

5.8.

# Электронны

Катодные лучи.

Открытие электрона.

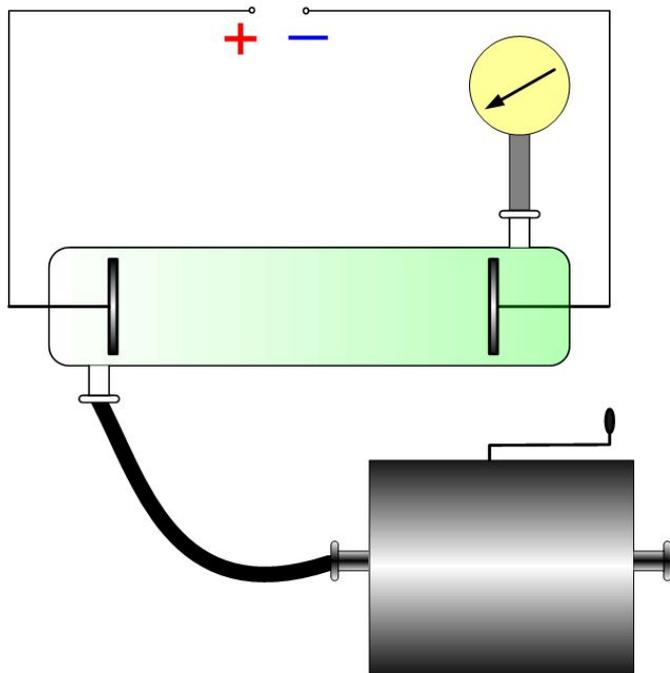
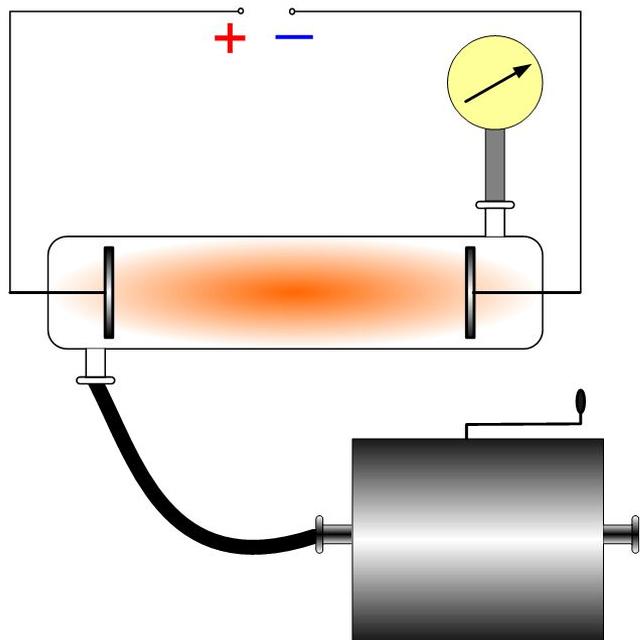
# Катодные лучи

В 1858 г. немецкий физик и изобретатель Генрих Иоганн Гейсслер (1815 - 1879) сконструировал насос, в котором роль поршня играл ртутный столб, что позволило достигать очень малых давлений в закрытом сосуде.

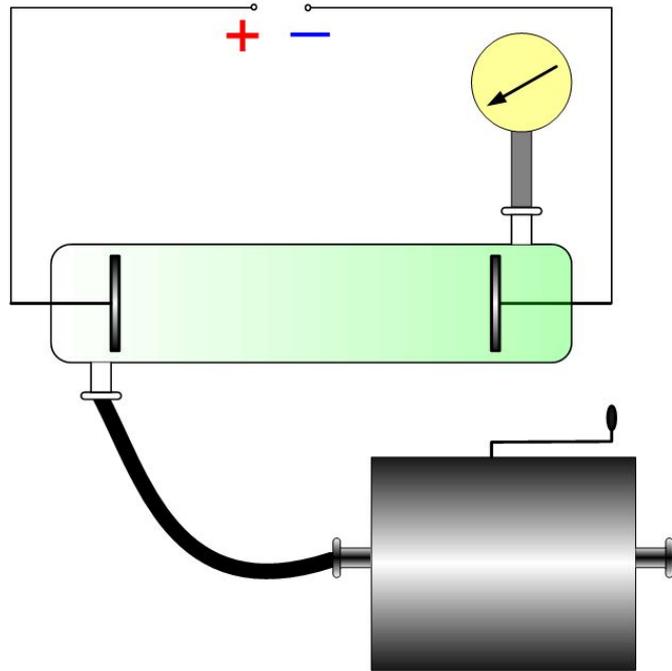
В 1858 - 59 г.г. другой немецкий физик Юлиус Плюккер (1801 - 1868) провел ряд экспериментов по исследованию проводимости газов при низком давлении.

