



КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фотоэффект

http://www.ph4s.ru/kurs_ob_ph.html

Виды фотоэффекта

Различают *фотоэффект внешний, внутренний, вентильный и многофотонный.*

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

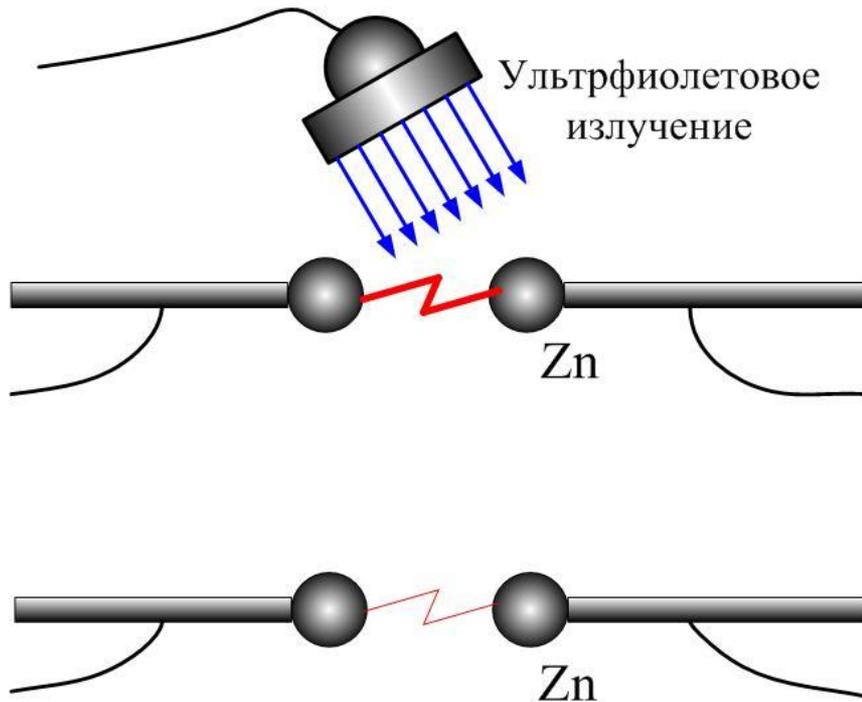
Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Вентильный фотоэффект, – возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

Многофотонный фотоэффект возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.

Открытие фотоэффекта Герцем

Герц установил, что ультрафиолетовое излучение усиливает электрический разряд между цинковыми электродами.



Генрих Рудольф Герц
(1857 - 1894)

Из-за несовершенства экспериментальной техники Герцу не удалось подробно исследовать это явление. Некоторые выводы Герца оказались ошибочными.

Исследования продолжили Гальвакс, Видеман и Эберт.

Исследования А. Г. Столетова

Александр Григорьевич
Столетов
(1839 - 1896)



А.Г. Столетов установил три закона фотоэффекта, не утратившие своего значения и в настоящее время. В современном виде законы внешнего фотоэффекта формулируются следующим образом:

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

интенсивности света (сила тока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода).

ІІ. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

ІІІ. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

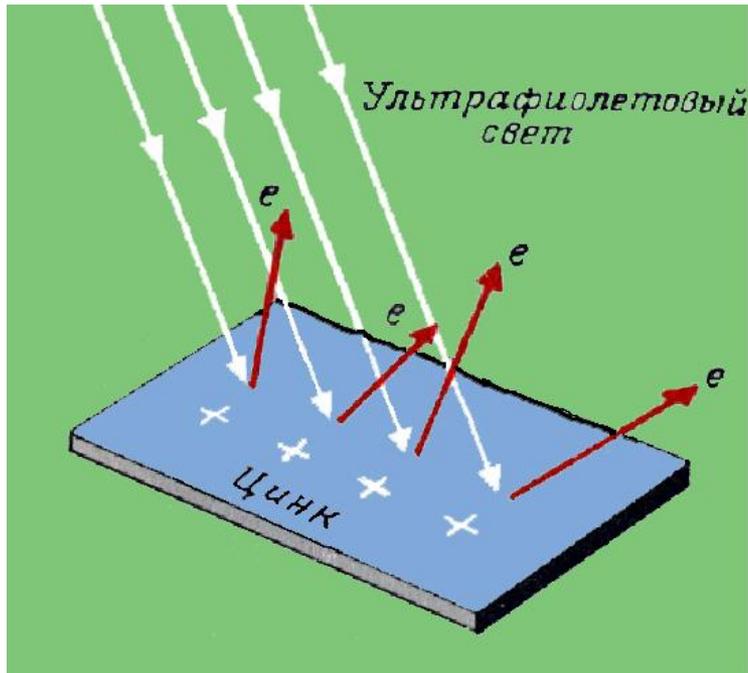
Исследования Ленарда и Томсона

ТОМСОН (Thomson), Джозеф Джон

18 декабря 1856 г. – 30 августа 1940 г.

ЛЕНАРД (von Lenard), Филипп фон

7 июня 1862 г. – 20 мая 1947 г.



1. Ленард и Томсон доказали, что из пластины вылетают электроны.
2. Подтвердили, что ток насыщения пропорционален световому потоку.
3. Определили задерживающее напряжение

$$\frac{mV^2}{2} = eU_3$$

4. Величина U_3 не зависит от светового потока и для данного материала определяется частотой излучения.

5. Существует «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота излучения, при которой еще возможен фотоэффект.

В 1899 Дж. Дж. Томсон и Ф. Ленард доказали, что при фотоэффекте **свет выбивает из вещества электроны.**

