

# **Тема “ Квантовые свойства света “**

- 1. Законы теплового излучения.**
- 2. Внешний фотоэффект.**
- 3. Квантовая природа света. Фотоны.**
- 4. Эффект Комптона.**

## **Литература**

- 1. Трофимова Т. И. Курс физики. - § 197 – 207.**
- 2. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 5, гл.1, гл.2 [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/708>.**

**Введение.** Электромагнитное излучение во многих природных явлениях проявляет волновые свойства и его можно рассматривать как электромагнитные волны.

Однако, в действительности электромагнитное излучение, и свет в том числе, - это более сложное явление, и при определённых условиях его следует рассматривать как поток особых частиц – квантов или фотонов, не обладающих массой покоя. Как говорят, свет проявляет квантовые (дискретные) свойства.

Квантовые свойства света были обнаружены при изучении теплового излучения нагретых тел и некоторых других явлений.

## Вопрос 1

Электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт энергии теплового движения атомов и молекул вещества (своей внутренней энергии), называется **тепловым**.

**Источники теплового излучения** - любые нагретые тела (лампа накаливания, утюг, печь, паяльник, отопительная батарея, ...)

**Источники нетеплового излучения** - светодиод, лазер, люминесцентная лампа, экран телевизора).

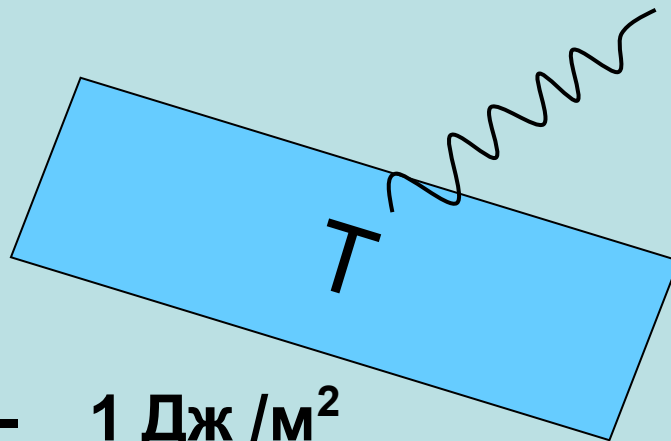
Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром излучения, положение максимума которого зависит от температуры тела.

# Характеристики теплового излучения

**Спектральная плотность энергетической светимости тела  $R_{\nu,T}$**  - величина, равная энергии электромагнитного излучения, испускаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот.

$$R_{\nu,T} = \frac{dW}{d\nu}$$

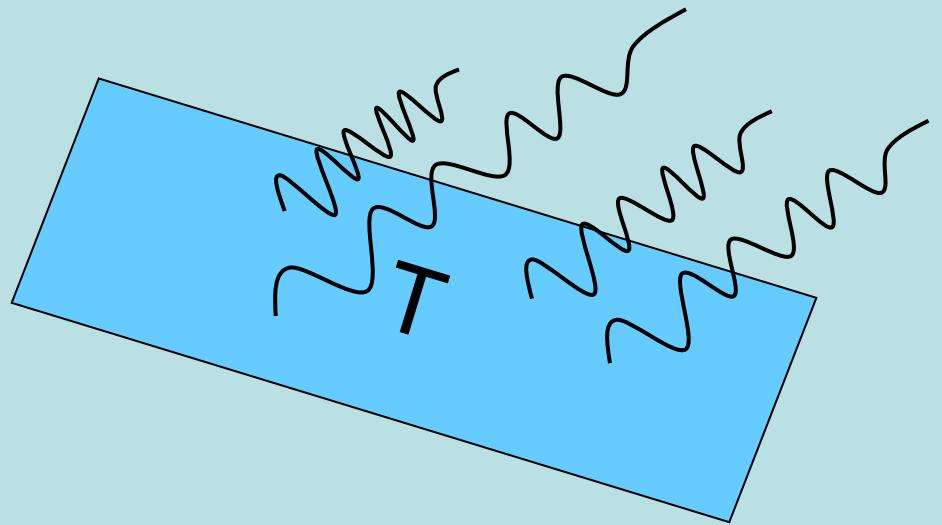
Единица измерения - 1 Дж / м<sup>2</sup>



**Энергетическая светимость  $R_T$**  - величина, равная энергии электромагнитных волн всевозможных частот, излучаемых за единицу времени с единицы площади поверхности тела.

