетическая светимость связана с испускательной способностью соотношением:

$$R_{\nu} = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$$

3) Поглощательная способность (коэффициент монохроматического поглощения)

$$a_{\nu,T}$$

$$a_{\nu,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}$$

- безразмерная величина

Отношение поглощенной энергии в интервале частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$  к общему количеству энергии падающего излучения в том же интервале частот.

# Тепловое излучение

Испускательная и поглощательная способности зависят от частоты излучаемых и поглощаемых волн, температуры тела, его химического состава и состояния поверхности. Все тела частично поглощают и частично отражают падающее на них излучение.

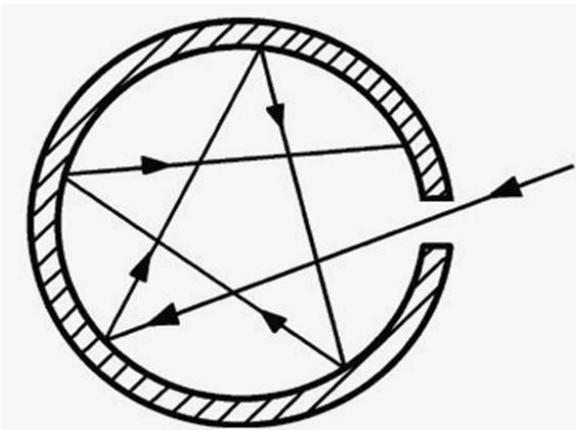
**Абсолютно черное тело (АЧТ)** – тело, которое полностью поглощает всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их частоты.

Абсолютно черное тело не отражает свет.

$$a_{\nu, T} = 1$$

Примеры в области видимого света: сажа, черный бархат.

**Модель АЧТ:** отверстие в непрозрачной стенке замкнутой полости.



Свет, попадающий сквозь отверстие в полость, испытывает многократные отражения и поглощается.

Модель тем лучше, чем больше отношение площади внутренней поверхности полости к площади отверстия.

Пример: окна домов.

# Тепловое излучение

Спектр излучения АЧТ определяется только его температурой.

**Серое тело** - тело, поглощательная способность которого меньше единицы, т.е. часть падающего излучения поглощается телом, оставшаяся часть – отражается.

$$a_{\nu, T} < 1$$

## Законы теплового излучения

### 1) Закон Кирхгофа

1859 г.

Отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры, одинаковой для всех тел.

$$\left( \frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} \right)_{\text{тело1}} = \left( \frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} \right)_{\text{тело2}} = \dots = f(\nu, T)$$

↙  
функция Кирхгофа

# Законы теплового излучения

$$\left( \frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} \right)_{\text{тело1}} = \left( \frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} \right)_{\text{тело2}} = \dots = f(\nu, T) = r_{\nu, T}^{\text{АЧТ}}$$

## 2) Закон Стефана-Больцмана

1879 г.

Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

$$R_{\nu} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

const Стефана-Больцмана

## 3) Закон смещения Вина

1893 г.

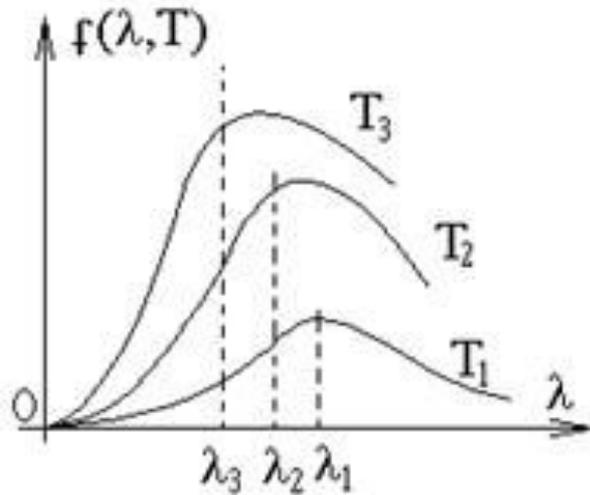
Длина волны, на которую приходится максимальная доля энергии излучения, обратна пропорциональна температуре тела.

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,9 \text{ К} \cdot \text{м}$$

const Вина

# Законы теплового излучения



С ростом температуры максимум энергии излучения смещается в область коротких длин волн.