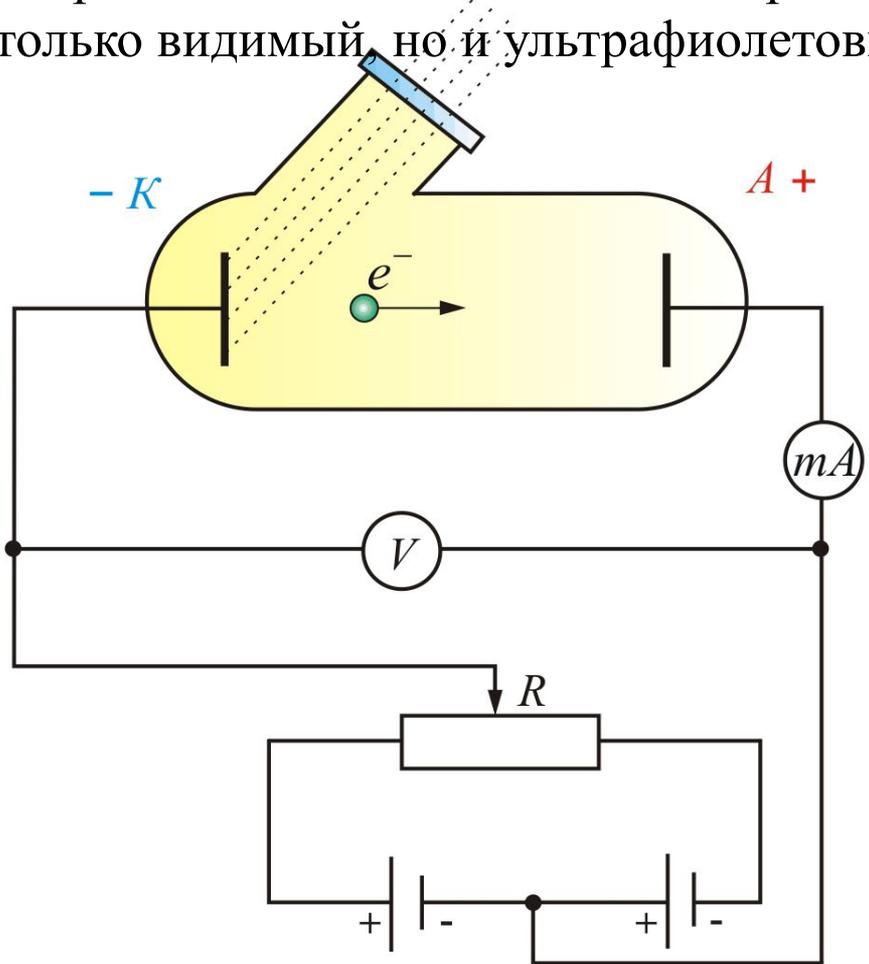


Джозеф
Джон
Томсон

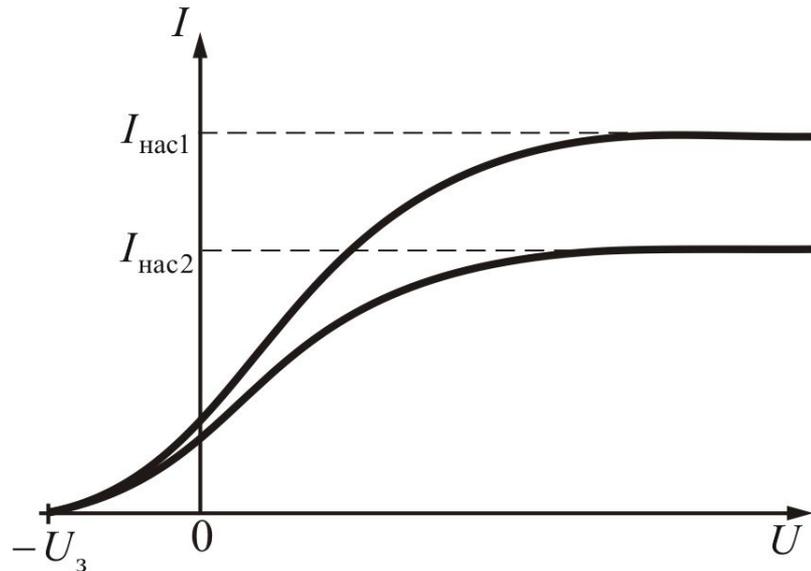


Филипп
Эдуард
Антон фон
Ленард

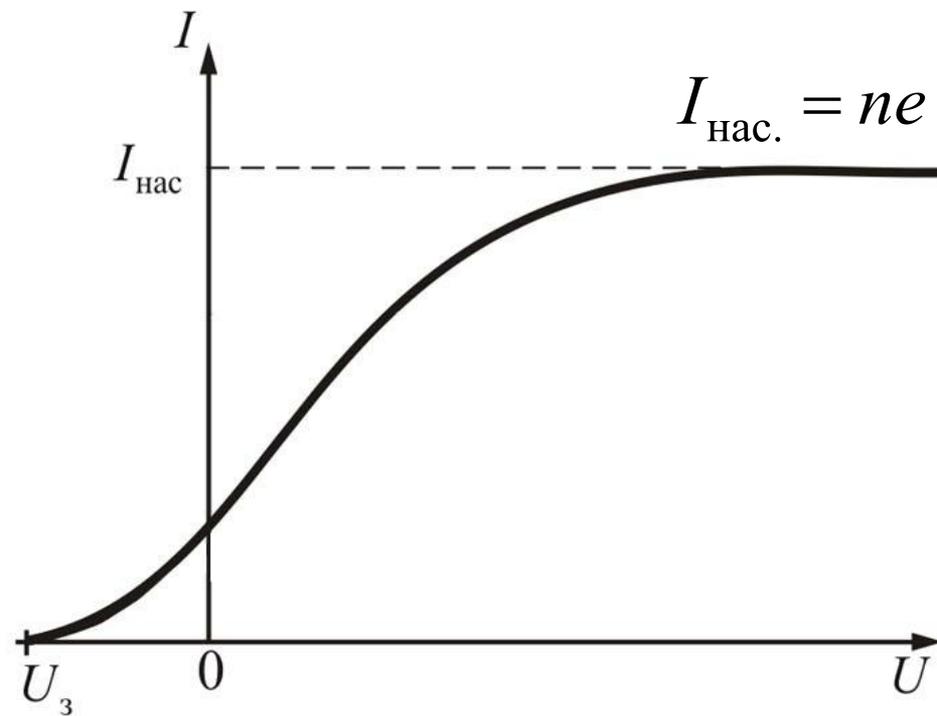
Закономерности явления изучают с помощью фотоэлементов различной конструкции, в которых имеются два электрода: фотокатод K (освещаемый катод) и анод A . Электроды впаяны в стеклянный баллон, из которого откачан воздух. Фотоэлемент включается в электрическую цепь с источником постоянного напряжения, которая позволяет менять величину и полярность напряжения. Катод освещается через кварцевое окно, которое пропускает не только видимый, но и ультрафиолетовый свет.



Вольтамперная характеристика (ВАХ)



Максимальное значение тока $I_{\text{нас.}}$ – **фототок насыщения** – определяется таким значением U , при котором **все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:**



$$I_{\text{нас.}} = ne,$$

где n – число электронов испускаемых катодом в 1 с.

Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение U_3**

$$\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$$

Почему нельзя объяснить фотоэффект с классических позиций?

Классическая модель фотоэффекта. ЭМВ «раскачивает» электроны вещества. Электроны ускоряются. Некоторые из них вылетают из металла.

Противоречия классической модели эксперименту.

1. Величина задерживающего напряжения должна быть пропорциональна световому потоку. (Световой поток пропорционален энергии излучения).
2. В этом случае фотоэффект должен иметь резонансный характер. При совпадении частоты излучения с собственной частотой колебаний электрона в атоме должен наблюдаться максимум фототока.
3. Фотоэффект не должен быть безинерционным. Чем дольше ЭМВ «раскачивает» электрон, тем больше его скорость и энергия. В 1914 г. Майер и Герлах оценили минимальное время, необходимое для «раскачки» электрона. Оно оказалось порядка нескольких минут.

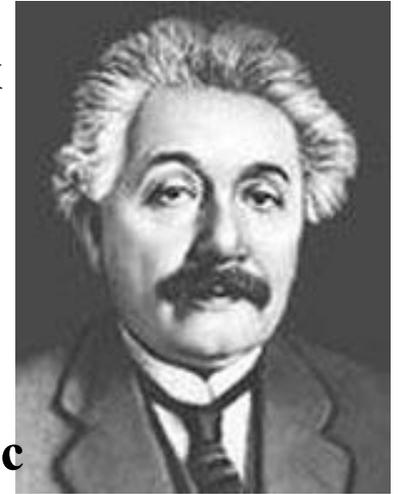
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

В отличие от Планка Эйнштейн постулировал, что само световое излучение, а не только механизм его испускания - поглощения имеет дискретный характер.

Согласно Эйнштейну монохроматическое излучение состоит из локализованных в пространстве неделимых квантов – фотонов с энергией . Это означает, что при облучении фотокатода реализуется корпускулярный механизм передачи энергии электронам в металле.

Поскольку энергия поступает порциями , она может быть передана целиком одному электрону, который оказывается в состоянии вылететь из металла. Процесс поглощения фотона и передачи его энергии электрону имеет вероятностный характер. Если электрон, получивший энергию , находился на поверхности металла, и для преодоления потенциального барьера ему необходима энергия, равная работе выхода , то после вылета его энергия будет максимальной

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \hbar \omega - A \quad eU_3 = \hbar \omega - A$$



Альберт Эйнштейн
(1879 - 1955)

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

В отличие от Планка Эйнштейн постулировал, что само световое излучение, а не только механизм его испускания - поглощения имеет дискретный характер.

$$\hbar \omega = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

Это уравнение позволило объяснить все наблюдаемые свойства фотоэффекта.