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

Ед. измерения - 1 Вт/м<sup>2</sup>

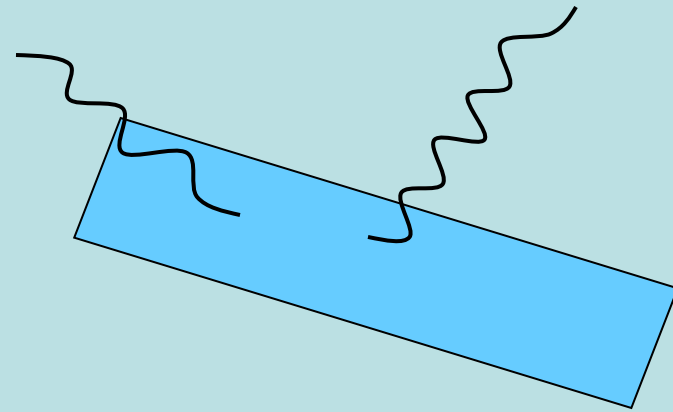


## Спектральная поглощательная способность тела

$A_{\nu, T}$  - величина, показывающая какая доля энергии электромагнитных волн в диапазоне частот от

$\nu$  до  $\nu + d\nu$ , падающих на единицу площади поверхности тела за единицу времени, полностью поглощается этим телом.

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \leq 1$$

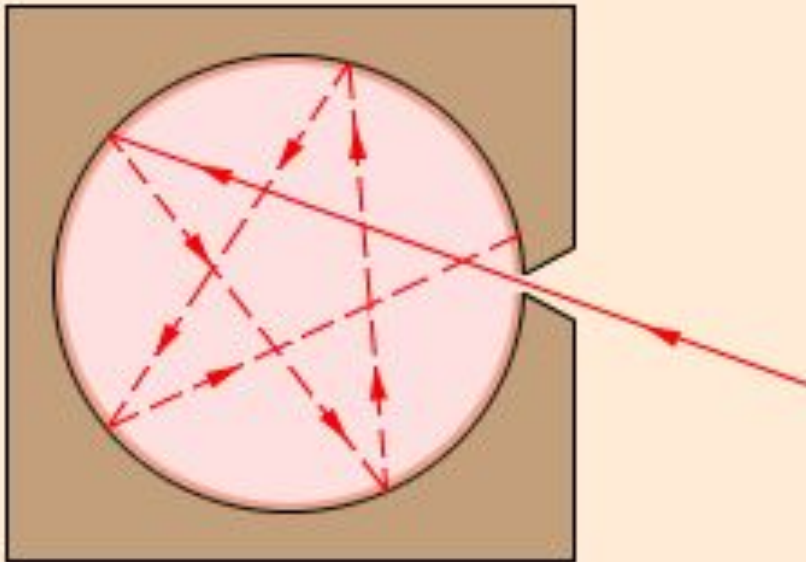


Величины  $R_{\nu, T}$  и  $A_{\nu, T}$  зависят от природы тела, его температуры  $T$  и частоты излучения.

Законы теплового излучения были открыты для абстрактного тела (модели) - абсолютно чёрного тела.

**Абсолютно черное тело** - тело, которое полностью поглощает все падающее на него электромагнитное излучение.

**Модель** – почти замкнутая полость с небольшим отверстием. Для этого тела



$$A(\nu, T) = 1$$

# Законы теплового излучения

**Закон Кирхгофа:** отношение спектральной энергетической светимости к спектральной поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины  $\lambda$ ) волны и температуры.

$$\frac{R(\nu, T)}{A(\nu, T)} = r(\nu, T)$$

$r(\nu, T)$  – *спектральная энергетическая светимость абсолютно чёрного тела*



Это означает, что чёрное тело излучает больше любого нечёрного. Поэтому закопчённый чайник остывает быстрее блестящего.

## Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость  $R_{\varepsilon}$  абсолютно черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени

$$R_{\varepsilon} = \sigma \cdot T^4$$

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

## **Закон смещения Вина**

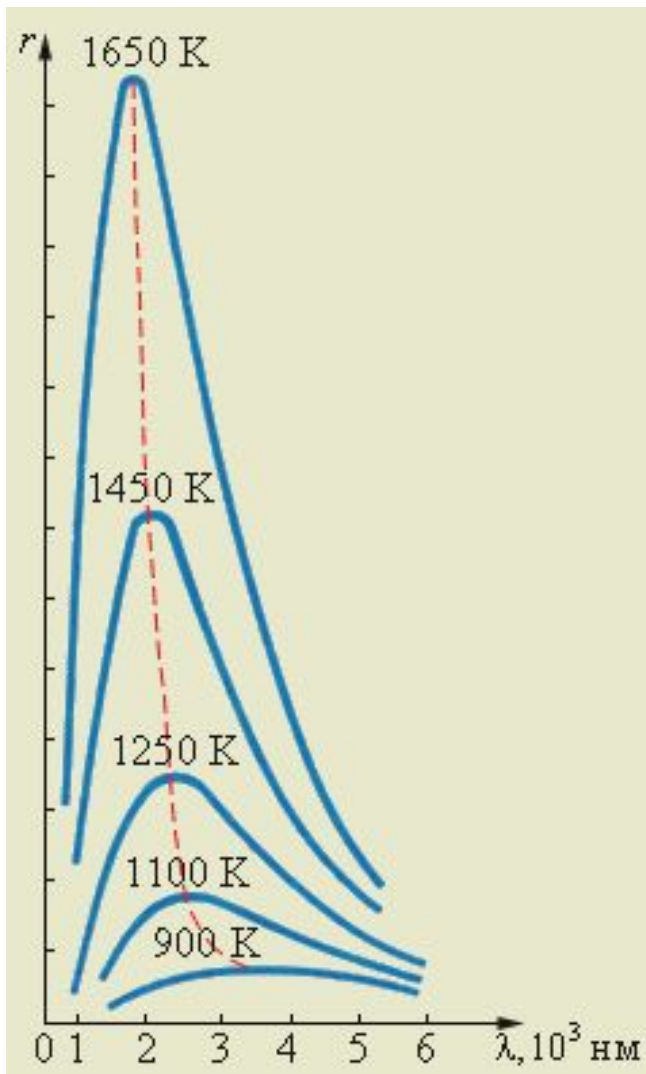
Произведение длины волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум мощности излучения (спектральной энергетической светимости) абсолютно черного тела, на его термодинамическую температуру есть величина постоянная.

$$\lambda_m \cdot T = b$$

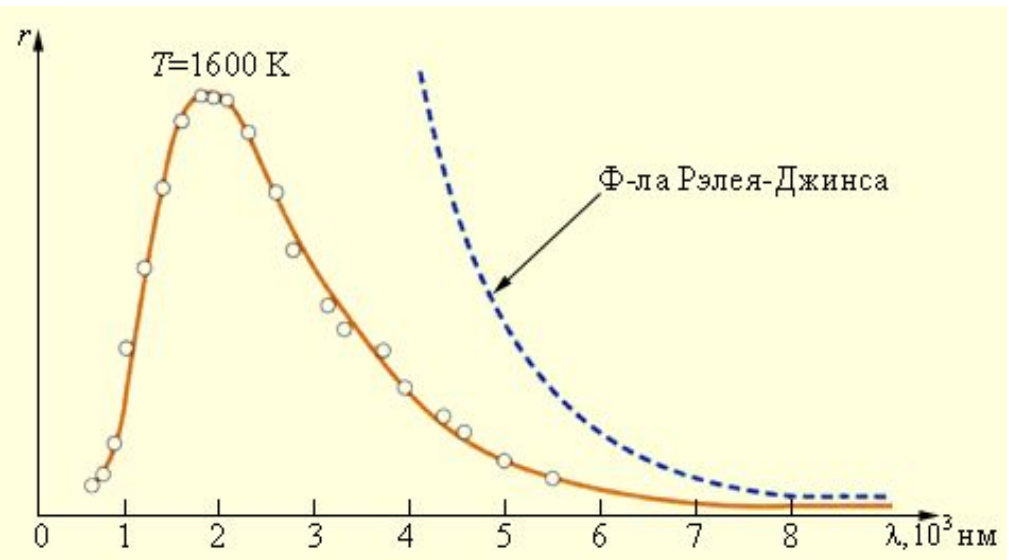
$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

# Спектральное распределение $r(\lambda, T)$ излучения черного тела при различных температурах



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



**Попытки объяснить законы теплового излучения, используя классическую физику, были неудачны. Предлагаемые теории предполагали, что электромагнитная энергия может излучаться непрерывно, в любых количествах.**

**В 1900 г. немецкий учёный Макс Планк выдвинул революционную гипотезу, которая позволила ему объяснить экспериментальные законы и построить квантовую теорию света.**

## *Гипотеза Планка*

Атомные излучатели (осцилляторы) излучают энергию (электромагнитные волны) не непрерывно, а дискретными порциями – квантами.

