

## Рейтинговая система 4-ий семестр

Максимальный рейтинг составляет 122 баллов.

По рейтингу без экзамена можно получить «4» и «5».

«4» – это 80 – 99 баллов. (или  $>0,75$  от максимального рейтинга)

«5» – это 100 – 122 баллов. (или  $>0,9$  от максимального рейтинга)

### Основная литература

**1. Савельев И.В.** Курс общей физики: учебное пособие для втузов: – 10-е изд., стереотип. – СПб.: Лань, 2011. – 320 с.

Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц.

**2. Сивухин Д.В.** Общий курс физики: учебное пособие для вузов в 5 т. – М.: Физматлит, 2005-2006.

Т. 5: Атомная и ядерная физика.

**3. Зисман Г.А., Тодес О.М.** Курс общей физики. В 3-х тт. [Электронный ресурс] – СПб.: Лань, 2007.

Т. 3: Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц.

**Распределение максимального рейтинга по элементам контроля.**

**Посещение лекций и практик –  $(9+9) \times 2 = 18$  баллов.**

**Решение тестов на практиках –  $4 \times 5 = 20$  баллов.**

**Контрольные работы на практиках –  $4 \times 6 = 24$  балла.** Всего 4 контрольных по 6-7 задач в каждой. Одна правильно решенная задача – 2 балла. Оценивается максимум 3 задачи.

**Теоретические коллоквиумы –  $2 \times 30 = 60$  баллов.**

2 письменных коллоквиума. Теоретическая и практическая часть.

**ИТОГО: 122 балла + баллы за активность на практиках и лекциях.**

## Квантовая оптика

*Тепловое излучение* - это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.

*Единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами*

Излучения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней, называются *люминесценцией*.

### Примеры:

- *хемилюминесценция* – свечение за счет энергии, высвобождающейся при химических реакциях (фосфор);
- *электролюминесценция* – свечение, возникающее в газах и твердых телах под действием электрического поля;
- *катодолюминесценция* – свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами;
- *фотолюминесценция* – свечение, возбуждаемое при поглощении телом электромагнитного излучения.

Тепловое излучение имеет место для всех тел в любом агрегатном состоянии, при *любой* их температуре.

## Характеристики излучающего тела

Энергетическая светимость  $R_T$  – количество энергии, испускаемое единицей поверхности тела во всем диапазоне длин волн (частот) за единицу времени.

Рассмотрим часть энергии, испускаемой единицей поверхности тела за единицу времени в узком интервале частот  $d\omega$  вблизи частоты  $\omega$ . Обозначим эту часть через  $dR_{\omega,T}$

Поток  $dR_{\omega,T}$  пропорционален  $d\omega$ :  $dR_{\omega,T} = r_{\omega,T} d\omega$

Величина  $r_{\omega,T}$  называется *испускательной способностью тела* (плотностью энергетической светимости).

Эта величина есть функция частоты  $\omega$  и температуры  $T$ .

Величина  $r_{\omega,T}$  - **поток энергии с единицы поверхности, во всех направлениях в единичном спектральном диапазоне.**

Величины  $R_T$  и  $r_{\omega,T}$  связаны между собой формулами:

$$r_{\omega,T} = \frac{dR_{\omega,T}}{d\omega} \quad R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega$$

Пусть на площадку  $dS$  поверхности тела падает поток лучистой энергии  $d\Phi_{\omega,T}$ , характеризующийся узким интервалом частот  $d\omega$  вблизи частоты  $\omega$ .

Пусть часть этого потока  $d\Phi'_{\omega,T}$  поглощается телом.

$$\alpha_{\omega,T} = \frac{\Phi'_{\omega,T}}{\Phi_{\omega,T}} \quad - \quad \text{поглощательная способность тела.}$$

### ***Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.***

Тело называется *абсолютно черным*, если оно полностью поглощает падающее на него излучение всех частот:

$$\alpha_{\omega,T} = 1,$$

Между испускательной  $r_{\omega, T}$  и поглощательной  $a_{\omega, T}$  способностями любого тела существует универсальная связь:

$$\frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} = f(\omega, T)$$

Это соотношение выражает **закон Кирхгофа**:

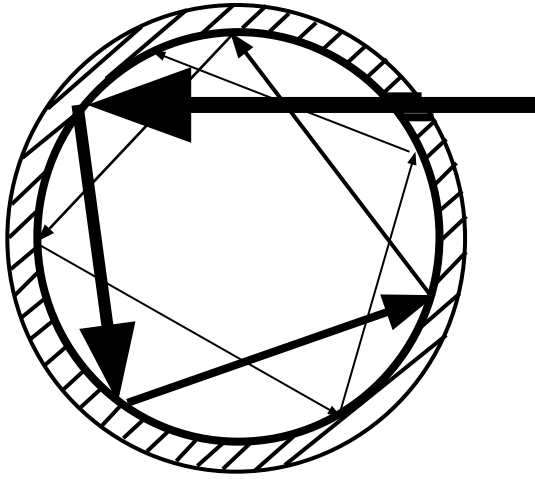
*Отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры.*

Для абсолютно черного тела  $a_{\omega, T} = 1$

Из закона Кирхгофа для такого тела следует  $r_{\omega, T} = f(\omega, T)$

*Универсальная функция Кирхгофа есть ни что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела.*

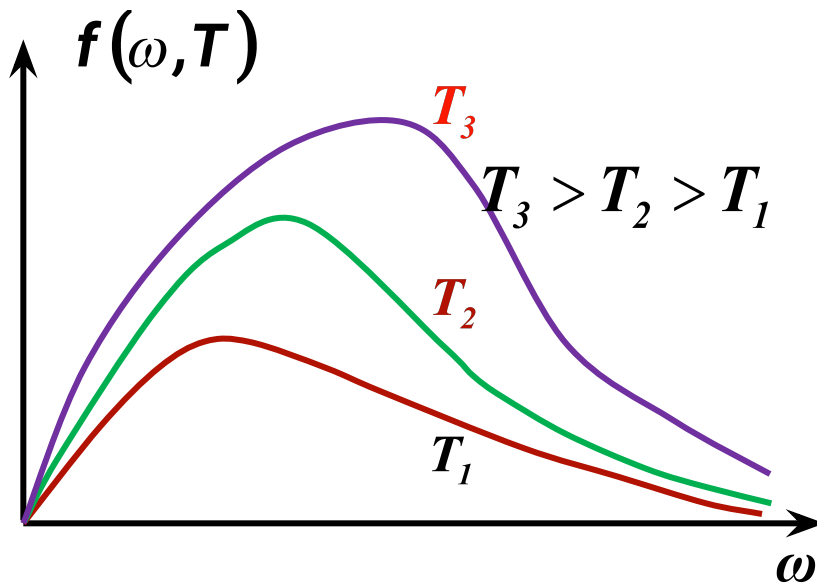
- Абсолютно чёрных тел в природе не существует, это идеализация.



- Полость с малым отверстием очень близка по своим свойствам к абсолютно чёрному телу.

Такая модель используется для изучения характеристик излучения абсолютно черного тела.

Экспериментально определенный вид универсальной функции Кирхгофа для трех температур приведен на рисунке.



Как следует из формулы

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega$$

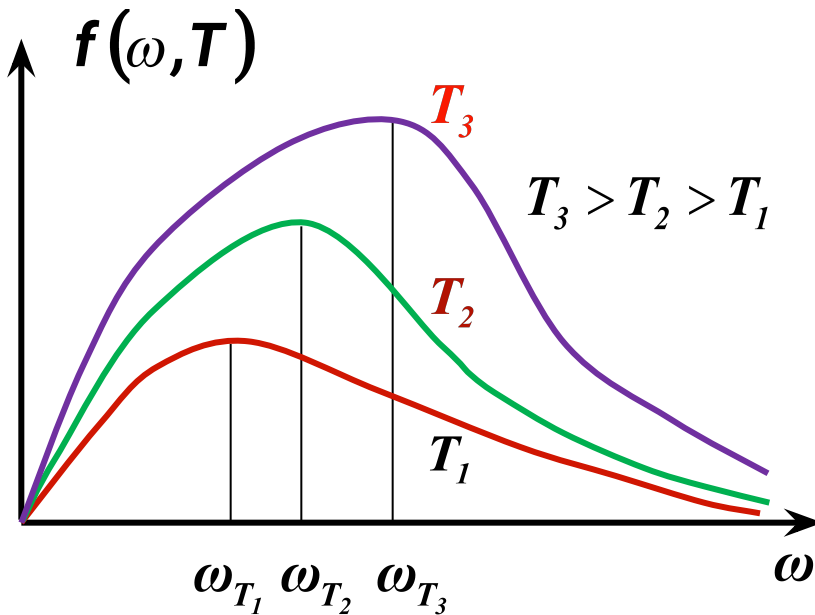
Площадь под кривой  $f(\omega, T)$  дает энергетическую светимость  $R_T$  абсолютно черного тела при соответствующей температуре.