1. Безинерционность.
2. Сила тока пропорциональна числу поглощенных квантов света, т.е. энергии света.

$$3. \frac{mV^2}{2} = \hbar \omega - A_{\text{вых}}$$

4. «Красная граница»

$$E_{\text{кин}} = 0$$

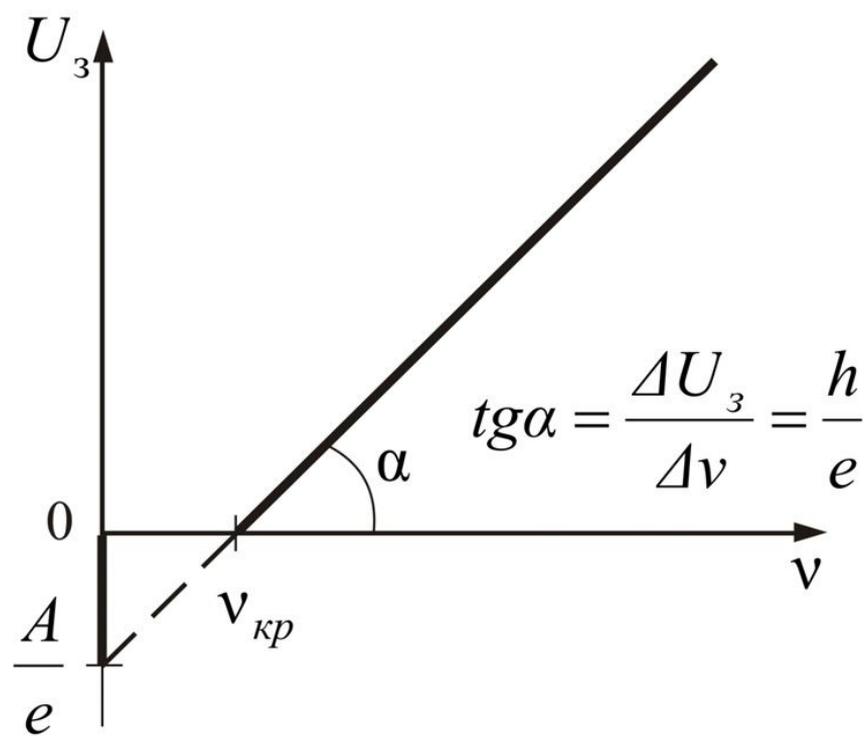
$$\omega_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{\hbar}$$

Из теории Эйнштейна для фотоэффекта следует:

1. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа налетающих фотонов, которые выбивают с поверхности металла больше электронов. Но так как энергия фотонов одна и та же, максимальная кинетическая энергия электрона не изменится (подтверждение закона фотоэффекта).
2. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов возрастает линейно по формуле Эйнштейна
(подтверждение закона фотоэффекта).

$$\frac{m\nu_{\text{макс.}}^2}{2} = \hbar \omega - A_{\text{вых}}$$

$$\frac{m\nu_{\text{макс.}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$



$$\frac{mv_{\text{макс.}}^2}{2} = h\nu - A$$

$$eU_3 = h(\nu - \nu_0)$$

3. Если частота ν меньше критической частоты ν_0 , при которой $h\nu_0 = A$, то выбивание электронов с поверхности не происходит. (III закон).

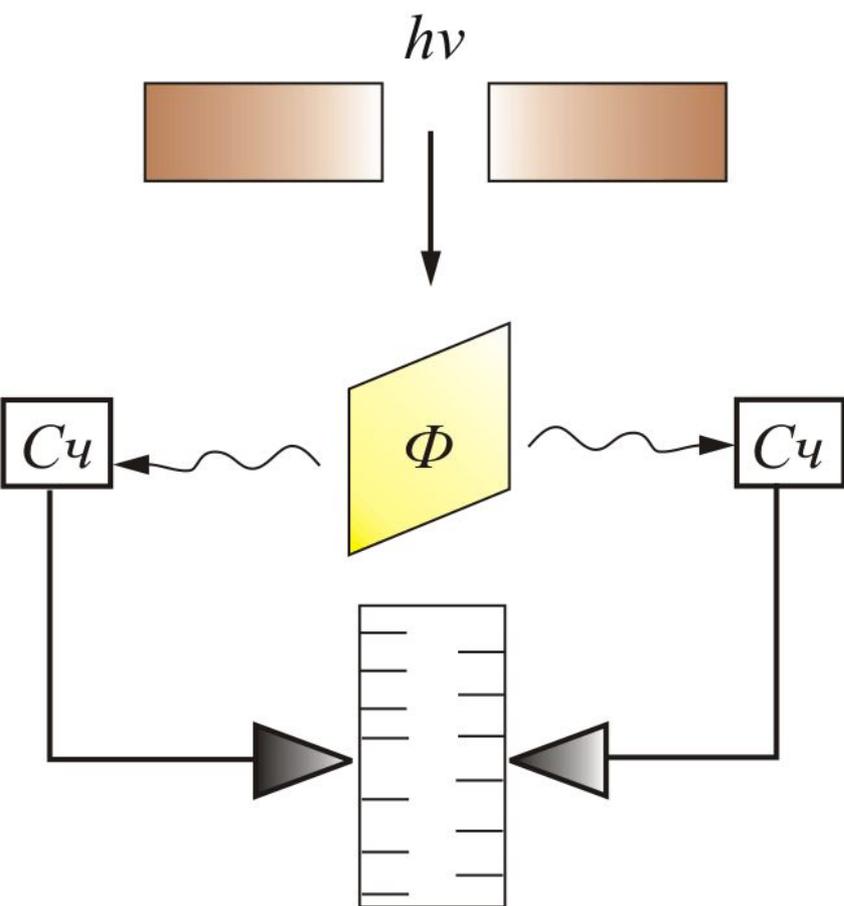
Уравнение Эйнштейна было подтверждено опытами Милликена, выполненными в 1913 – 1914 гг.



ФОТОНЫ

Опыт Боте

Опыт Боте,
подтверждающий гипотезу
Эйнштейна



Тонкая металлическая фольга Φ помещена между двумя газоразрядными счетчиками $Сч$.

При облучении рентгеновскими лучами Φ становится источником рентгеновского излучения.

При попадании рентгеновских лучей счетчик срабатывает и с помощью спец. устройства делает метку на движущейся ленте.

Метки располагались на ленте хаотично, что свидетельствует о квантовой природе излучения – в каждом акте испускания направление движения частиц свое

Свойства фотонов

Фотон обладает энергией

$$E = \hbar \omega$$
$$E = h\nu.$$

Согласно теории относительности, частица с энергией E обладает массой

$$m = E/c^2.$$

Фотон — частица, движущаяся со скоростью света c . Фотон существенно отличается от обычных частиц, так как не имеет массы покоя и может существовать только в движении.

Импульс фотона

$$p = \hbar k$$

и, следовательно, равен

$$p = \hbar \omega / c = 2\pi\hbar / \lambda \quad \mathbf{p = h\nu / c = h / \lambda,}$$

Фотон — стабильная элементарная частица, время его жизни определяется взаимодействием с частицами вещества, в процессе которого фотон либо рождается, либо уничтожается.