Энергия кванта электромагнитного излучения пропорциональна излучения.

$$\varepsilon = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad - \text{ постоянная Планка}$$

**Формула Планка, описывающая зависимость мощности излучения абсолютно чёрного тела от частоты и температуры**

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

## **Вопрос 2. Внешний фотоэлектрический эффект**

Другим явлением, которое свидетельствует о квантовых (корпускулярных) свойствах света является внешний фотоэлектрический эффект.

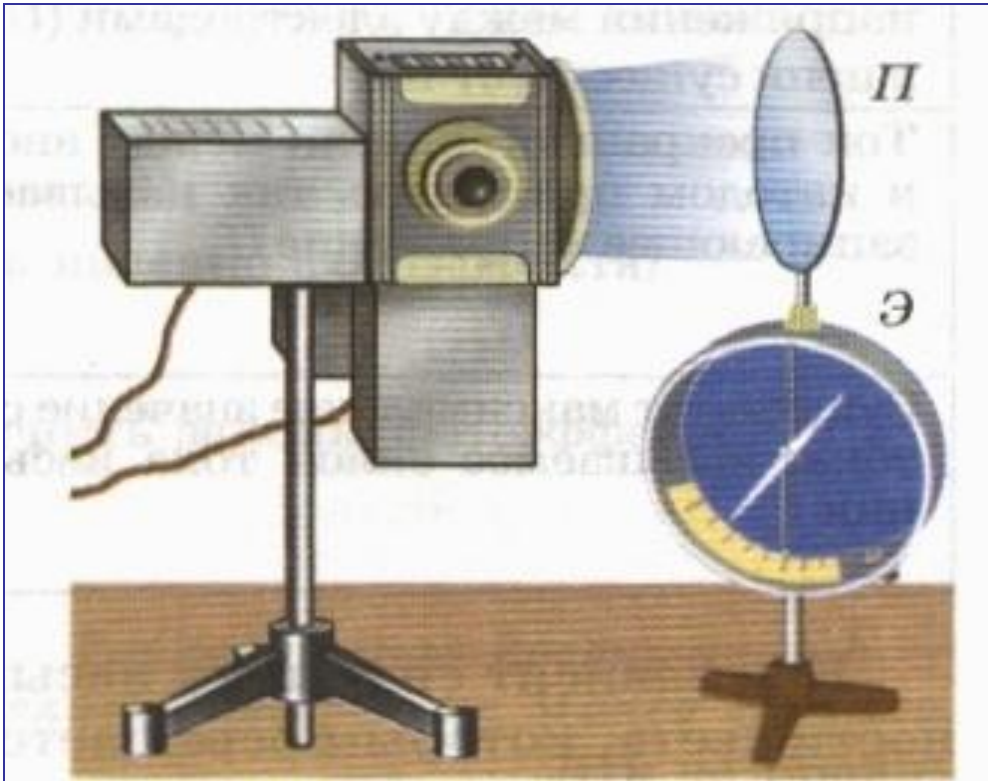
**Внешний фотоэффект** – испускание электронов с поверхности вещества под действием света.

Наблюдается в твердых телах и газах.

Обнаружен в 1887 г. Генрихом Герцем, исследован Столетовым, Ленардом и др.