## 4) Второй закон Вина

1896 г.

Максимальная испускательная способность АЧТ пропорциональна пятой степени его абсолютной температуры.

$$\left(r_{\nu, T}\right)_{\max} = c \cdot T^5$$

$$c = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^5}$$

const Вина

# Тепловое излучение

## Формула Рэля-Джинса Формула Планка

Рэлей и Джинс, исходя из теоремы клас. статистической механики о равномерном распределении энергии по степеням свободы, приписали каждому электромагнитному колебанию энергию, равную  $kT$  и получили выражение для испускательной способности абсолютно черного тела, которое называют **формулой Рэля-Джинса**:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

где  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\langle \varepsilon \rangle$  - средняя энергия осциллятора.

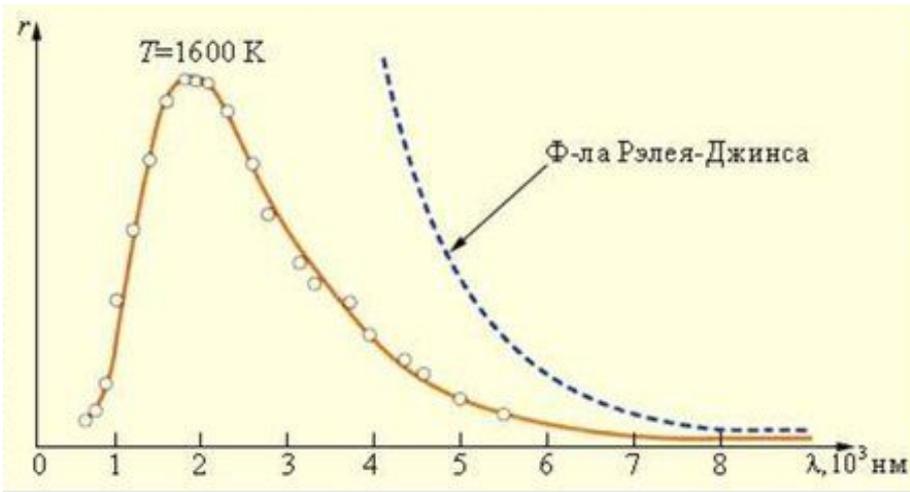


Джон Уильям Стретт Рэлей (1842–1919), английский физик



Джеймс Хопвуд Джинс (1877–1946), английский математик, физик и астроном

# Тепловое излучение



Формула Рэлея-Джинса удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при больших длинах волн и резко расходится с опытом при малых длинах волн (ультрафиолетовая часть спектра).

Попытка получить закон Стефана-Больцмана из ф-лы Рэлея-Джинса приводит к абсурду:

$$R_{\nu} = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

$$R_{\nu} = \sigma T^4 \quad \text{- закон Стефана-Больцмана}$$

Этот результат получил название **«ультрафиолетовой катастрофы»**.

# Тепловое излучение

## Квантовая гипотеза Планка

Планк выбрал наиболее простую модель излучающей системы – совокупность гармонических осцилляторов – атомов с различными собственными частотами. Планк предположил, что энергия осциллятора не может принимать значение, меньшее некоторой минимальной величины  $\varepsilon$ , а любое другое значение энергии осциллятора кратно  $\varepsilon$ .

- Энергия излучения и его частота связаны друг с другом.
- Излучение электромагнитных волн атомами и молекулами происходит дискретно, т.е. отдельными порциями – квантами.
- Энергия излучения кванта прямо пропорциональна частоте излучения.

$$\varepsilon = h\nu \quad \text{- энергия кванта}$$

где  $h$  – const Планка.