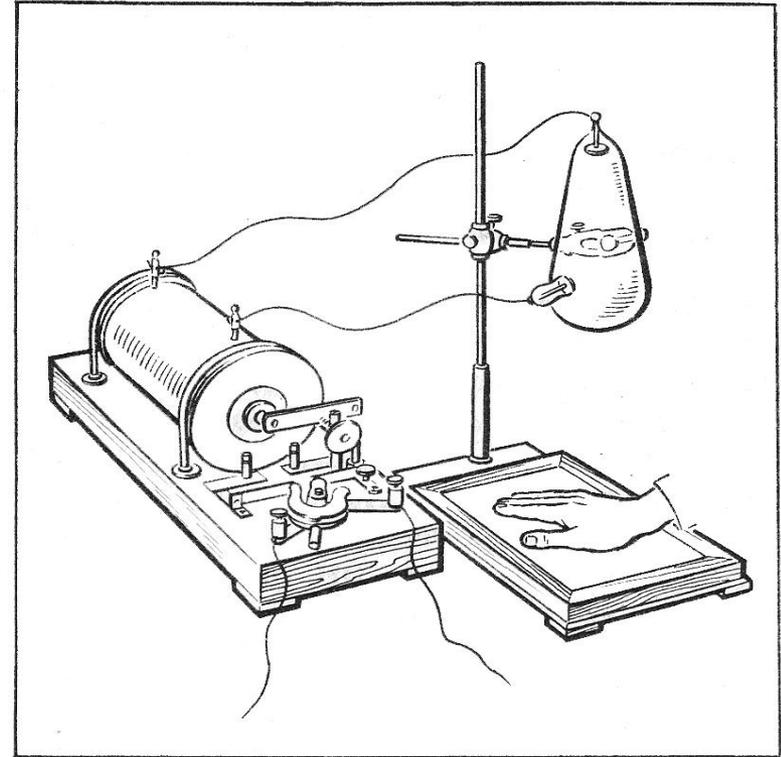
ФОТОНЫ

**Коротковолновая граница
спектра тормозного
рентгеновского излучения**

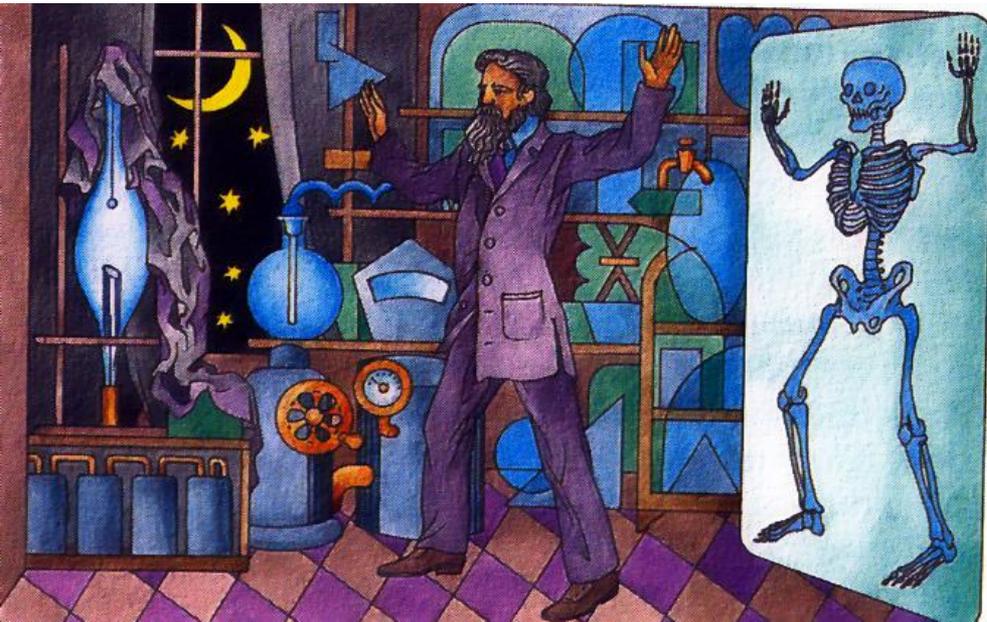
Рентгеновское излучение (X-лучи)



Вильгельм
Конрад
Рентген
(1845 - 1923)



Работая с трубкой Крукса и разрядником (источником высокого напряжения) В.К.Рентген в 1895 г. обнаружил новый вид электромагнитного излучения, которое он назвал X-лучами.

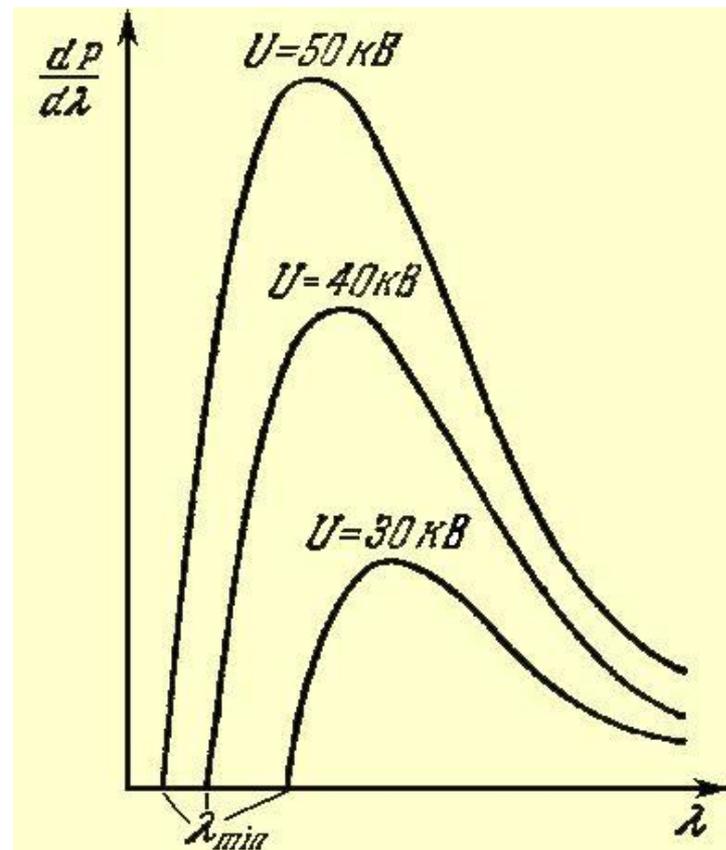
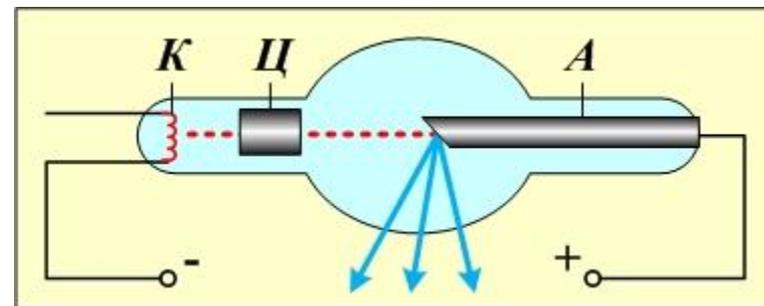


Тормозное и характеристическое рентгеновское излучение

Тормозное излучение возникает при движении заряженных частиц с ускорением (например, при торможении ранее ускоренных электронов). Спектр тормозного излучения – непрерывный.

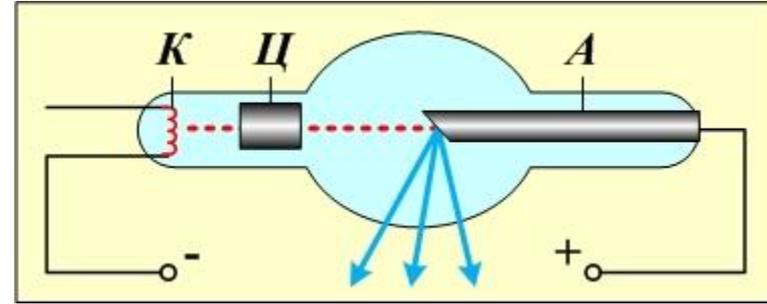
Для тормозного излучения наблюдается некоторая граничная частота (или наименьшая длина волны), выше которой электромагнитные волны не излучаются. Величина наименьшей длины волны (наибольшей частоты) зависит от величины ускоряющего напряжения (см. рис.)

Кроме тормозного излучения наблюдается **характеристическое излучение**, специфическое для каждого вещества. Спектр характеристического излучения – дискретный.



Коротковолновая граница спектра тормозного рентгеновского излучения.

Существование коротковолновой границы тормозного рентгеновского излучения легко объяснить, исходя из квантовой природы излучения.