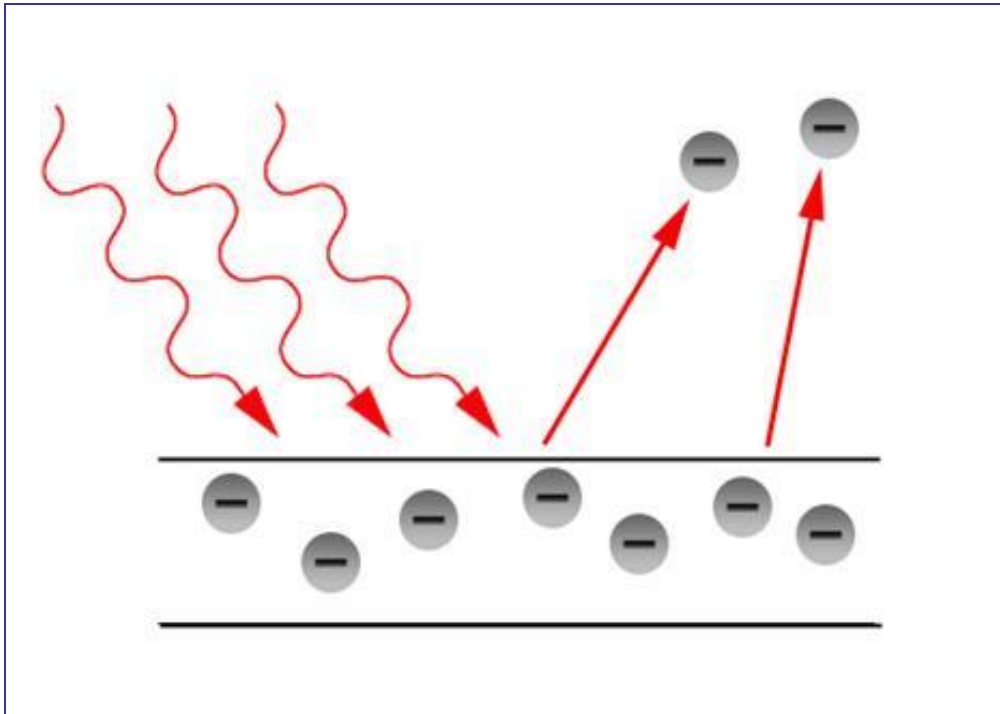
## Обнаружение внешнего фотоэффекта, 1887 г.

Облучение светом электрической дуги (УФ-свет) отрицательно заряженной цинковой пластины приводило к уменьшению заряда пластины. Э-электрометр.