При прохождении тока газ светится, а когда газ откачан из трубки почти полностью, вблизи катода (т.е. электрода, подключенного к отрицательному полюсу батареи) возникает другое, зеленоватое свечение.

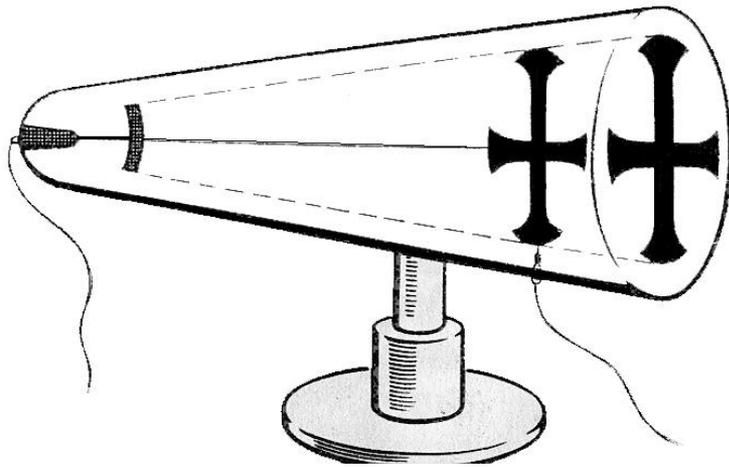
Несколько лет спустя Э. Гольдштейн назвал его *Kathodenstrahlen*, что означает *катодные лучи*.



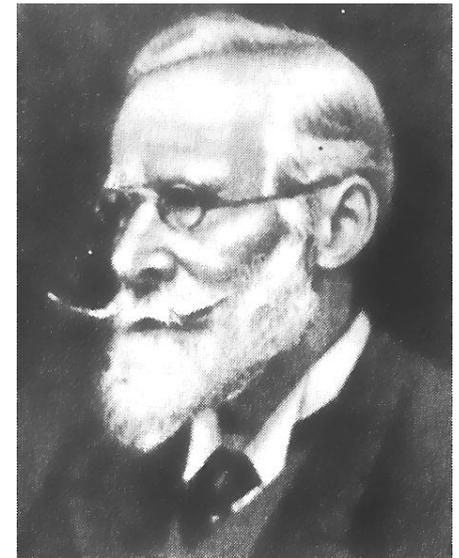
# Катодные лучи



- Позже было установлено, что
- 1) твердые тела, установленные около катода отбрасывают тени на светящиеся стенки трубки (И. В. Гитторф);
  - 2) лучи распространяются прямолинейно.



«Крест Крукса» - опыт, демонстрирующий тень от катодных лучей.



Уильям Крукс  
(1832-1919)

Гипотезы:

1) лучи - поток молекул материала катода (Плюккер)

2) лучи - ионизированные молекулы газа, остающегося в трубке (У. Крукс).

Э. Гольдштейн показал, что лучи распространяются на расстояние много больше длины свободного пробега молекул в трубке.

3) лучи сколько-нибудь заметно не отклоняются наэлектризованными пластинами и проходят сквозь тонкую золотую фольгу (Г. Герц), поэтому он считал эти лучи электромагнитными волнами.