Величина энергии, излучаемой электроном при торможении, не может превысить величины энергии, полученной электроном при ускорении.

$$\hbar \omega \leq eU, \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda},$$

$$\hbar \omega = \frac{2\pi \hbar c}{\lambda} \leq eU, \quad \lambda_{\min} = \frac{2\pi \hbar c}{eU}, \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU},$$

что совпадает с экспериментально полученной величиной

$$\lambda_{\min} = \frac{12390}{U}, \quad \text{где длина волны выражена в ангстремах, напряжение} \\ \text{— в вольтгах.}$$

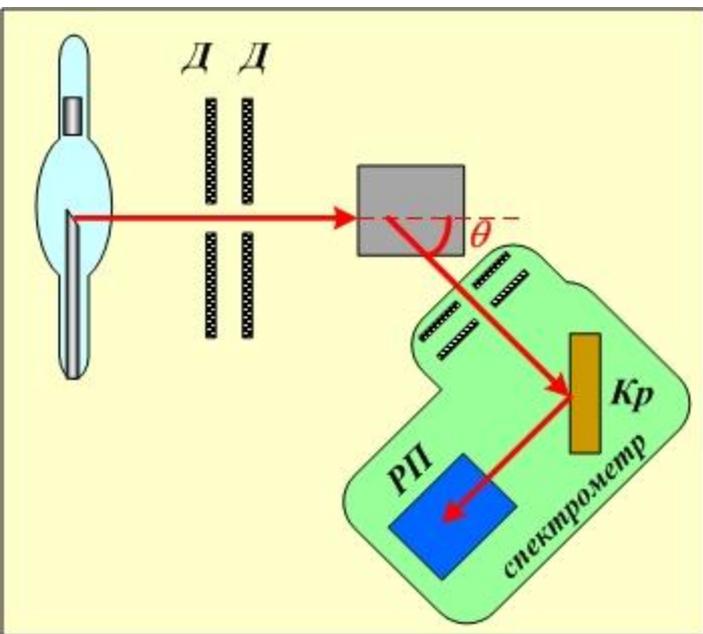


ФОТОНЫ

Эффект Комптона

Эффект Комптона

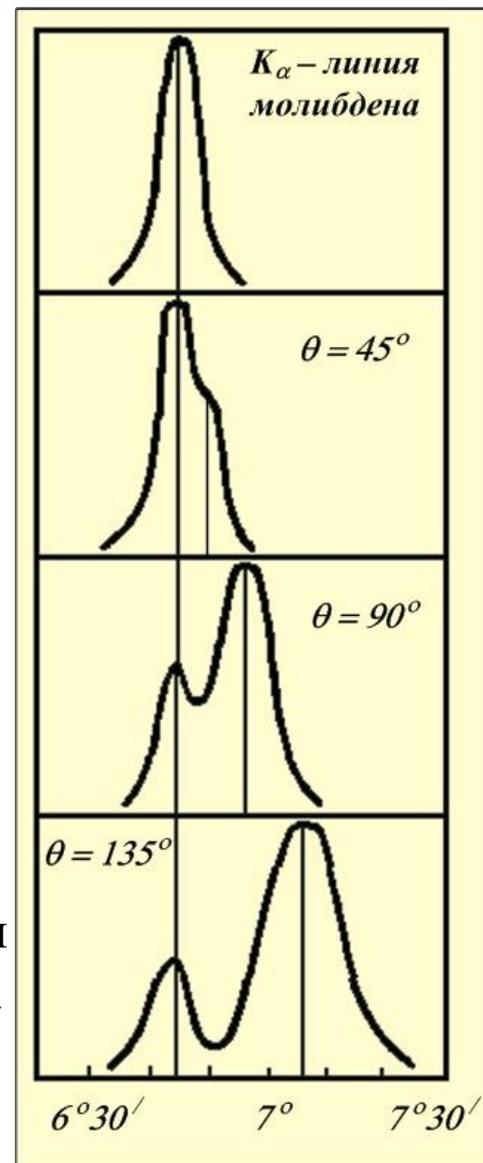
(Неупругое рассеяние рентгеновских фотонов на электронах)



Э. Комптон в 1922 – 23 г. исследовал взаимодействие характеристического рентгеновского излучения молибдена (K_{α} – линию) с различными веществами.

Он обнаружил, что если наблюдать спектр излучения молибдена под некоторым углом к оси исходного рентгеновского пучка, то появляется дополнительная длинноволновая линия.

Интенсивность и длина волны этой длинноволновой линии – спутника (или сателлита) зависит только от угла наблюдения и не зависит от рода облучаемого вещества.



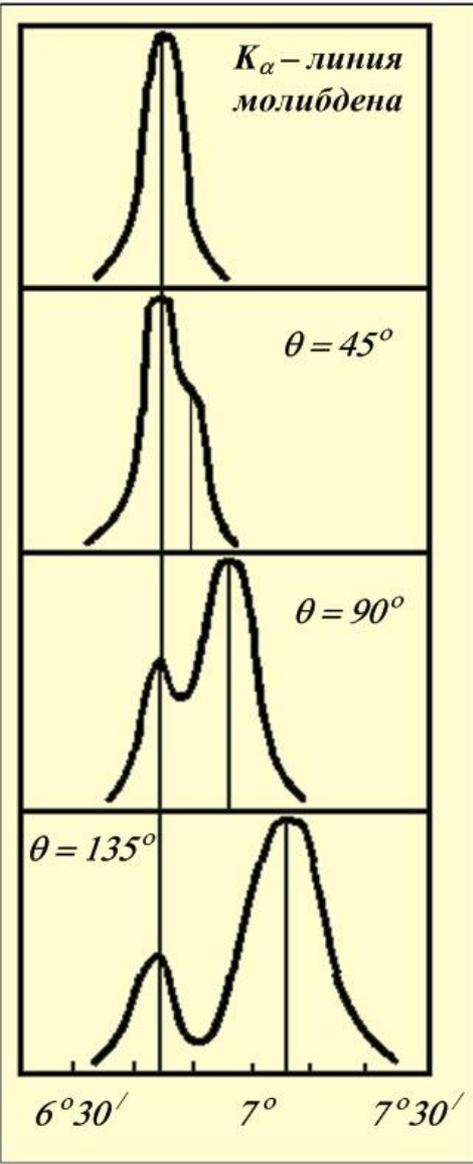
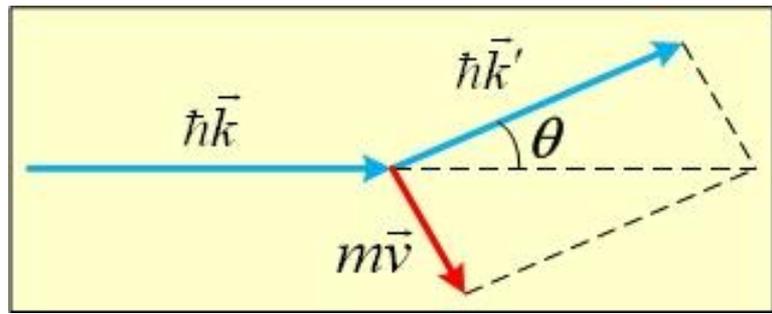
Экспериментально было установлено, что изменение длины волны при рассеянии рентгеновского излучения составляет

$$\Delta\lambda = \lambda_K (1 - \cos \vartheta) = 2\lambda_K \sin^2 \vartheta,$$

$$\lambda_K = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

Объяснить этот эффект можно, рассмотрев взаимодействие рентгеновских фотонов с электронами. (Если бы фотоны взаимодействовали с атомами вещества, результат зависел бы от рода вещества).

Рассмотрим столкновение рентгеновского фотона с электроном.



$m\vec{v}$ — импульс электрона, \vec{k} — импульс фотона до столкновения,
 ϑ — угол рассеяния, \vec{k}' — импульс фотона после столкновения.

Эффект Комптона – изменение энергии и импульса фотонов при рассеянии на свободных электронах

- Увеличение длины волны излучения при его рассеянии необъяснимо с точки зрения волновой теории электромагнитного излучения. Электромагнитная волна должна воздействовать сразу на все электроны вещества. При этом доля энергии и импульса волны, передаваемая одному электрону, должна быть ничтожно малой. В классической теории рассеяние рассматривается как процесс, в котором электроны совершают вынужденные колебания под действием электрического поля падающей волны, излучая вторичные (рассеянные) электромагнитные волны на частоте падающего излучения.
- **Таким образом, эффект Комптона относится к явлениям квантовой оптики.**

До столкновения.

Фотон: $\vec{p} = \hbar \vec{k}$, $E = \hbar \omega$.

Электрон: $\vec{p} = 0$, $E = mc^2$.

После столкновения.

Фотон: $\vec{p} = \hbar \vec{k}'$, $E = \hbar \omega'$.