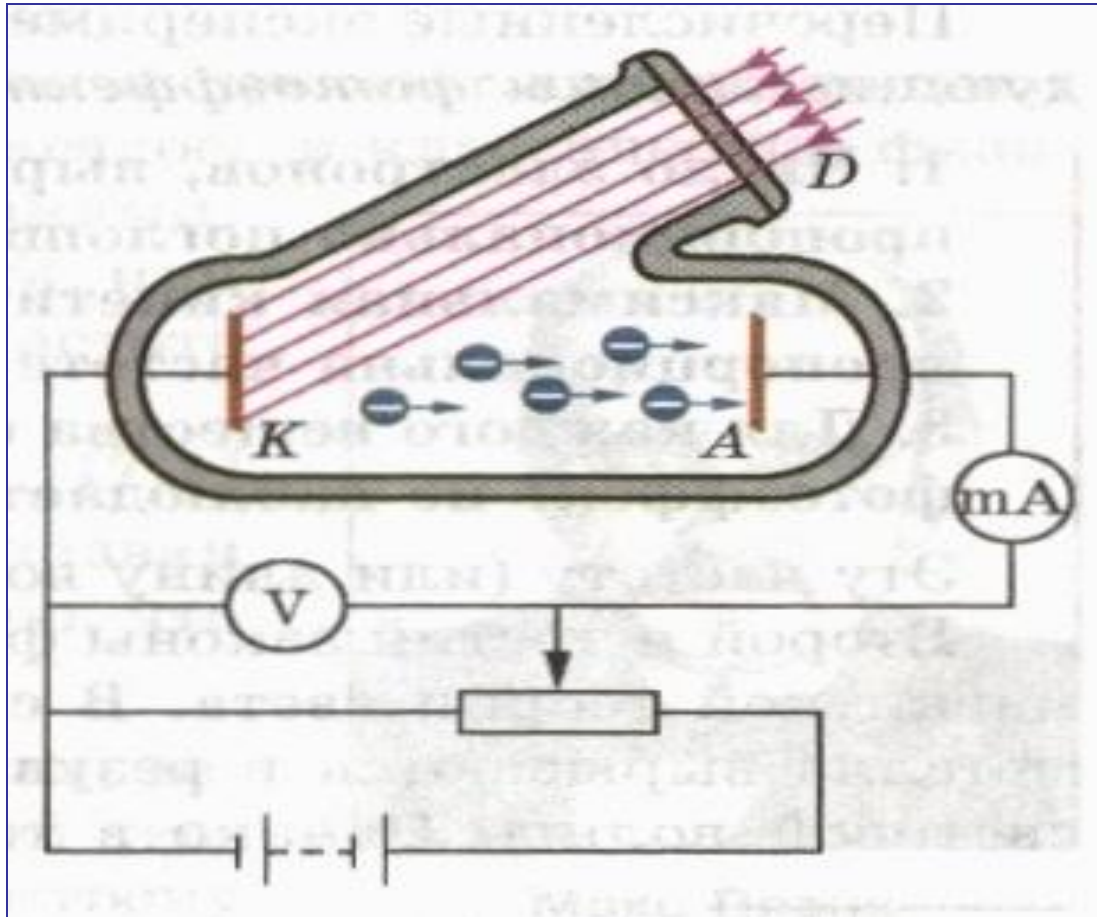




**Возникновение внешнего фотоэффекта  
(происходит взаимодействие световой  
волны с электронами вещества)**



## Схема установки для исследования внешнего фотоэффекта

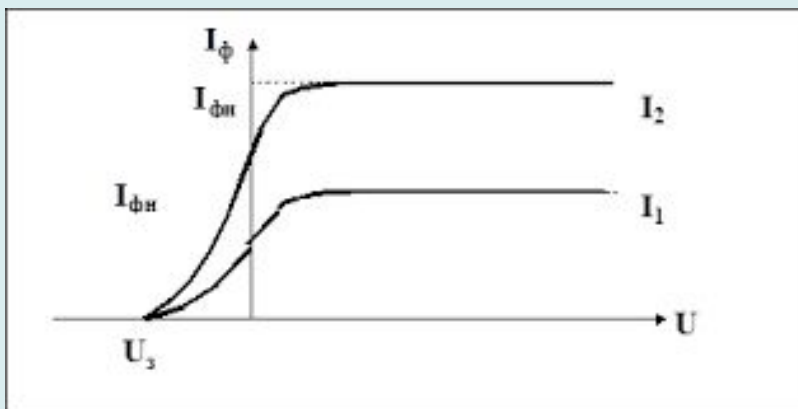


***K*** - отрицательный электрод, катод

***A*** - положительный электрод, анод

***D*** - световой поток, падающий на катод

**Зависимость фототока, образуемого потоком электронов, испускаемых под действием света, от напряжения  $U$  для двух различных освещённостей катода.**



- 1. Электроны вылетают из катода с разными скоростями.**
- 2. Максимальное значение фототока определяется таким напряжением  $U$ , при котором все фотоэлектроны достигают анода**
- 3. При  $U = 0$  фототок не исчезает. Электроны обладают некоторой скоростью и в вакууме могут достичь анода без внешнего поля.**

Для того, чтобы фототок стал равным нулю, надо приложить такое отрицательное задерживающее напряжение  $U_3$ , при котором даже электроны с максимальной кинетической энергией не могут преодолеть задерживающего поля и достичь анода. Это возможно, если максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна работе сил тормозящего, задерживающего поля согласно уравнению

$$e \cdot U_3 = \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2}$$

## ***Три закона внешнего фотоэффекта***

- 1. Число электронов, вырываемых светом с поверхности вещества за единицу времени прямо пропорционально интенсивности падающего света.**
- 2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только частотой света.**

3. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая **красной** **или длинноволновой границей**  $\nu_{кр}$  фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

Эта частота зависит от вида вещества (материала фотокатода) и состояния его поверхности.

Внешний фотоэффект и его законы объясняет квантовая теория, созданная А. Эйнштейном в 1905 г.

# **Квантовая теория фотоэффекта**

## **А. Эйнштейна**

1. Свет распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых равна  $\varepsilon = h\nu$
2. Каждый фотон поглощается одним электроном.
3. Передача энергии фотона электрону происходит почти мгновенно.
4. Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода **A** и на сообщение электрону кинетической энергии.

## Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2}$$

$$\nu_{\text{мин}} = \nu_{\text{кр}} = \frac{A}{h}$$

Красная граница фотоэффекта

$h$  - постоянная Планка

$\nu$  - частота падающего света

$A$  - работа выхода электронов из вещества

$v_{\text{макс}}$  - максимальная скорость фотоэлектрона



### 3. Квантовая природа света. Фотоны.

Современная квантовая физика представляет свет как распространение квантов света - фотонов (микрочастиц света). Свойства фотонов:

**Фотон** - квант электромагнитного излучения

Энергия  $\varepsilon = h \nu$

Заряд  $Q = 0$

Скорость  $c = 300\,000 \text{ км / с}$

Масса покоя  $m_0 = 0$

Масса фотона  $m = h \nu / c^2$

Импульс фотона  $p = m \cdot c = h / \lambda$

Здесь  $\nu$  - частота,  $h$  - постоянная Планка

**Свет, падающий на тело оказывает на его поверхность давление, равное импульсу, который передают поверхности за 1 с  $N$  фотонов**