## Закон Стефана – Больцмана.

Из рисунка следует:

- а) энергетическая светимость а.ч.т.  $R_T$  растет с ростом  $T$ ,  
б) максимум излучательной способности с ростом  $T$  смещается в сторону более высоких частот:  $\omega_{T_1} < \omega_{T_2} < \omega_{T_3}$ .

Экспериментально установлено, что для абсолютно черного тела



$$R_T = \sigma T^4$$

Это закон *Стефана – Больцмана*  
 $\sigma$  - постоянная Стефана – Больцмана.

Экспериментальное значение этой постоянной -  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

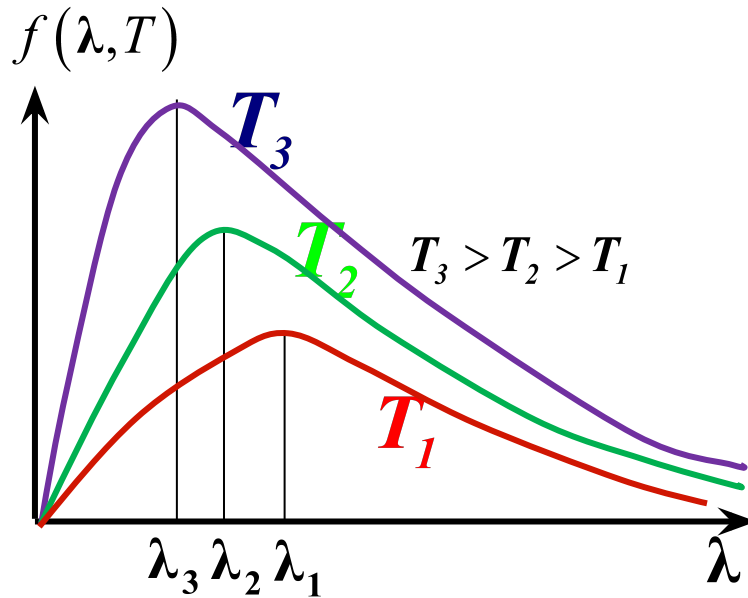


## Закон Вина.

Закон Вина выражает связь между длиной волны  $\lambda_m$  в максимуме испускательной способности и температурой  $T$  тела:

$$\lambda_m = b \frac{1}{T}$$

$\lambda_m$  - длина волны в максимуме функции  $f(\lambda, T)$



$b$  - постоянная Вина.

Экспериментальное значение постоянной  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К.

Закон Вина еще называют *законом смещения Вина*, поскольку из этого закона следует, что максимум испускательной способности тела с увеличением  $T$  смещается в сторону более коротких  $\lambda$  (при увеличении

температуры нагретого тела в его спектре все больше преобладает коротковолновое излучение).

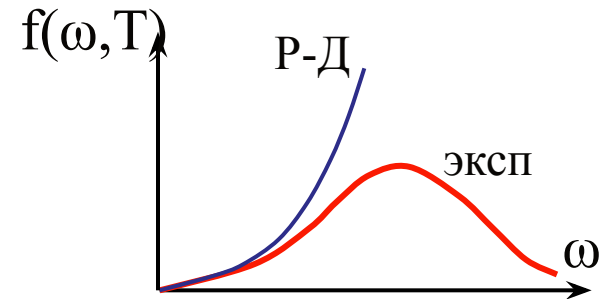
## Теория теплового излучения. Противоречия.

Рэлей и Джинс (английские физики): исходя из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы попытались определить испускательную способность  $r=f(\omega, T)$ .

Они рассмотрели полость как модель черного тела и предположили существование излучения в виде совокупности стоячих волн. На каждую такую волну как на одну колебательную степень свободы приходится энергия  $kT$ .

Р. и Д. получили формулу:

$$f_{\omega, T} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$



Вывод формулы с точки зрения **классической физики** был безупречен.