Электрон: $\vec{p} \neq 0$,

$$E = c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Закон сохранения энергии:

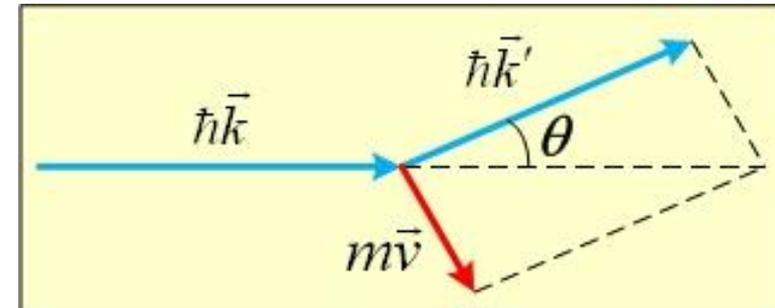
$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Закон сохранения импульса:

$$\hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + \vec{p}.$$

$$\left[\begin{array}{l} \hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \\ \hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + \vec{p}. \end{array} \right.$$

$$\hbar \frac{\omega}{c} + mc = \hbar \frac{\omega'}{c} + \sqrt{p^2 + m^2 c^2},$$



Разделим первое уравнение системы на скорость света c :

$$\boxtimes \frac{\omega}{c} + mc = \boxtimes \frac{\omega'}{c} + \sqrt{p^2 + m^2 c^2}, \quad \frac{\omega}{c} = k, \quad \frac{\omega'}{c} = k',$$

k, k' — модули волновых векторов.

$$\boxtimes k + mc = \boxtimes k' + \sqrt{p^2 + m^2 c^2},$$

$$\boxtimes (k - k') + mc = \sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

Возведём в квадрат

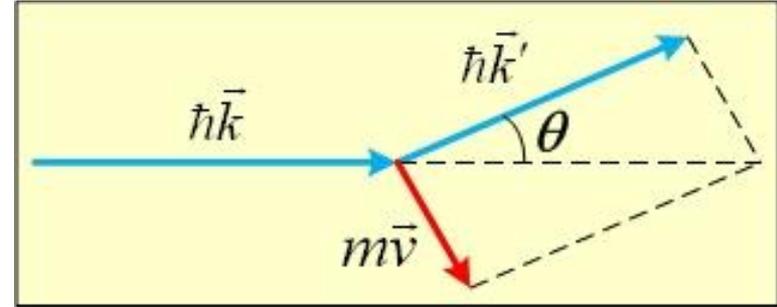
$$\left(\boxtimes (k - k') + mc \right)^2 = p^2 + m^2 c^2.$$

$$\boxtimes^2 (k - k')^2 + 2\boxtimes (k - k')mc + m^2 c^2 = p^2 + m^2 c^2.$$

$$p^2 = \boxtimes^2 (k - k')^2 + 2\boxtimes mc(k - k').$$

Второе уравнение системы – векторное. Для его решения применим теорему косинусов.

$$\begin{aligned} \hbar \vec{k} &= \hbar \vec{k}' + \vec{p}, \\ \hbar (\vec{k} - \vec{k}') &= \vec{p}, \end{aligned}$$



Возведём в квадрат:

$$\hbar^2 (\vec{k} - \vec{k}')^2 = p^2,$$

$$p^2 = \hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2).$$

$$\left[\begin{aligned} p^2 &= \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc(k - k'). \\ p^2 &= \hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2), \end{aligned} \right.$$

Первое уравнение получено из закона сохранения энергии, второе уравнение системы – из закона сохранения импульса.

$$\hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2) = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc(k - k').$$

$$\hbar^2 (k^2 - 2kk' \cos \vartheta + k'^2) = \hbar^2 (k - k')^2 + 2\hbar mc (k - k'),$$

$$\hbar^2 k^2 - 2\hbar^2 kk' \cos \vartheta + \hbar^2 k'^2 = \hbar^2 k^2 - 2\hbar^2 kk' + \hbar^2 k'^2 + 2\hbar mc (k - k'),$$

$$-\hbar kk' \cos \vartheta = -\hbar kk' + mc (k - k'),$$

$$\hbar kk' - \hbar kk' \cos \vartheta = mc (k - k'),$$

$$\hbar kk' (1 - \cos \vartheta) = mc (k - k'), \quad |: mc kk'$$

$$\frac{\hbar kk'}{mckk'} (1 - \cos \vartheta) = \frac{mc (k - k')}{mckk'},$$

$$\frac{\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{(k - k')}{kk'},$$

$$\frac{\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{1}{k'} - \frac{1}{k},$$

$$\frac{\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{1}{k'} - \frac{1}{k},$$

$$\frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{2\pi}{k'} - \frac{2\pi}{k},$$

$$\frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \lambda' - \lambda,$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{h}{mc}(1 - \cos \vartheta).$$

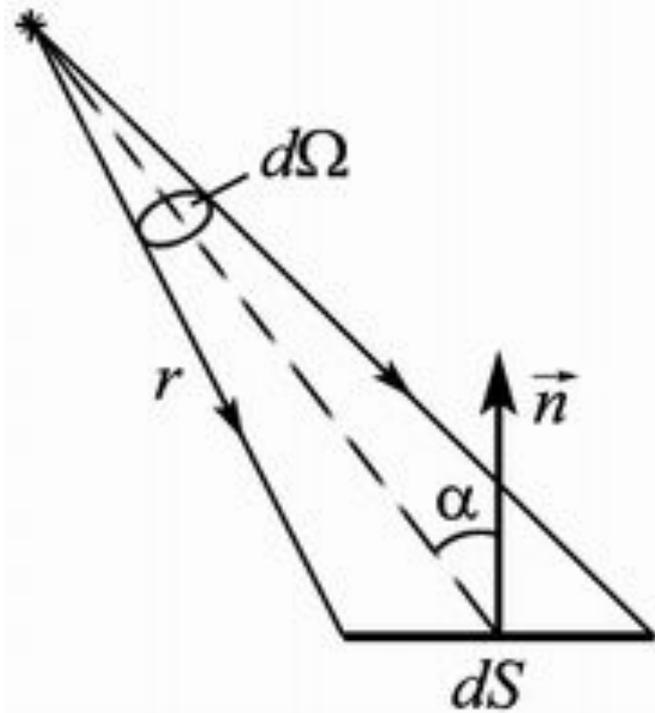
$$\lambda_{\text{K}} = \frac{2\pi\hbar}{mc} = \frac{h}{mc} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ (m)}.$$



ФОТОНЫ

Давление света

Световые, или фотометрические величины



Энергия, переносимая световыми лучами в единицу времени, называется **поток энергии (лучистым потоком)**, проходящим через площадку dS в телесный угол $d\Omega$.

Если нормаль к площадке dS образует с направлением излучения угол α , то необходимо рассматривать ее проекцию – видимую величину площадки, если ее рассматривать под углом α к нормали:

$$dS_{\perp} = dS \cos \alpha$$

Силой света источника I в заданном направлении называется световой поток, посылаемый им в этом направлении и отнесенный к единице телесного угла.

Единицы измерения: $[I] = \text{кд (кандела)}$

Световой поток для точечного источника

$$\Phi = \int I \cdot d\Omega$$

1 люмен – это **световой поток**, посылаемый источником с силой света в 1 канделу внутрь телесного угла в 1 стерадиан:

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$$

Освещенностью E некоторой поверхности называется световой поток, падающий на единицу площади освещаемой поверхности:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad [E] = \text{лк (люкс)}: \quad \text{лк} = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$$

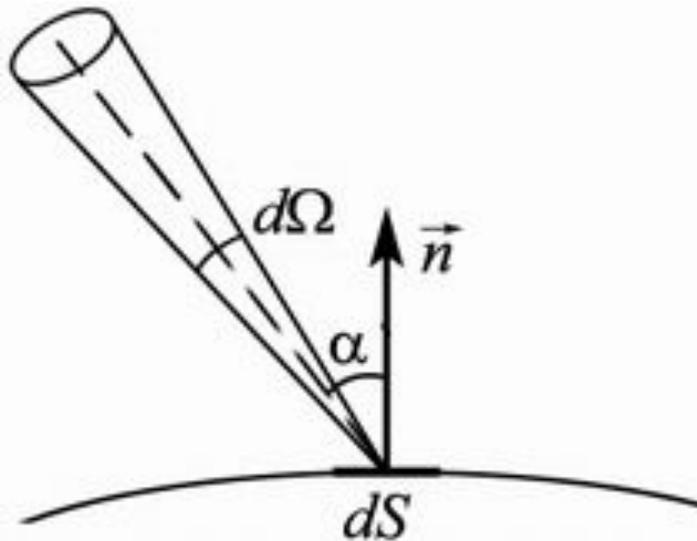
Для точечного источника

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad - \text{закон обратных квадратов:}$$

- освещенность, создаваемая точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния до него и прямо пропорциональна косинусу угла между направлением падающих лучей и нормалью к освещаемой поверхности.

