

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 ω . 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 ω 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 ω .

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**:

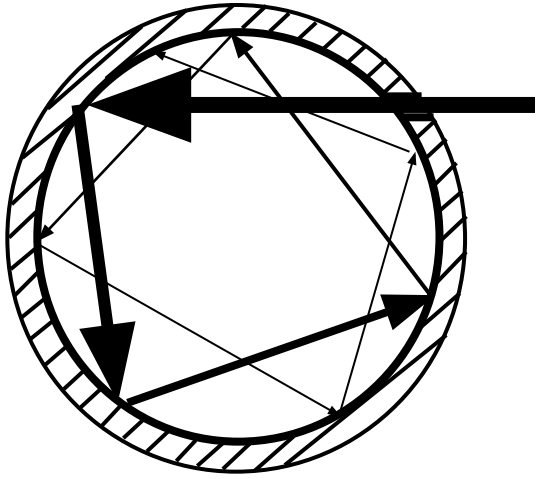
Отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры.

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.

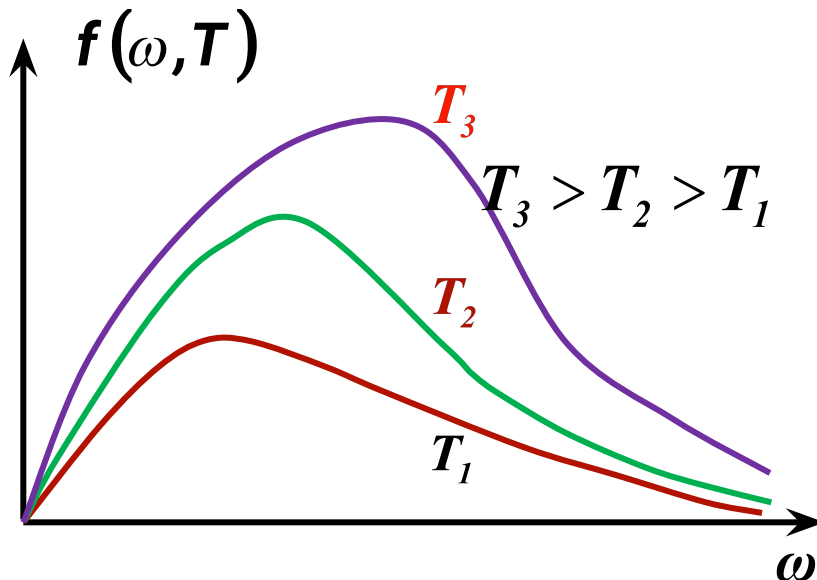
- Абсолютно чёрных тел в природе не существует, это идеализация.



- 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

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

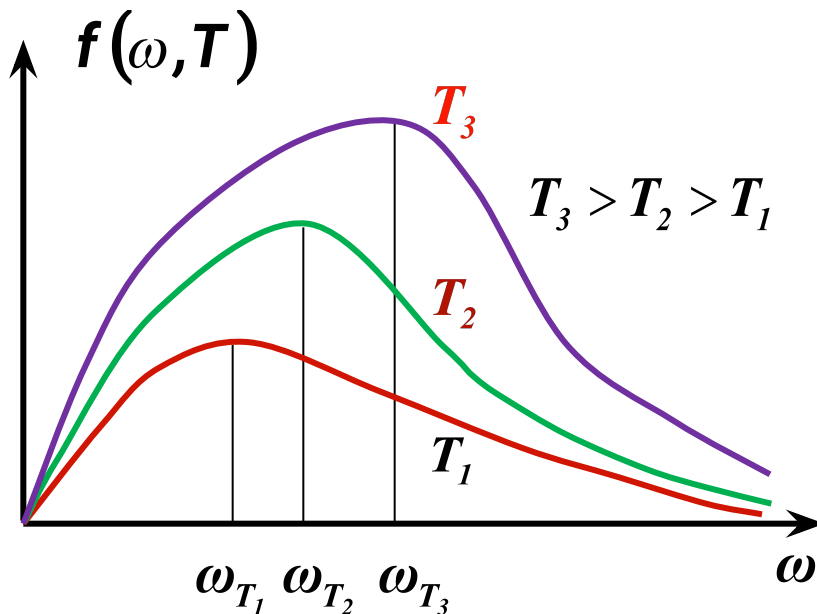
Площадь под кривой $f(\omega, T)$ дает энергетическую светимость R_T абсолютно черного тела при соответствующей температуре.

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*

σ - постоянная Стефана – Больцмана.