- Из неё видно, что  $r_{\omega, T}$  монотонно возрастает с ростом  $\omega^2$ , а экспериментальная кривая имеет максимум.

Справедливо только для длинноволновой части спектра

## Гипотеза Планка. Формула Планка.

Формула для спектральной плотности энергии  $U_{\omega, T}$  равновесного излучения, совпадающая с экспериментом на всех частотах, была получена в 1900 году немецким физиком – теоретиком Максом Планком (1858 - 1947).

Планк выдвинул гипотезу, чуждую представлениям классической физики:

*Электромагнитное излучение испускается дискретными порциями энергии – квантами электромагнитного поля.*

Энергия такого кванта пропорциональна частоте излучения  $\omega$ :

$$W = h\nu = \hbar\omega$$

$\nu$  - частота света (  $\omega$  - циклическая частота),  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка (квант действия),  $\hbar = h/2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

## Формула Планка

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$r_{\lambda, T} = \frac{4\pi^2 \hbar C^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{2\pi \hbar C}{kT\lambda}\right) - 1}$$

$$r_{\omega, T} = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 C^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1}$$

# Внешний фотоэффект

Явление вырывания электронов из твёрдых и жидких тел под действием света называется **внешним фотоэффектом**.

Фотоэффект открыт Г. Герцем в 1887г. и детально исследован А. Столетовым в 1888 – 1889 г.

Схема установки:

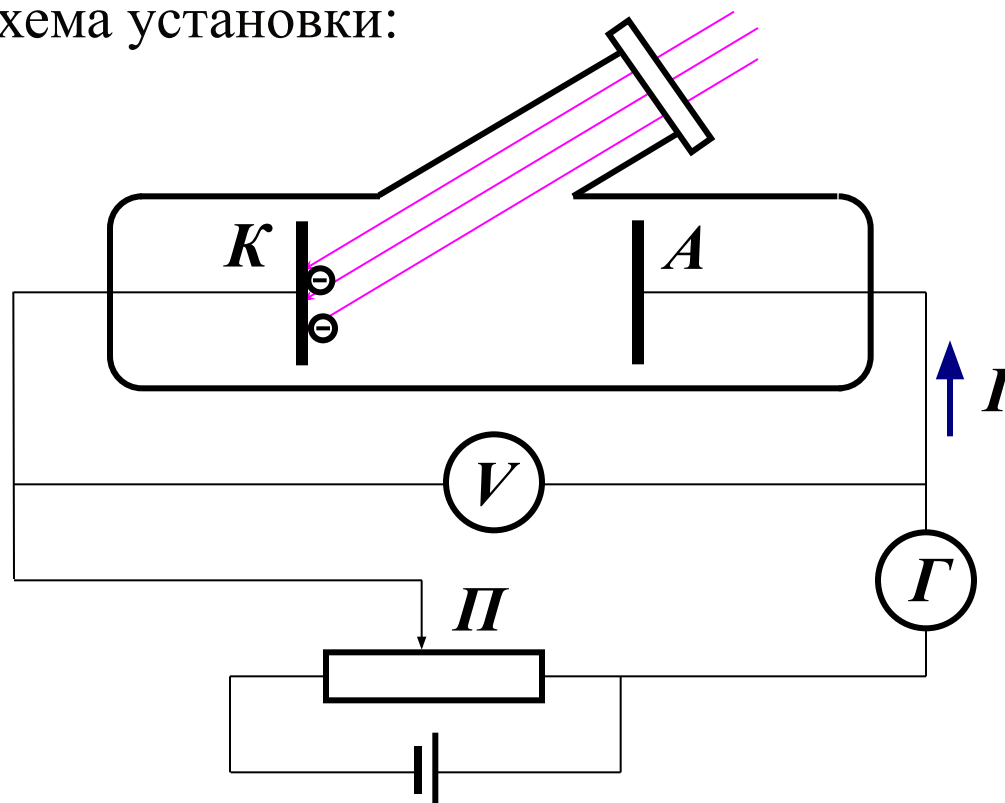
*K* - катод

*A* - анод

*П* - потенциометр

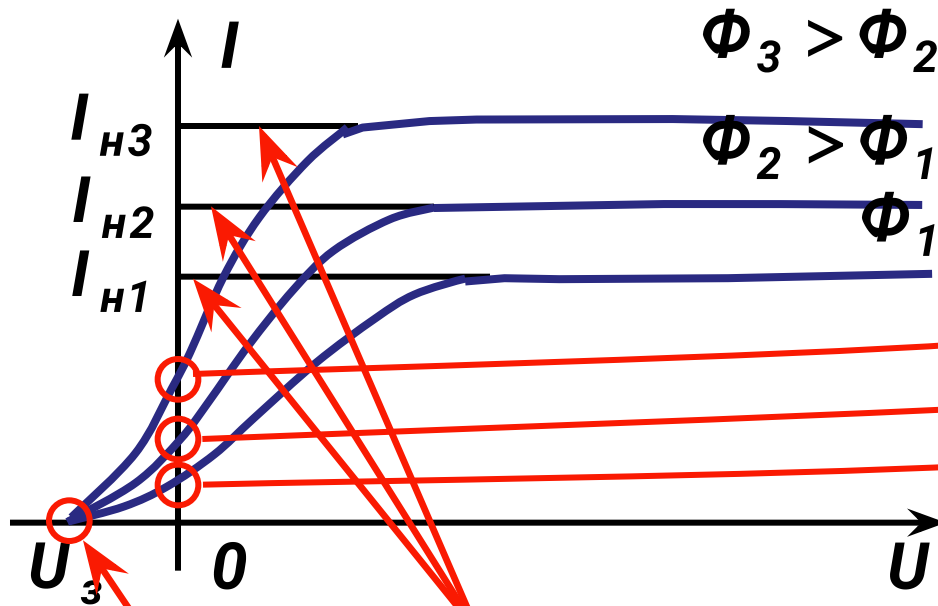
*V* - вольтметр

*Г* - гальванометр



## Результаты экспериментов.

$$\omega = const$$



При  $U = 0$  лишь часть самых быстрых электронов достигает анода.

При небольшом  $U > 0$  фототок достигает тока насыщения  $I_n$  – все электроны, испускаемые катодом, попадают на анод.

Чем больше световой поток, тем больше выбивается электронов в единицу времени и, следовательно, тем больше ток насыщения.

Если приложить некоторое отрицательное (задерживающее) напряжение  $U_3$ , то ни одному из фотоэлектронов не удастся преодолеть задерживающее поле и достичь анода.

# Основные экспериментальные законы внешнего фотоэффекта:

## 1. Закон Столетова

При неизменном спектральном составе падающего на катод света ток насыщения, т.е. количество испускаемых из катода электронов, строго пропорционально световому потоку  $I_n \sim \Phi$ ;

2. Задерживающее напряжение  $U_z$  не зависит от интенсивности света. Максимальная начальная скорость электронов  $v_m$  определяется частотой света и не зависит от интенсивности;

3. Для каждого вещества существует, так называемая **красная граница фотоэффекта**, т.е. минимальная частота  $\nu_{кр}$  (или максимальная длина волны  $\lambda_{кр}$ ) при которой ещё возможен внешний фотоэффект.

$\nu_{кр}$  ( $\lambda_{кр}$ ) зависят от химической природы вещества и от состояния поверхности.

В 1905г. **А.Эйнштейн** показал, что все закономерности внешнего фотоэффекта легко объясняются, если предположить, что:

1. **Свет поглощается** такими же **порциями** (квантами)  $W = h\nu = \hbar\omega$ , какими он, по предположению Планка, испускается.

2. **Электрон поглощает** квант энергии **целиком**.

Часть этой энергии, равная работе выхода  $A$ , затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело.

**Формула Эйнштейна:**

$$\hbar\omega = \frac{m_0 v_{max}^2}{2} + A$$

1. С ростом частоты света растет максимальная скорость электронов  $v_{max}$ , испускаемых катодом;

2. Максимальная скорость не зависит от интенсивности света;

3. Красная граница фотоэффекта определяется  $A = h\nu_{кр}$ .



## ФОТОНЫ

Планк показал, что для объяснения распределения энергии в спектре равновесного теплового излучения достаточно допустить, что свет испускается порциями  $\hbar \omega$ .

Для объяснения фотоэффекта достаточно предположить, что свет поглощается такими же порциями.

Эйнштейн развил эти две догадки и выдвинул гипотезу о том, что свет и распространяется в виде дискретных частиц - фотонов.