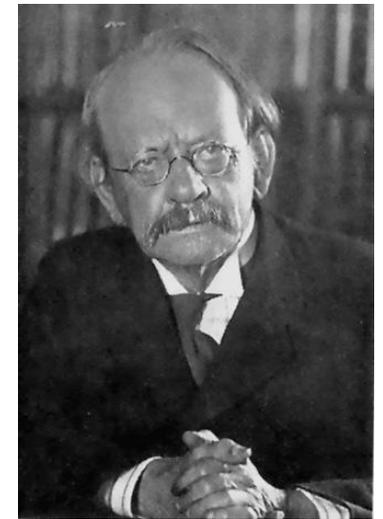
Впоследствии (в 1895 г.) в ходе опытов с «трубкой Крукса» сделал свое открытие В.К.Рентген.

# Катодные лучи

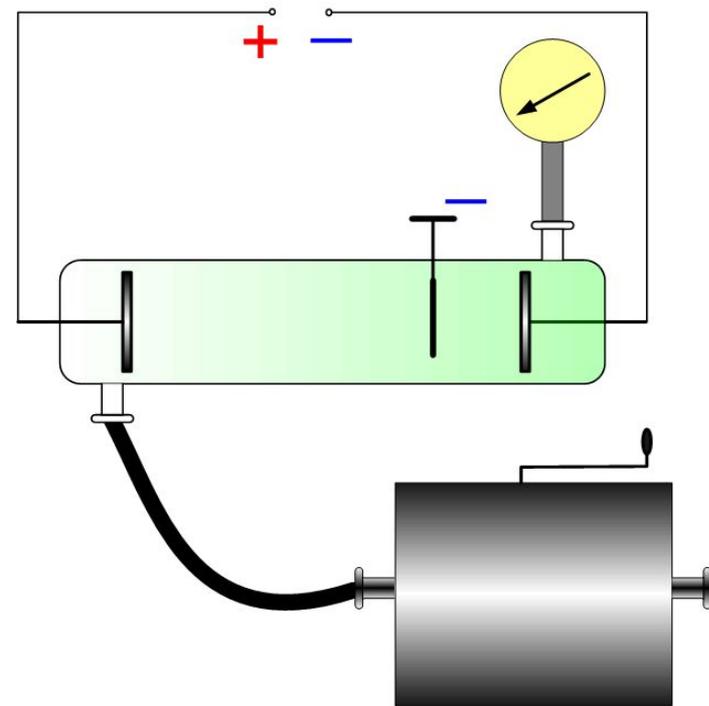
В 1895 г. Ж. Б. Перрен доказал, что под действием катодных лучей на коллекторе, установленном внутри лучевой трубки, накапливается отрицательный заряд. Т. е. лучи - отрицательно заряженные частицы, но не молекулы (не ионы).

В 1897 г. Томсон зарегистрировал отклонение катодных лучей под действием внешнего электрического поля.

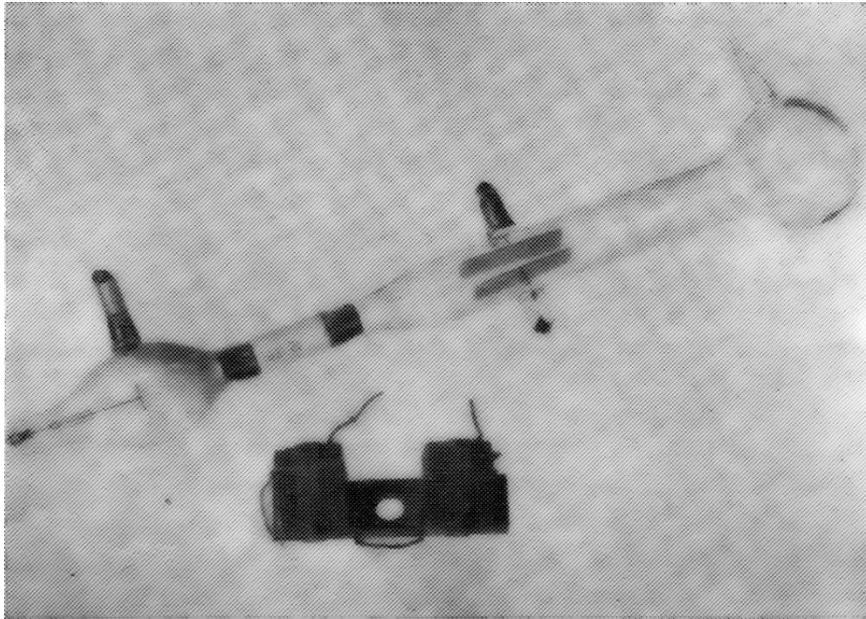
Это удалось благодаря более совершенным вакуумным насосам. Вскоре этот результат повторил и Э. Гольдштейн.