Средняя энергия квантового осциллятора:

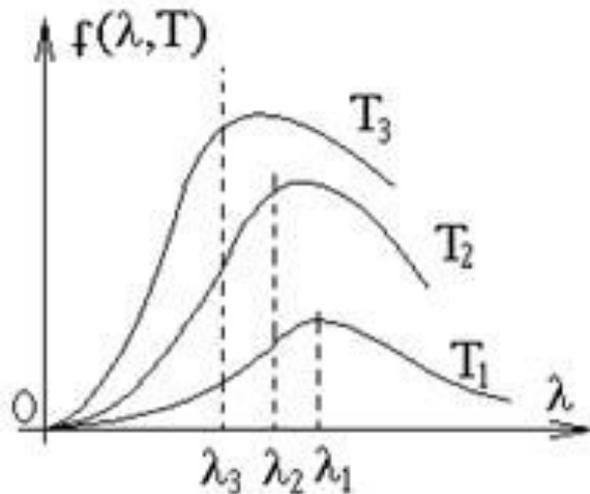
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

# Тепловое излучение

Формула Планка для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при любых частотах:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Формула Планка прекрасно согласуется с экспериментальными данными во всем диапазоне частот.



На основе формулы Планка были объяснены все экспериментальные законы теплового излучения, в частности, законы Стефана-Больцмана и Вина.

В области малых частот формула Планка переходит в формулу Рэля-Джинса.

Выдвижение квантовой гипотезы Планка считается моментом рождения квантовой механики.

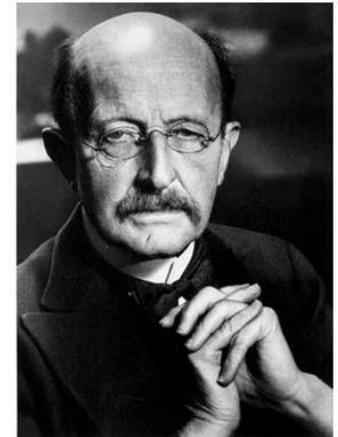
# Тепловое излучение

## Значение гипотезы Планка

1. Было найдено объяснение теплового излучения нагретых тел.
2. Продолжается развитие квантовой теории.

**Вывод:** классические законы не применимы к микроскопическим системам.

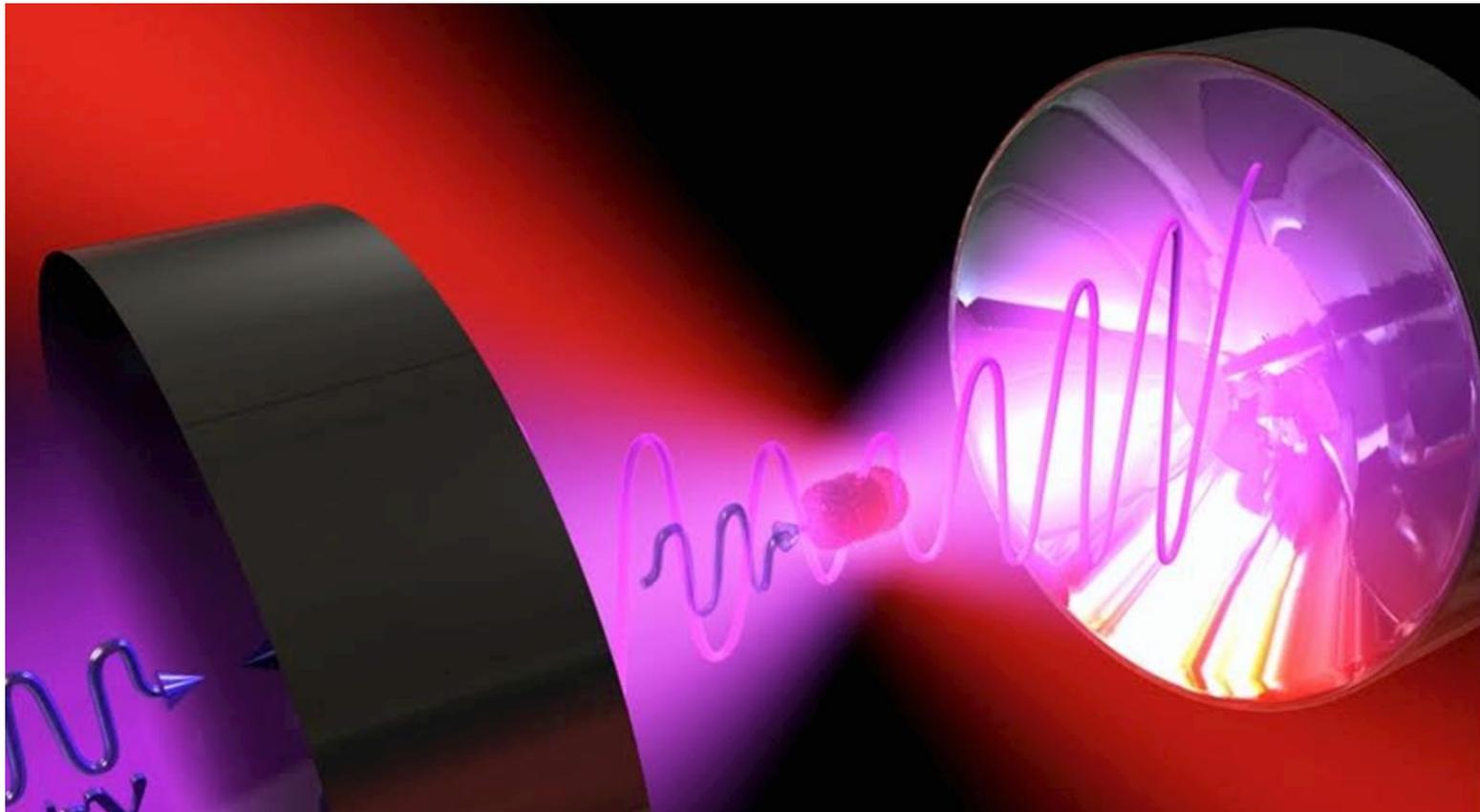
В 1918 году Планк был удостоен Нобелевской премии за открытие квантов энергии.