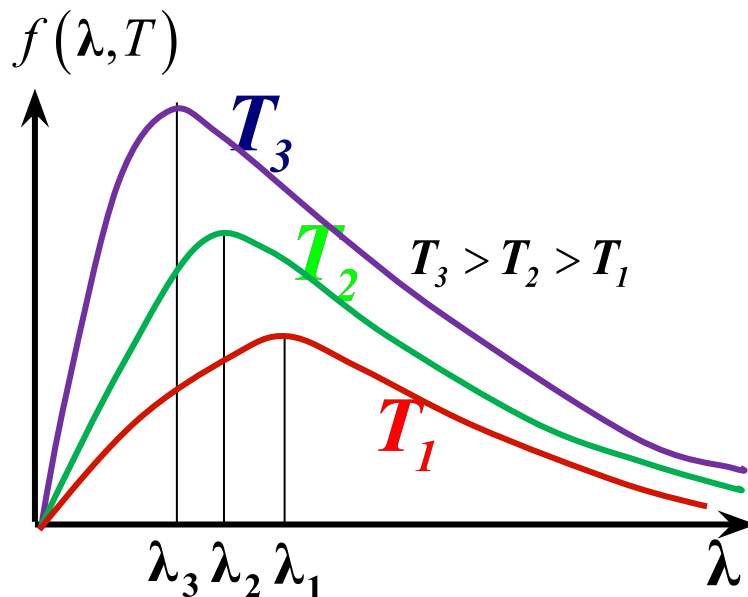
Экспериментальное значение этой постоянной - $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Закон Вина.

Закон Вина выражает связь между длиной волны λ_m в максимуме излучательной способности и температурой T тела:

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

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



b - постоянная Вина.

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

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

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

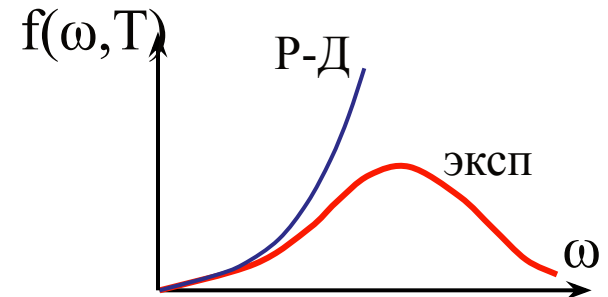
Теория теплового излучения. Противоречия.

Рэлей и Джинс (английские физики): исходя из теоремы классической статистики о равнораспределении 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 ω^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 ω :

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

ν - частота света (ω - 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

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

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

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

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:

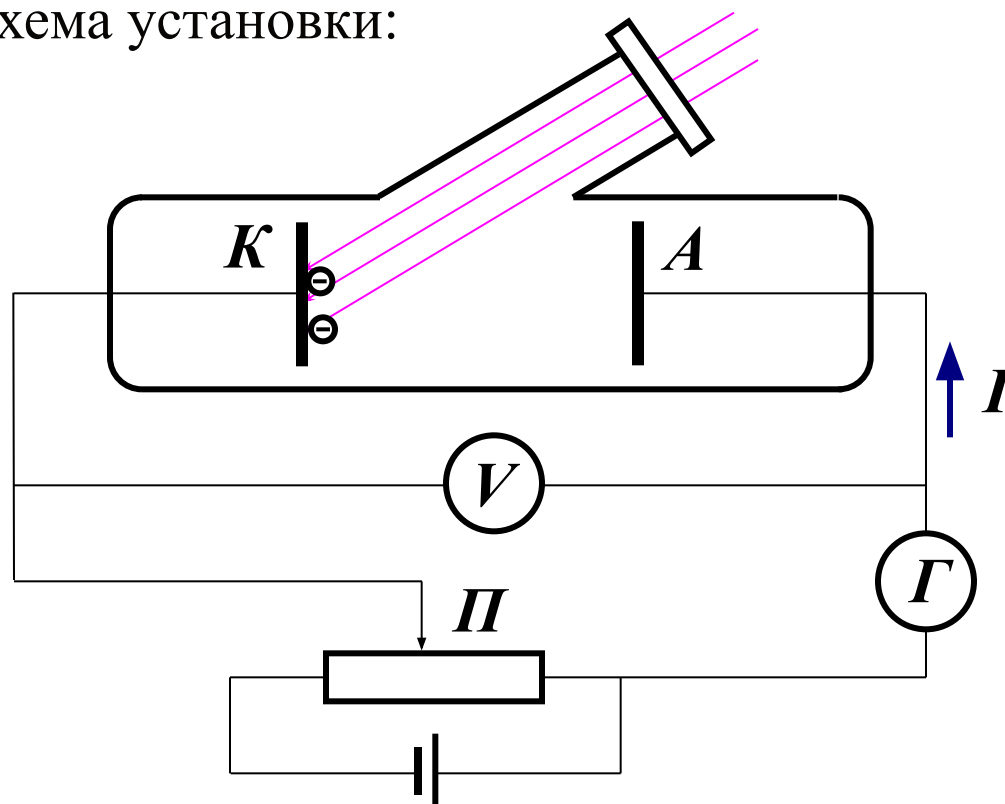
K - катод

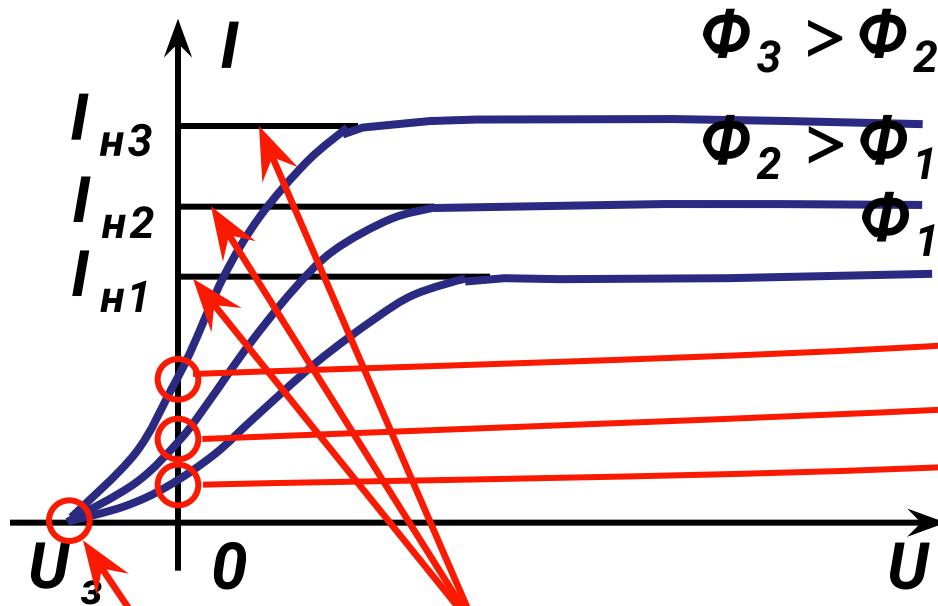
A - анод

Π - потенциометр

V - вольтметр

Γ - гальванометр





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.

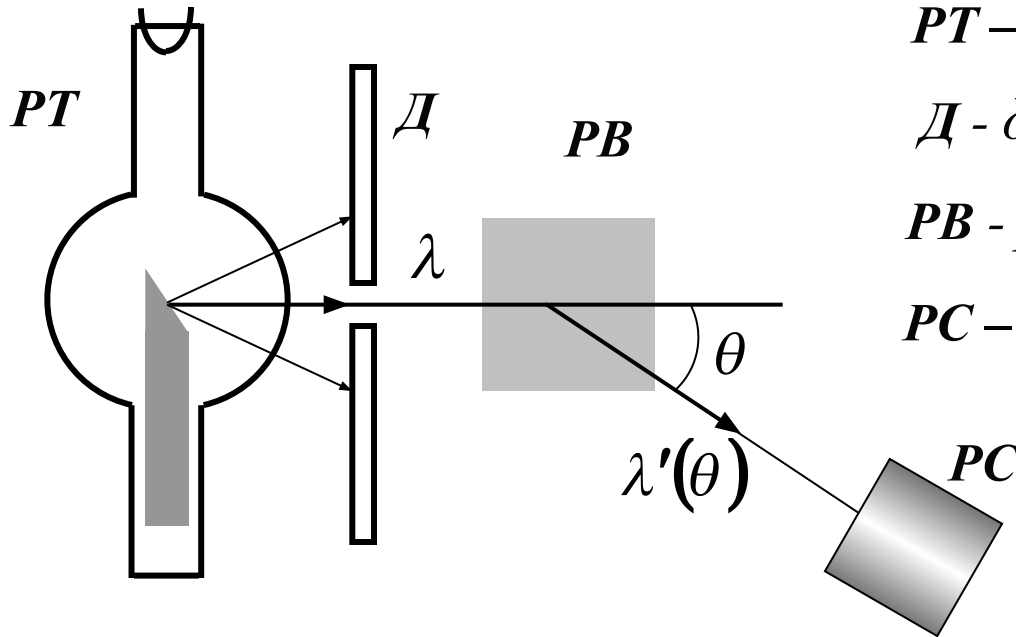
Фотон это частица, не обладающая массой покоя, она может существовать, только двигаясь со скоростью света.

Выражения для импульса фотона

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

Эффект Комптона

Схема эксперимента



PT – рентгеновская трубка

Д - диафрагма

PB - рассеивающее вещество

PC – рентгеновский спектрограф

Результаты экспериментов:

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

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

λ_c -константа, равная $2,42 \times 10^{-12}$ м (комptonовская 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 λ_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).

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

χ – коэффициент пропорциональности;
 V – объём.

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