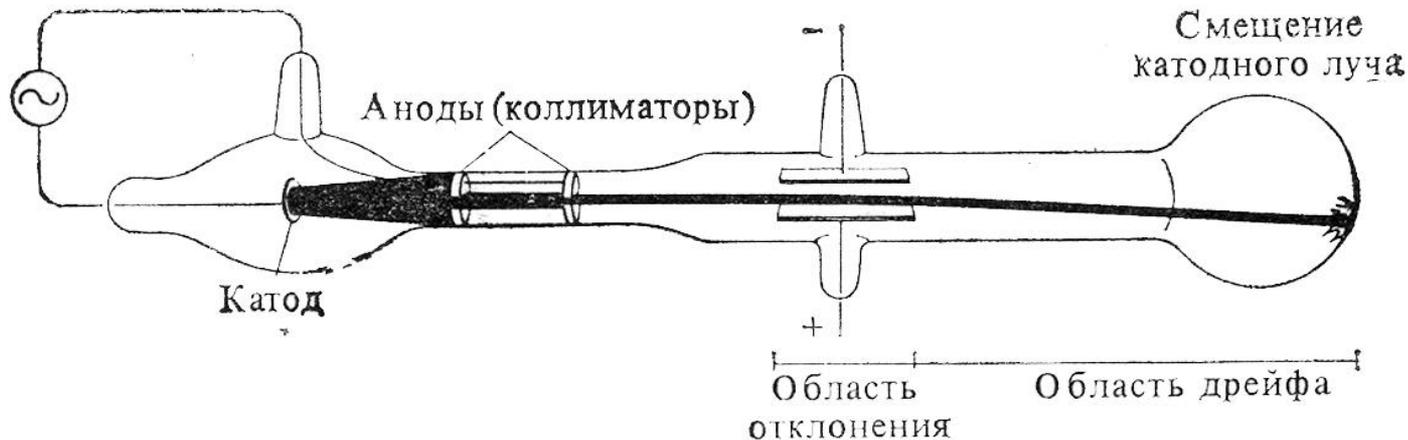
Джозеф Джон Томсон  
(1856 - 1940)



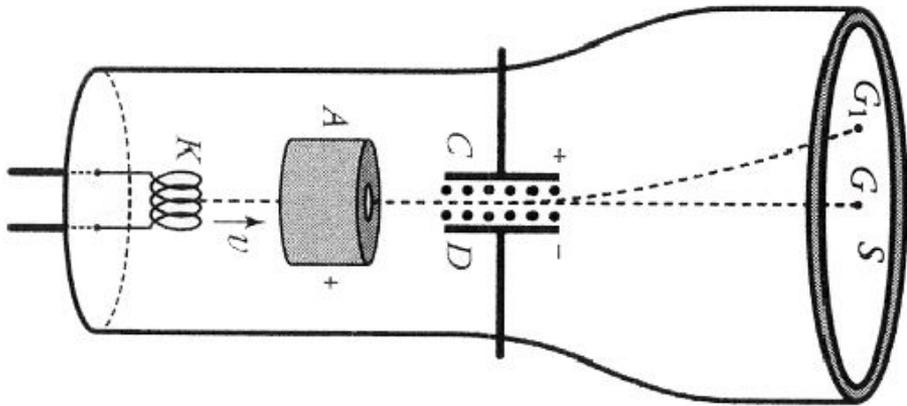
# Открытие электрона



С помощью такой трубки Дж. Дж. Томсон исследовал отклонение катодных лучей электрическим полем. Он установил, катодные лучи - это поток частиц с отрицательным зарядом и отношением заряда к массе примерно  $2 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