Макс Планк  
(1858—1947)

# Фотоэффект

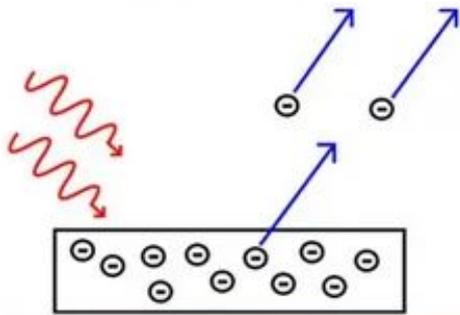
## Виды фотоэффекта



# Фотоэффект



**1. Внешний фотоэффект** – явление вырывания электронов из твердых и жидких веществ под действием света.



Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте называются фотоэлектронами.

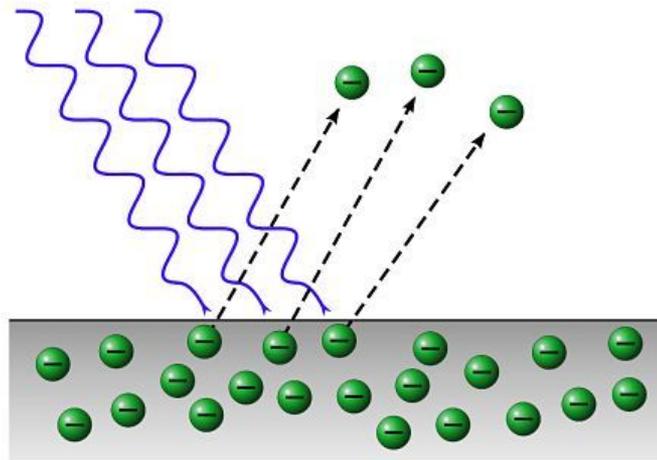
**2. Внутренний фотоэффект** – явление образования электронно-дырочных пар в полупроводниках и диэлектриках под действием света, приводящее к увеличению электропроводимости.

# Фотоэффект

**3. Вентильный фотоэффект** (разновидность внутреннего фотоэффекта) – возникновение фотоэдс при освещении контакта 2-х разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего эл. поля).

Открывает пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую. Применение: солнечные батареи, фотоэлементы, датчики, регистрирующие уровень освещенности.