Энергия фотона согласно гипотезе Эйнштейна, равна:

$$W = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Фотон обладает инертной массой  $W = mc^2$

$$m_{\phi} = \frac{W}{c^2} = \frac{hc}{\lambda c^2} = \frac{h}{\lambda c} \quad \text{или} \quad m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Фотон движется со скоростью света. Тогда

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty$$

Но масса  $m_0$  конечна. Это абсурд.

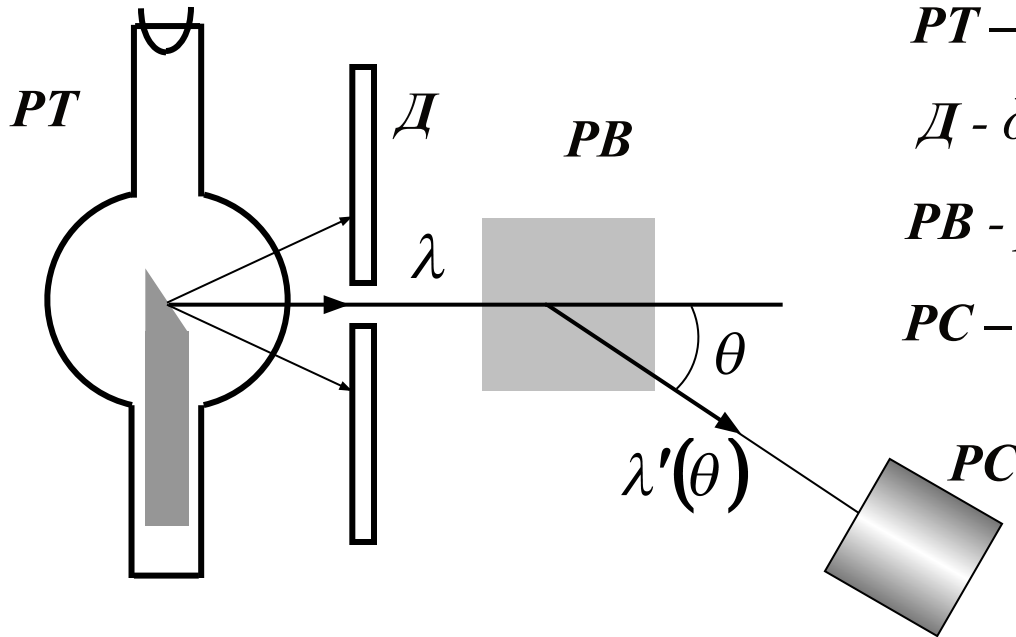
***Фотон это частица, не обладающая массой покоя, она может существовать, только двигаясь со скоростью света.***

Выражения для импульса фотона

$$p = \frac{W}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

# Эффект Комптона

## Схема эксперимента



*RT – рентгеновская трубка*

*Д - диафрагма*

*PB - рассеивающее вещество*

*PC – рентгеновский спектрограф*

## Результаты

## экспериментов:

1. В составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны  $\lambda$  наблюдается также более длинноволновое излучение  $\lambda'$ .
2. Разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\theta$  (тэта):

$$\Delta\lambda = \lambda'(\theta) - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta)$$

$\lambda_c$ -константа, равная  $2,42 \times 10^{-12}$  м (КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ).

При рассеянии фотонов на других частицах (протонах, нейтронах, ядрах) эффект Комптона также имеет место.

В этом случае вид полученной формулы не изменится, но под  $\lambda_c$  нужно понимать иную комptonовскую длину волны

$$\lambda_c = \frac{h}{Mc}, \text{ где } M - \text{масса частицы.}$$

## Двойственная природа света

Свет – диалектическое единство противоположных свойств: он *одновременно* обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.

Взаимодействие фотонов с веществом приводит к *перераспределению* фотонов в пространстве и возникновению *дифракционной картины*.

Освещённость экрана в различных точках прямо пропорциональна вероятности попадания фотонов в различные его точки. Из волновых представлений: освещённость пропорциональна интенсивности света  $I$ , а  $I \sim A^2$  ( $A$  – амплитуда).

$$dP = \chi A^2 dV$$

$\chi$  – коэффициент пропорциональности;  
 $V$  – объём.

- *Квадрат амплитуды световой волны, в какой либо точке пространства есть мера вероятности попадания фотонов в данную точку пространства.*