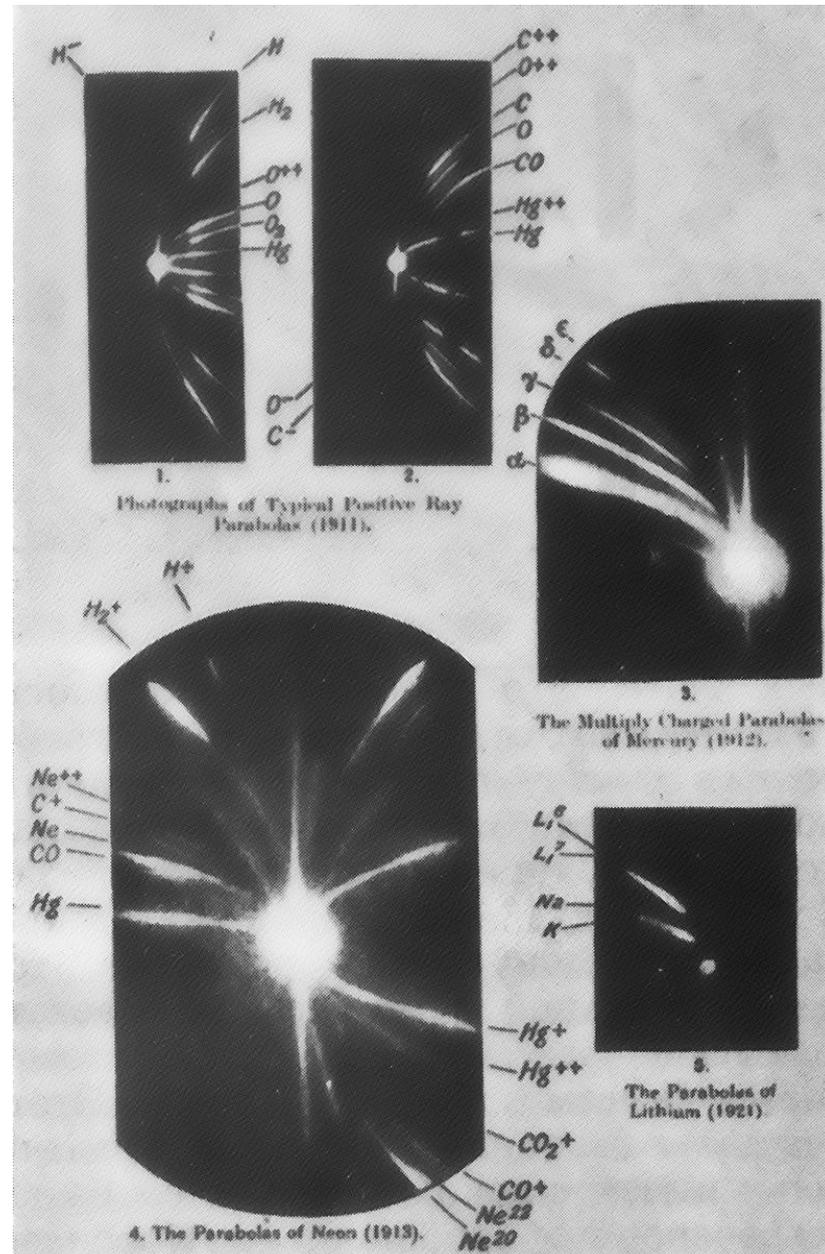


# Открытие электрона



Трубка для исследования электронов с магнитной фокусировкой

Фотографии треков электронов и других заряженных частиц, иллюстрирующие метод парабол



# Кавендишская лаборатория

Лаборатория, созданная по завещанию чудаковатого лорда Генри Кавендиша в 1871 году, стала крупнейшим исследовательским центром.



Джеймс Клерк  
Максвелл  
(1831 - 1879)



Джозеф Джон  
Томсон  
(1856 - 1940)



Эрнест Резерфорд  
(1871 - 1937)

Великие ученые - руководители Кавендишской лаборатории

5.9.