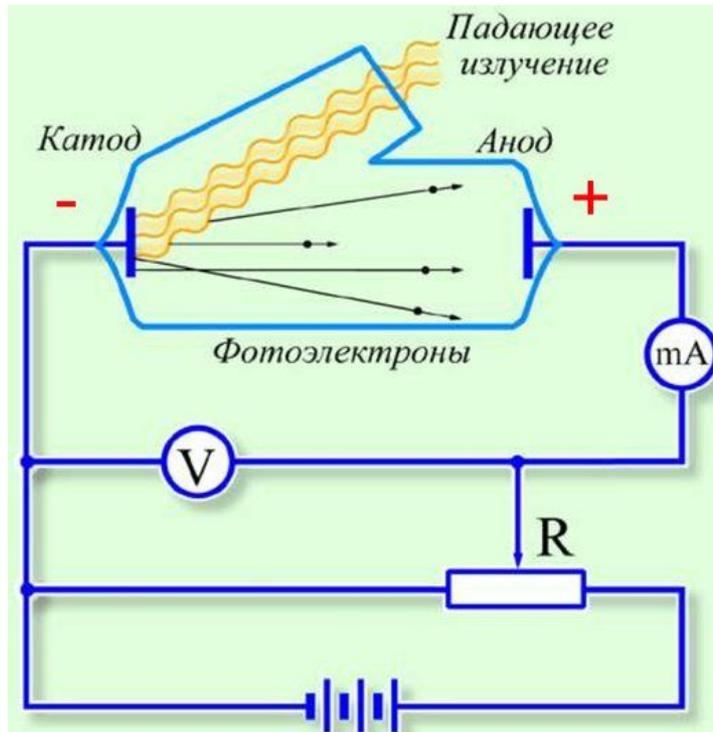
**4. Многофотонный фотоэффект** возможен, если интенсивность света очень большая (лазерные пучки). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.



# Фотоэффект

Внешний фотоэффект использовался в опытах Гальвакса и Столетова (1888г.).

## Схема опыта Столетова



Электроды помещают в вакуумный сосуд: катод из исследуемого материала и анод – металлическая сетка. Катод через кварцевое окошко освещается монохроматическим светом, напряжение между электродами изменяется с помощью потенциометра. Вылетевшие из катода в результате фотоэффекта электроны достигают анода, возникает фототок, который регистрируется миллиамперметром.

Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил следующие закономерности:

1) Наиболее эффективное действие оказывает УФ излучение,

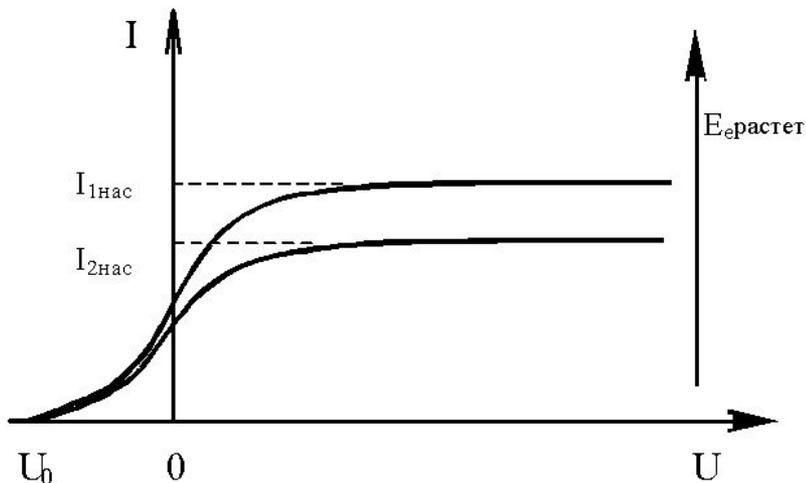
# Фотоэффект

- 2) Под действием света вещество теряет только отрицательные заряды,
- 3) Сила тока, возникшая под действием света, пропорциональна его интенсивности.

$$J \propto I$$

Явление внешнего фотоэффекта зависит не только от химической природы металла, но и от состояния его поверхности. Даже ничтожное загрязнение поверхности существенно влияет на эмиссию электронов под действием света. Поэтому для изучения фотоэффекта пользуются вакуумной трубкой.

**Вольтамперная характеристика фотоэффекта** – зависимость фототока, образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения между электродами.