**Давление света  $P$  при нормальном его падении на поверхность тела равно:**

$$P = \frac{h\nu}{c} \cdot N \cdot (1 + R) = \frac{P}{c} \cdot (1 + R)$$

$$R = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} - \text{коэффициент отражения}$$

*света от поверхности*

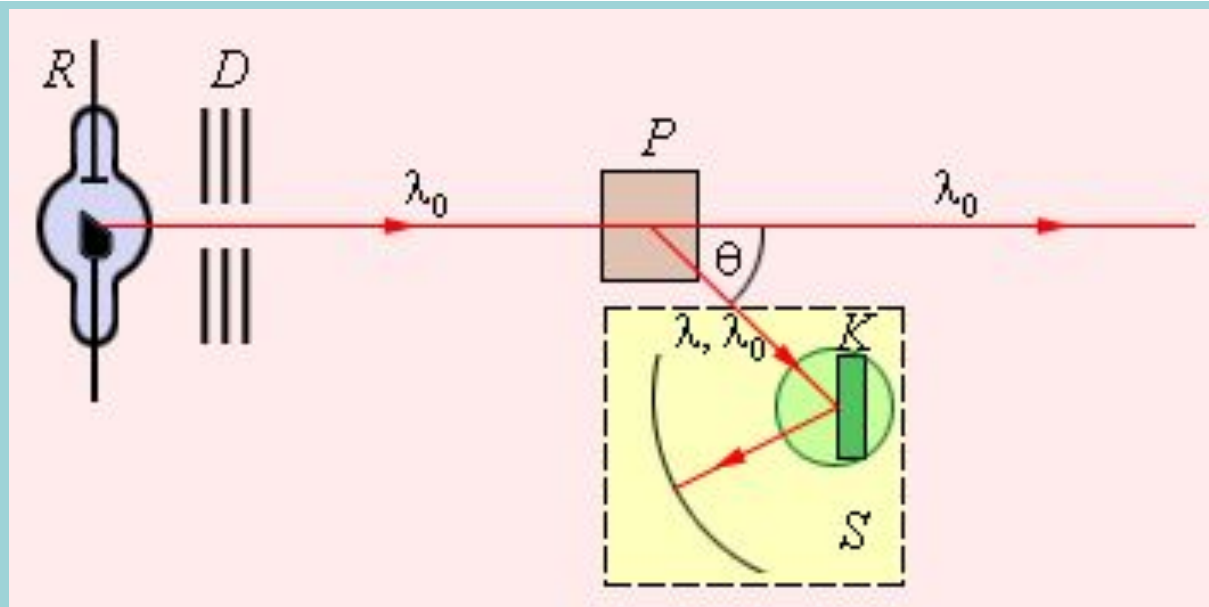
**Вопрос 4.** Наиболее полно квантовые (корпускулярные) свойства света проявляются в эффекте Комптона.

**Эффект Комптона** - упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского) на свободных электронах, сопровождающееся увеличением длины волны излучения.

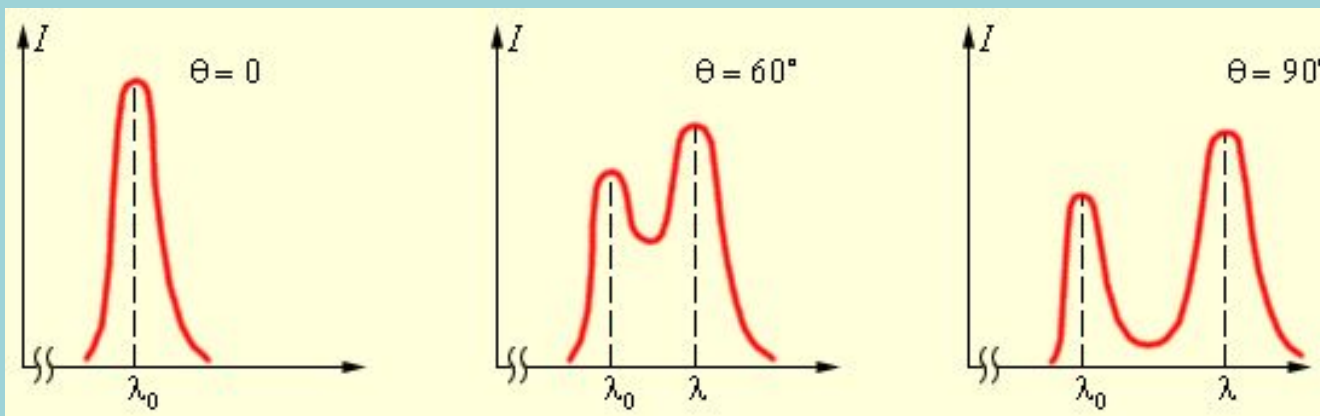
В 1923 г. Комптон исследовал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами. Он обнаружил, что в рассеянном излучении наряду с излучением первоначальной длины волны  $\lambda_0$  содержится более длинноволновое излучение  $\lambda$ .