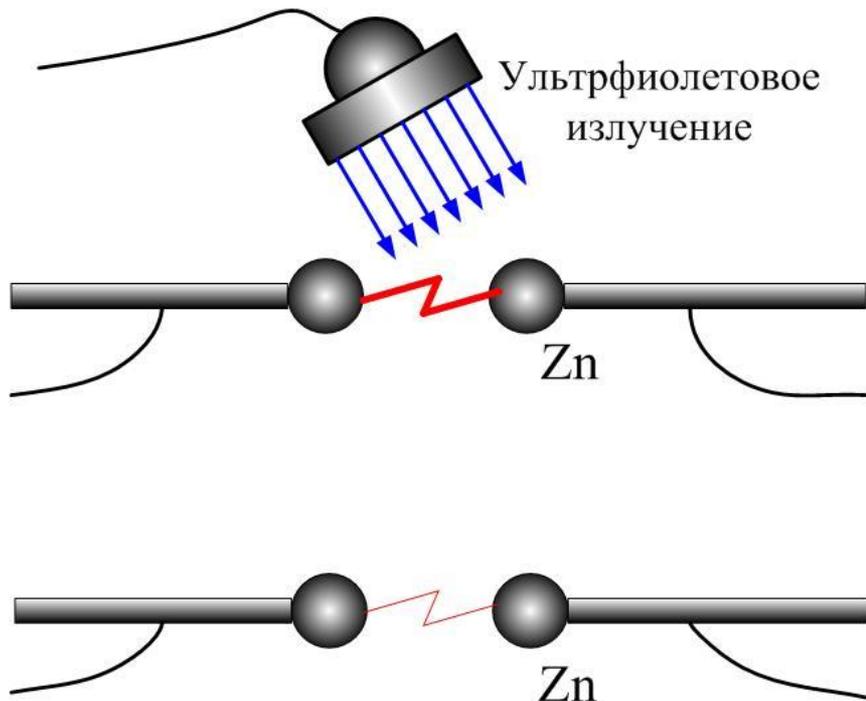


# ФОТОНЫ

Фотоэффект.

# Открытие фотоэффекта Герцем

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

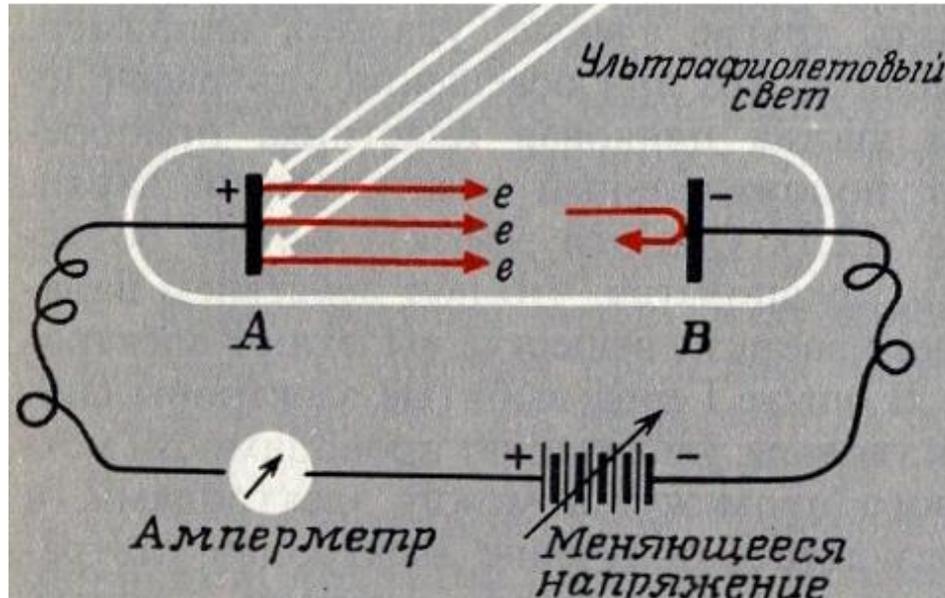


Генрих Рудольф Герц  
(1857 - 1894)