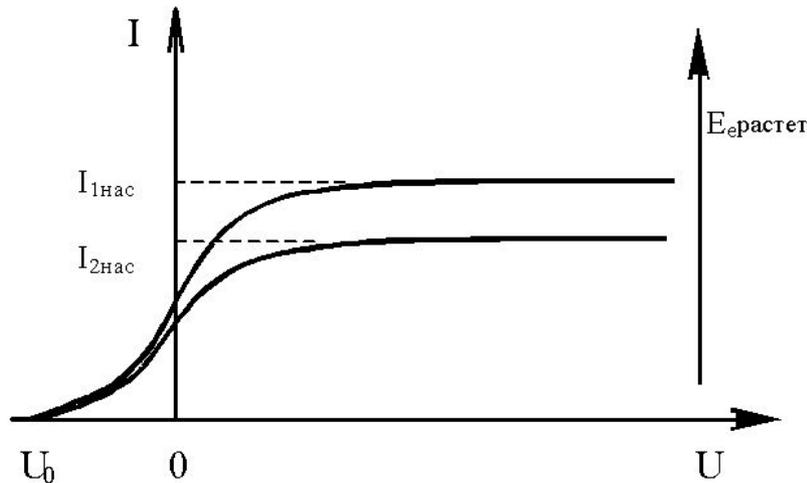
Данная  $I(U)$  соответствует 2-м различным освещенностям катода ( $\nu_1 = \nu_2$ ).

$E$  – энергетическая освещенность катода

$U$  – напряжение между электродами

$\nu$  – частота света

# Фотоэффект



$E$  – энергетическая освещенность катода (величина энергии излучения, падающей на единицу поверхности в единицу времени):

$$E = \frac{dW}{dS \cdot dt}$$

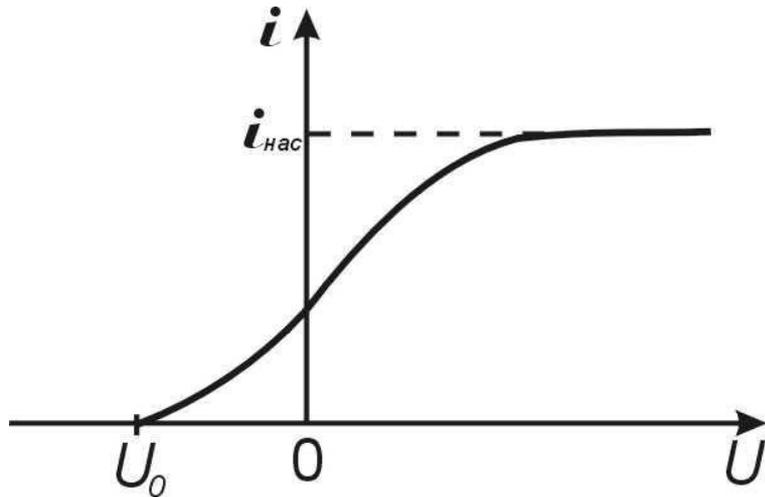
По мере увеличения напряжения фототок возрастает, т.е. все большее число фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривых показывает, что электроны вылетают из катода с разными скоростями.

Максимальное значение тока  $I_{нас}$  - фототок насыщения определяется таким значением напряжения, при котором все электроны испускаемые катодом достигают анода:

$$I_{нас} = e \cdot N$$

$N$  – число электронов, испускаемых катодом в 1 с.

# Фотоэффект



Из вольтамперной характеристики следует, что при  $U=0$  фототок не исчезает. След-но, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой нач. скоростью, а значит и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля.

Для того, чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение  $U_0$ . При  $U = U_0$  ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью, не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода.

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = e \cdot U_0$$

Таким образом, измерив задерживающее напряжение  $U_0$ , можно определить максимальные значения скорости и кин. энергии фотоэлектронов.

# Фотоэффект

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = e \cdot U_0 \quad \rightarrow \quad V_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$$

максимальная скорость фотоэлектронов

## Законы внешнего фотоэффекта

1) При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

$$N \propto I$$

Фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности катода.

$$I_{\phi}^{\text{нас}} \propto E$$

2) Максимальная нач. скорость (максимальная нач. кин. энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой (линейно возрастает с увеличением частоты).