Разность  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  не зависит от длины волны падающего излучения и природы вещества, а определяется углом рассеяния  $\theta$ .

# Схема эксперимента Комптона



## Спектры рассеянного излучения



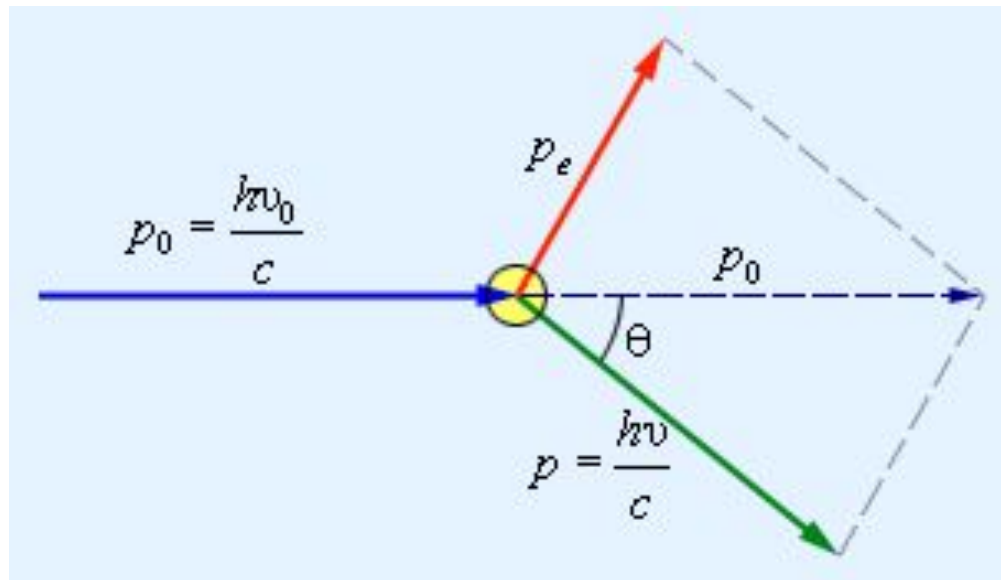
По квантовой теории при эффекте Комптона происходит упругое столкновение двух частиц - налетающего фотона, обладающего импульсом  $p_0$  и энергией  $h\nu_0$  с покоящимся электроном.

Фотон, столкнувшись с электроном, передаёт ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается).

Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. При каждом столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

## Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне (жёлтый шарик):

**синяя стрелка** – вектор импульса исходного фотона,  
**чёрная стрелка** -- вектор импульса рассеянного фотона,  
**красная стрелка** -- вектор импульса электрона отдачи (отскочившего при столкновении с налетающим фотоном)



**Выражение для разности длин волн, полученное из квантовых представлений о свете и законов сохранения энергии и импульса.**

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_C \text{Sin}^2(\theta / 2) = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

$\lambda_0$  – длина волны падающего излучения

$\lambda$  – длина волны рассеянного излучения

$\lambda_C = \frac{h}{m_0 c}$  – комptonовская длина волны

$\lambda_C = 2,426 \text{ нм}$  – комptonовская длина волны  
электрона

## **Корпускулярно - волновой дуализм света**

**В результате углубления представлений о природе света выяснилось, что свет обладает двойственной природой, получившей название корпускулярно – волнового дуализма света.**



**Выяснилось, что свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов.**

**Волновые свойства света определяют распространение света, интерференцию, дифракцию, поляризацию,**

**а корпускулярные свойства - взаимодействие света с веществом !**

# Контрольные вопросы

1. Какого цвета « абсолютно чёрное тело» ?
2. Что такое фотон? Напишите формулу его энергии.
3. Две звезды. Одна излучает голубоватый свет, другая с красным оттенком. У какой из них поверхностная температура выше? Какой закон надо использовать, чтобы ответить?
4. Какой фундаментальный закон использован в уравнении Эйнштейна для внешнего фотоэффекта?
5. Чему равны заряд и масса покоя фотона?
6. Что означает выражение «корпускулярно-волновой дуализм света» ?