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

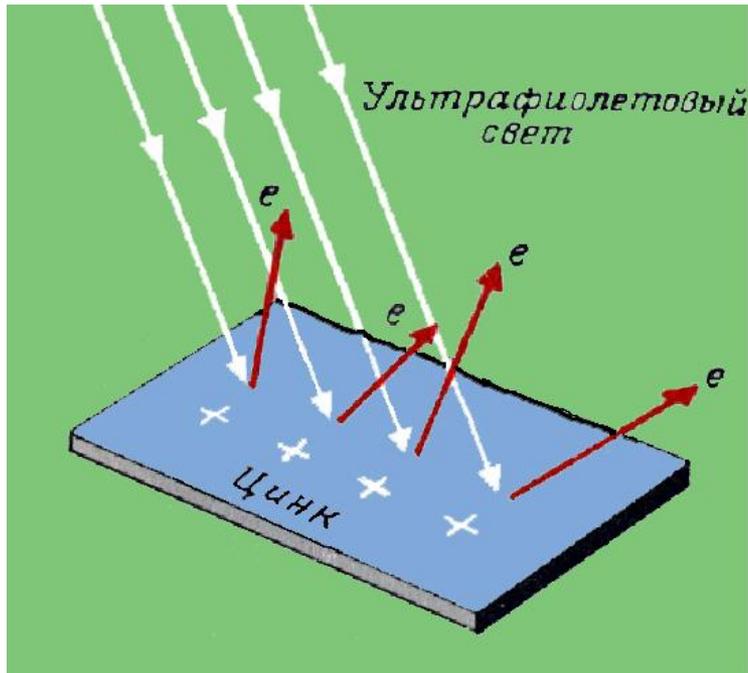


Александр Григорьевич  
Столетов  
(1839 - 1896)

В 1888 - 1889 г. Столетов исследовал влияние излучения ртутной лампы на прохождение тока через плоский конденсатор с цинковыми пластинами. Он установил, что

- 1) на цинковые пластины действуют только УФ-лучи;
- 2) направление тока наблюдается только при облучении «отрицательной» пластины;
- 3) сила тока пропорциональна световому потоку;
- 4) нет никакой задержки между началом освещения пластины и возникновением тока (безинерционность фотоэффекта).

# Исследования Леннарда и Томсона



1. Леннард 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:

$$U_3 = k\nu - U_0$$

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



Джозеф Джон Томсон  
(1856 - 1940)

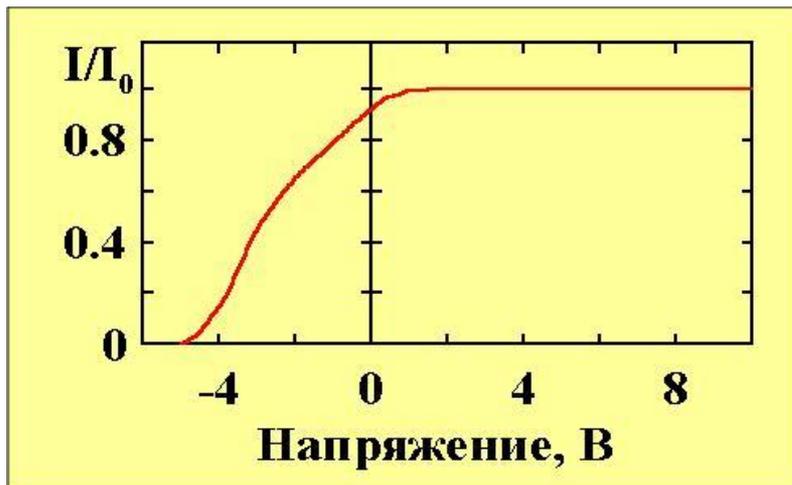
# Законы фотоэффекта

Сила тока пропорциональна световому потоку, следовательно,

*1. Количество фотоэлектронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.*

$$\frac{mV^2}{2} = eU_3 \quad U_3 = k\nu - U_0 \quad \frac{mV^2}{2} = k\nu - U_0$$

*2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.*



Зависимость силы фототока от приложенной разности потенциалов.

# 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.

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

Это уравнение позволило объяснить все наблюдаемые свойства фотоэффекта.

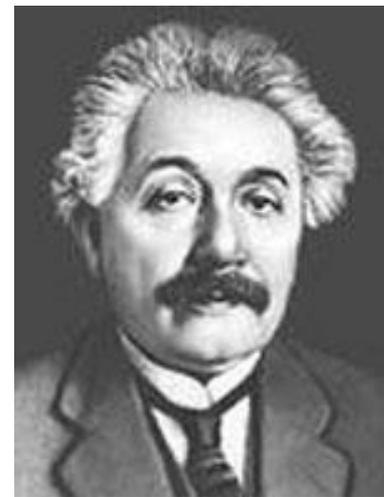
1. Безинерционность.
2. Сила тока пропорциональна числу поглощенных квантов света, т.е. энергии света.

$$3. \frac{mV^2}{2} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}$$

4. «Красная граница»

$$E_{\text{КИН}} = 0$$

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}$$



Альберт Эйнштейн  
(1879 - 1955)

# Свойства фотонов

Фотон обладает энергией

$$E = h\nu.$$

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

$$p = mc$$

и, следовательно, равен

$$p = h\nu/c = h/\lambda,$$

где  $\lambda$  — длина волны.