$$V_{\max} = f(\nu) \quad V_{\max} \neq f(E)$$

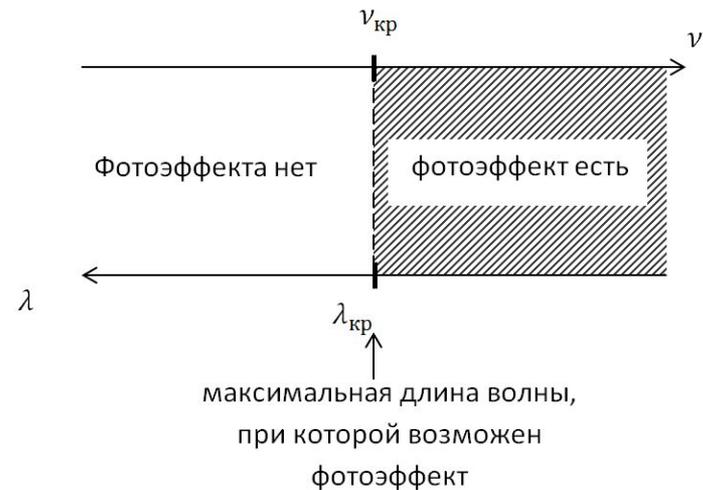
# Фотоэффект

3) Для каждого вещества существует **красная (длинноволновая) граница фотоэффекта**, т.е. максимальная длина волны излучения  $\lambda_{кр}$  или минимальная частота света  $\nu_{min}$  (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

## Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Внешний фотоэффект состоит из 3-х процессов:

- 1) **поглощения** энергии фотона электроном,
- 2) **движения** электрона к поверхности, при этом часть энергии рассеивается,
- 3) **выхода** электрона из металла.



$$h\nu = A_{вых} + \frac{mV^2}{2}$$

# Фотоэффект

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

- уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

энергия фотона

работа выхода электрона из металла

кинетическая энергия фотоэлектрона

Свет не только излучается, но и поглощается порциями!!!

Энергия кванта (порция) света

$$E = h\nu$$

Энергия фотона  $h\nu$  поглощается электроном проводимости, расходуется на преодоление поверхностной разности потенциалов ( $A_{\text{вых}}$ ), избыток энергии остается в виде кинетической энергии.

Если  $E < A$ , то фотоэффект отсутствует.

Если  $E > A$ , то ее избыток после поглощения фотона идет на начальную кинетическую энергию фотоэлектрона.

# Фотоэффект

Уравнение Эйнштейна объясняет законы Столетова.

$$h\nu = A_{\text{выл}} + \frac{mV^2}{2}$$

1)  $E_{\text{кин}}$  фотоэлектрона возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности.

2) необходимое условие фотоэффекта:  $h\nu \geq A_{\text{выл}}$

Красная граница фотоэффекта  $\nu_{\text{гр}} = A_{\text{выл}} / h$

Если  $\begin{cases} \lambda > \lambda_{\text{max}} \\ \nu < \nu_{\text{min}} \end{cases}$ , то фотоэффект не наступает.

Красная граница фотоэффекта -

$$\begin{cases} \nu_{\text{min}} = \frac{c}{\lambda_{\text{max}}} \\ \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{выл}}} \end{cases}$$

# Фотоэффект

3) Число фотонов пропорционально числу фотоэлектронов, т.е. пропорционально освещенности.

$$n = \frac{E}{h\nu}$$

**Многофотонный фотоэффект**  
(наблюдается в лазерных пучках света)

Электрон одновременно может получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов

$$Nh\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

Красная граница смещается в область более коротких частот.

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{Nh}$$

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

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{Nhc}{A_{\text{вых}}}$$

# Характеристики фотона

## Масса и импульс фотона

Свет – это поток фотонов – особых частиц, обладающих массой и импульсом.

Согласно теории относительности

$$E = mc^2$$

Энергия фотона  $E = h\nu$  →

Масса фотона находится из закона взаимосвязи массы и энергии:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон не существует в состоянии покоя, поэтому он не имеет массы покоя

$$m_0 = 0$$

Этим фотон отличается от обычных частиц – электронов, протонов, атомов.

Импульс фотона

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

# Характеристики фотона

Корпускулярные характеристики фотона –  $m$ ,  $p$  связаны с важнейшей волновой характеристикой света – частотой.