Для протяженных источников вводятся следующие понятия:

- **Яркостью L** называется световой поток, исходящий из площадки dS в заданном направлении, отнесенный к единице телесного угла и к единице ее **видимой величины**:



$$L_{\alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dS \cdot \cos \alpha}$$

где

$$dI = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

- сила света площадки dS в том же направлении

Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям, называются **ламбертовскими (косинусными)**:

$$dI \sim \cos \alpha$$

Световое давление было впервые обнаружено и измерено в 1899 г. в Москве русским ученым П.Н. Лебедевым (1866–1912).

Давление света можно рассчитать по формуле:

$$P = J \frac{1 + \rho}{c}$$

J – интенсивность света,
 ρ – коэффициент отражения.

Если тело зеркально отражает, то $\rho = 1$ и

$$P = \frac{2J}{c}$$

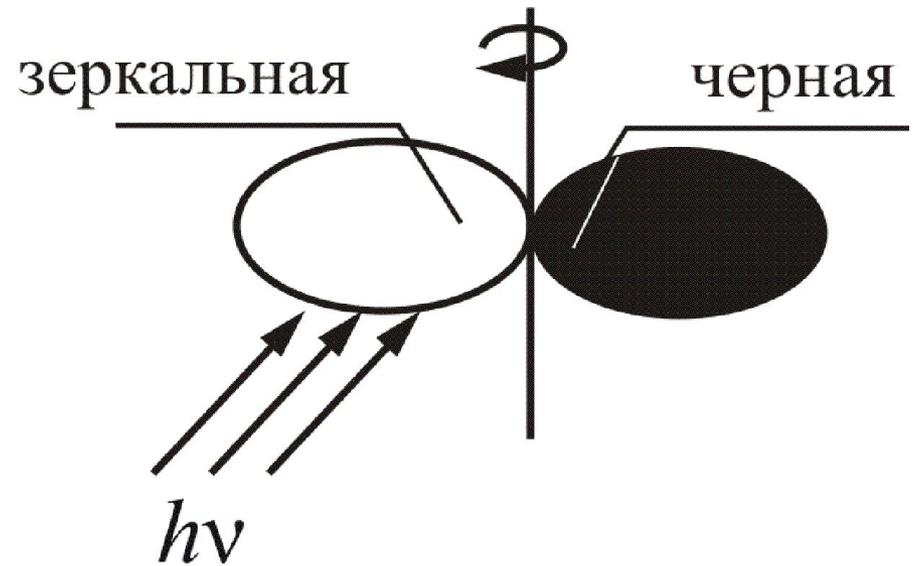
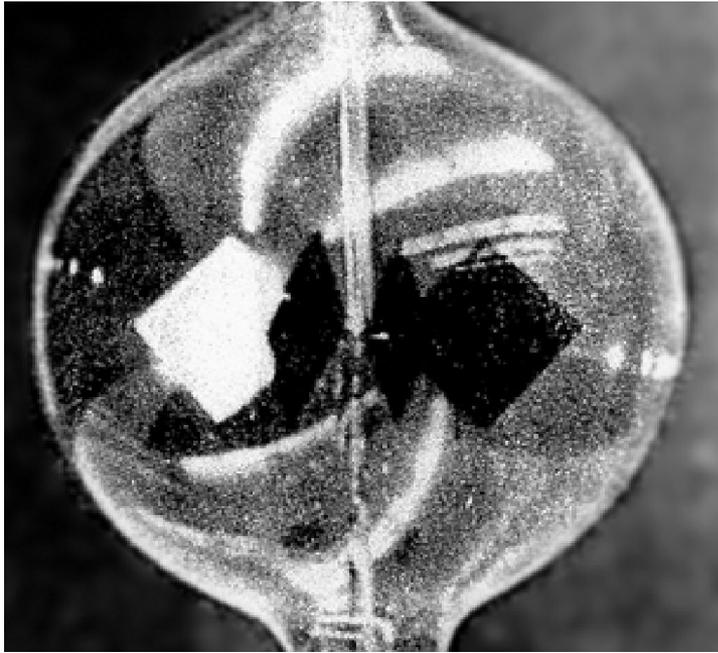
Если тело полностью поглощает, то

$\rho = 0$ и

$$P = \frac{J}{c}$$

При наклонном падении волны:

$$P = \frac{J}{c} (1 + \rho) \cos^2 \theta$$



- В своих опытах Лебедев П.Н. установил, что давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела. В опытах была использована вертушка, имеющая черные и зеркальные лепестки, помещенная в вакуумированную колбу. Было доказано, что **световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.**

□ Давление света и электромагнитный импульс настолько малы, что непосредственное их измерение затруднительно.

□ Так, зеркало, расположенное на расстоянии 1 м от источника света в миллион свечей (кандел), испытывает давление 10^{-7} Н/м².

□ Давление излучения Солнца на поверхность Земли равно $4,3 \cdot 10^{-6}$ Н/м²

□ Общее давление излучения Солнца на Землю равно $6 \cdot 10^8$ Н, что в 10^{13} раз меньше силы притяжения Солнца.

Давление света

Фотоны переносят импульс, следовательно, при взаимодействии с различными телами на тела могут действовать различные силы

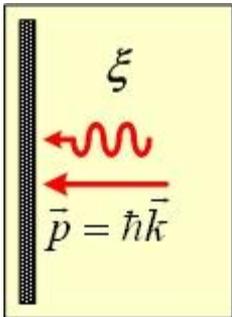
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

Давление равно величине силы, действующей на тело, делённой на площадь тела

$$P = \frac{1}{S} \left| \frac{d\vec{p}}{dt} \right|.$$

Пусть фотоны падают на поверхность тела. Нужно рассмотреть два случая – фотоны полностью поглощаются и второй – фотоны полностью отражаются поверхностью тела.

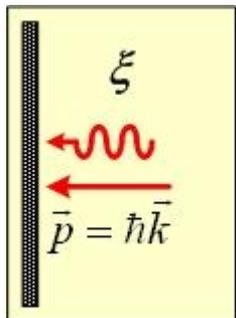
1. Фотоны полностью поглощаются.



Найдём импульс, передаваемый поверхности тела поглощаемым фотоном.

$$\Delta p_1 = \hbar k = \frac{\hbar \omega}{c}$$

Найдём импульс, передаваемый поверхности тела n поглощаемыми фотонами.



$$\Delta p_n = n \hbar k = \frac{n \hbar \omega}{c} = \frac{n E_1}{c}.$$

Здесь E_1 – энергия одного фотона, n – число фотонов.

Пусть $\Delta E = n E_1$ энергия, передаваемая поверхности тела n поглощаемыми фотонами

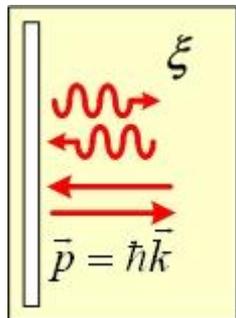
$$|\Delta p| = \frac{\Delta E}{c}.$$

$$P = \frac{1}{S} \left| \frac{\Delta p}{\Delta t} \right| = \frac{1}{S} \frac{\Delta E}{c \Delta t}.$$

$$P = \frac{W}{S \Delta t},$$

$W = \frac{1}{S} \frac{\Delta E}{\Delta t}$ – энергия, передаваемая единице площади поверхности тела излучением в единицу времени.