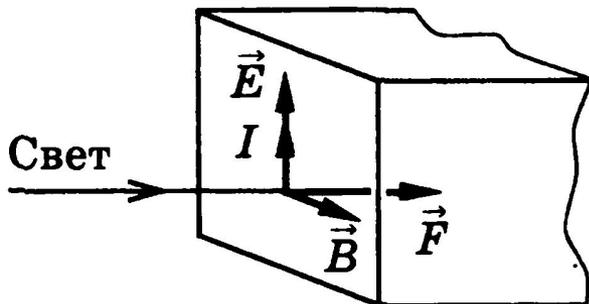
$$E = h\nu \qquad m = \frac{h\nu}{c^2} \qquad p = \frac{h\nu}{c}$$

Вывод: чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее проявляются корпускулярные свойства света.

Двойственность свойств света называют *корпускулярно-волновым дуализмом*.

Экспериментальным подтверждением наличия у фотона массы и импульса является световое давление и эффект Комптона.

## Давление света



Излучение, падающее на поверхность тела оказывает на него давление.

# Давление света

## Объяснение давления света с волновой точки зрения

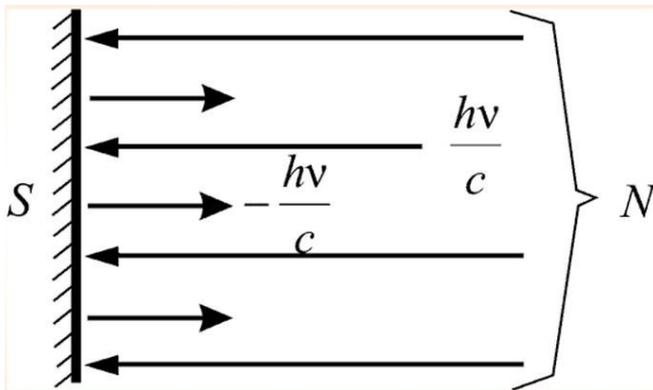
Вектор  $\vec{E}$  волны приводит в упорядоченное движение элементарные заряды в веществе, а магнитное поле  $\vec{H}$  действует на эти заряды с силой Лоренца.

## Объяснение давления света с квантовой точки зрения

Давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

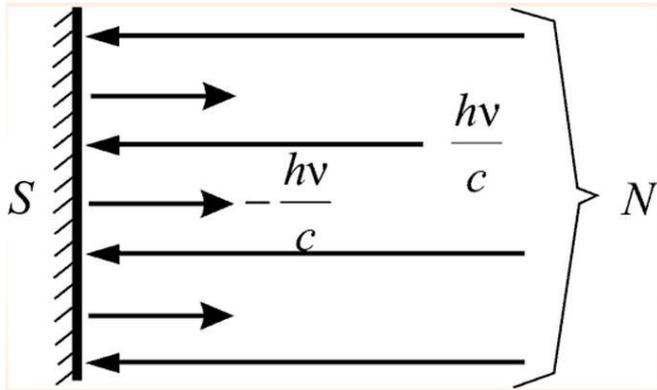
## Расчет величины светового давления

Пусть свет падает по нормали к поверхности, часть квантов отражается, часть – поглощается.



$\rho N$  фотонов отражается  
 $(1 - \rho) N$  фотонов поглощается  
 $\rho$  - коэффициент отражения

# Давление света



Каждый фотон, поглощенный поверхностью, передаст ей импульс

$$p_{\text{погл}} = \frac{h\nu}{c}$$

При отражении фотона его импульс удваивается

$$p_{\text{отр}} = 2 \frac{h\nu}{c}$$

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

$$p = p_{\text{отр}} + p_{\text{погл}} = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho) N = \frac{h\nu}{c} (1 + \rho) N = \frac{I}{c} (1 + \rho)$$

$I = Nh\nu$  - интенсивность света

Выражение, определяющее световое давление, выведенное на основе квантовых представлений, совпадает с результатом, получаемым из волновой теории Максвелла. Т.е. давление света одинаково успешно объясняется и волновой, и квантовой теорией.

## Давление света

Если тело зеркально отражает, то  $\rho = 1 \rightarrow p = \frac{2I}{c}$

Если тело полностью поглощает, то  $\rho = 0 \rightarrow p = \frac{I}{c}$   
(абсолютно черное тело)

Таким образом, световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.

Из этого следует, что световое излучение оказывает давление на материальные предметы, причем величина давления пропорциональна интенсивности излучения.