2. Фотоны полностью отражаются.



Найдём импульс, передаваемый поверхности тела фотоном, отразившимся от поверхности.

$$\Delta p_1 = 2\hbar k = 2 \frac{\hbar \omega}{c}.$$

Найдём импульс, передаваемый поверхности тела n отражёнными фотонами.

$$\Delta p_n = 2n\hbar k = 2 \frac{n\hbar \omega}{c} = 2 \frac{nE_1}{c}.$$

Здесь E_1 – энергия одного фотона, n – число фотонов.

Пусть $\Delta E = nE_1$ энергия, передаваемая поверхности тела n отражёнными фотонами

$$|\Delta p| = 2 \frac{\Delta E}{c}.$$

$$P = 2 \frac{1}{S} \left| \frac{\Delta p}{\Delta t} \right| = \frac{2}{S} \frac{\Delta E}{c \Delta t}.$$

$$P = 2 \frac{W}{c}.$$

3. Пусть на поверхность падают N фотонов, из них N_1 поглощаются, а N_2 — отражаются. $N_1 = N - N_2$. Тогда импульс, передаваемый поверхности тела

$$\begin{aligned}\Delta p_n &= N_1 \hbar k + 2N_2 \hbar k = (N_1 + 2N_2) \hbar k = (N - N_2 + 2N_2) \hbar k = \\ &= (N + N_2) \hbar k = \left(\frac{N}{N} + \frac{N_2}{N} \right) N \hbar k = \left(1 + \frac{N_2}{N} \right) N \hbar k.\end{aligned}$$

Обозначим
$$\frac{N_2}{N} = \rho.$$

Коэффициент ρ — это отношение числа отразившихся фотонов к общему числу фотонов. Поэтому назовём его *коэффициентом отражения*.

$$\Delta p_n = (1 + \rho) N \hbar k.$$

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad \text{поэтому} \quad \Delta p_n = (1 + \rho) \frac{N \hbar \omega}{c}.$$

$$\Delta p_n = (1 + \rho) \frac{N \hbar \omega}{c}.$$

Энергия одного фотона $E_1 = \hbar \omega$, поэтому $\Delta p_n = (1 + \rho) \frac{NE_1}{c}$.

Пусть $\Delta E = NE_1$ энергия всех фотонов (отражаемых и поглощаемых), которые падают на поверхность.

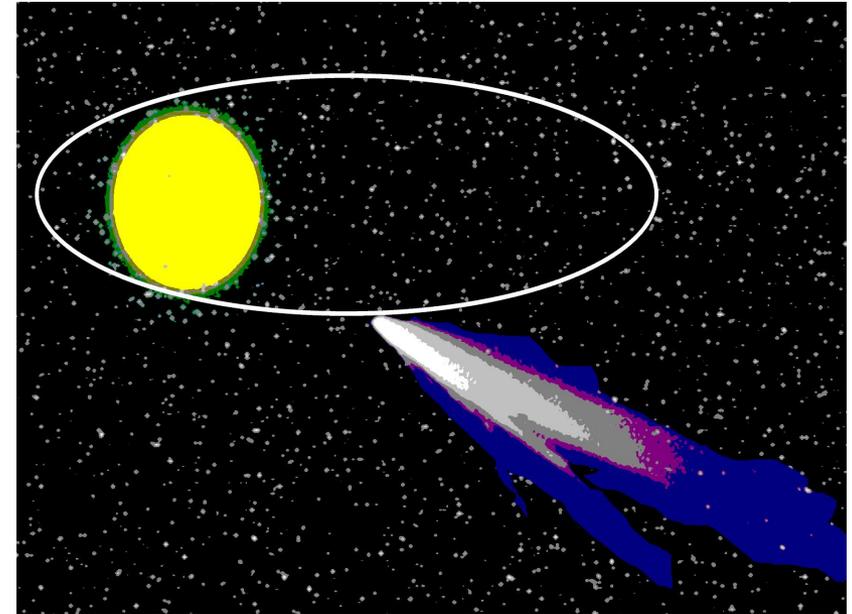
$$\Delta p_n = (1 + \rho) \frac{\Delta E}{c}.$$

Давление света

$$P = \frac{1}{S} \left| \frac{\Delta p_n}{\Delta t} \right| = (1 + \rho) \frac{1}{S} \frac{\Delta E}{c \Delta t}.$$

$W = \frac{1}{S} \frac{\Delta E}{\Delta t}$ — энергия, передаваемая единице площади поверхности тела излучением в единицу времени.

$$P = (1 + \rho) \frac{W}{c}.$$



- Итак, следующее из корпускулярной теории заключение, что *световое излучение оказывает давление на материальные предметы, причем величина давления пропорциональна интенсивности излучения*, прекрасно подтверждается в экспериментах.
- Одним из следствий давления солнечного света, является то, что кометы, пролетающие вблизи Солнца, имеют «хвосты»

Корпускулярно-волновой дуализм света

Двойственная природа света

Впервые проблема корпускулярно-волнового дуализма проявила себя при исследовании природы света. **В XVII веке Исаак Ньютон** предложил считать свет *потоком мельчайших корпускул*. Это позволяло просто объяснить ряд наиболее характерных свойств света – например, *прямолинейность световых лучей* и *закон отражения*, согласно которому угол отражения света равен углу падения. Вообще, вся *геометрическая оптика* прекрасно согласуется с *корпускулярной теорией света*.

Но явления интерференции и дифракции света никак в эту теорию не вписывались. Объяснить их ученым удалось лишь в XIX веке создателям *волновой теории* света.

А теория электромагнитного поля и знаменитые уравнения Максвелла, казалось бы, вообще поставили точку в этой проблеме. Оказалось, что свет – это просто *частный случай электромагнитных волн*, то есть процесса распространения в пространстве электромагнитного поля. Мало того, волновая оптика объяснила не только те явления, которые не объяснялись с помощью корпускулярной теории, но и вообще все известные к XIX веку световые эффекты. И все законы геометрической оптики тоже оказалось возможным доказать в рамках волновой оптики.

Корпускулярно-волновой дуализм света

Однако уже в самом начале XX века опять возродилась корпускулярная теория света, так как были обнаружены явления, которые с помощью волновой теории объяснить не удавалось. Это – *давление света, фотоэффект, Комpton-эффект и законы теплового излучения*. В рамках корпускулярной теории эти явления прекрасно объяснялись, и корпускулы (частицы) света даже получили специальное название.

Макс Планк назвал их *световыми квантами* (по-русски – *порциями*), а **Альберт Эйнштейн** – *фотонами*. Оба этих названия прижились и употребляются до сих пор.

В итоге сложилась удивительная ситуация – сосуществование двух серьезных научных теорий, каждая из которых объясняла одни свойства света, но не могла объяснить другие. Вместе же эти две теории полностью дополняли друг друга. Только что мы рассмотрели ряд явлений, где свет ведет себя как поток частиц. Но явление интерференции и дифракции могут быть объяснены только с позиции волновой теории.

Что же такое свет?

Что

Корпускулярно-волновой дуализм света

В. Брегг писал: «неужели мы должны считать свет состоящим из корпускул в понедельник, вторник и среду, когда проводим опыты с фотоэффектом и эффектом Комптона, и представлять себе его волнами в четверг, пятницу и субботу, когда работаем с явлениями дифракции и интерференции?» Выход из этой ситуации был найден следующий. Во-первых, электромагнитное излучение и его разновидность свет – это *более сложный* объект нашего мира, чем волна или корпускула. Во-вторых, нужна *синтезированная теория*, объединяющая в себе и волновую, и корпускулярную теории. Она была создана и получила название *квантовой физики*.

Очень важно, что квантовая физика не отвергает ни корпускулярную, ни волновую теории. Каждая из них имеет свои преимущества и свой, достаточно развитый математический аппарат.

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

При уменьшении длины волны все явственнее проявляются корпускулярные свойства. Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются слабо (например, рентгеновское излучение). Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения квантовые свойства проявляются слабо.