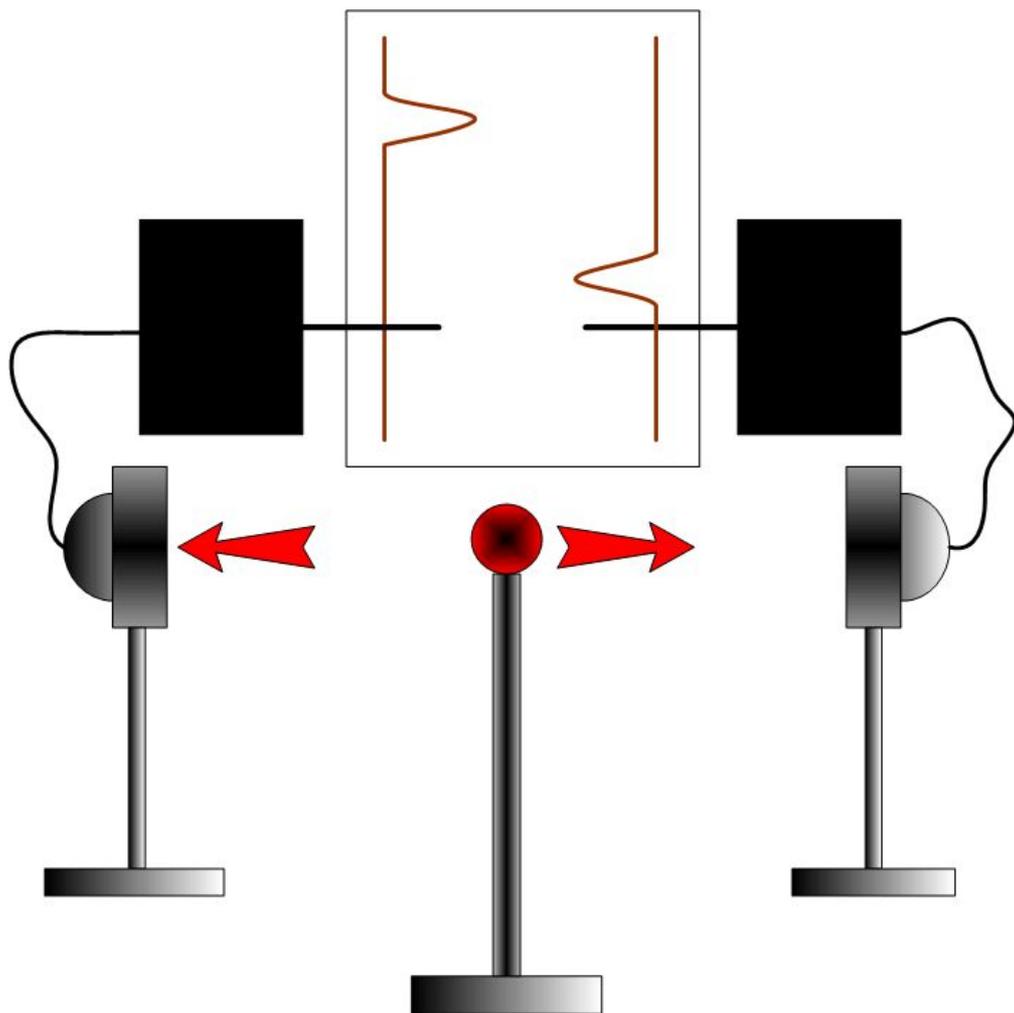
5.10.



# ФОТОНЫ

Опыт Боте.

# Другие доказательства существования фотонов. Опыт Ботэ.



Два регистрирующих прибора фиксируют появление фотонов из одного источника независимо друг от друга.

5.11.

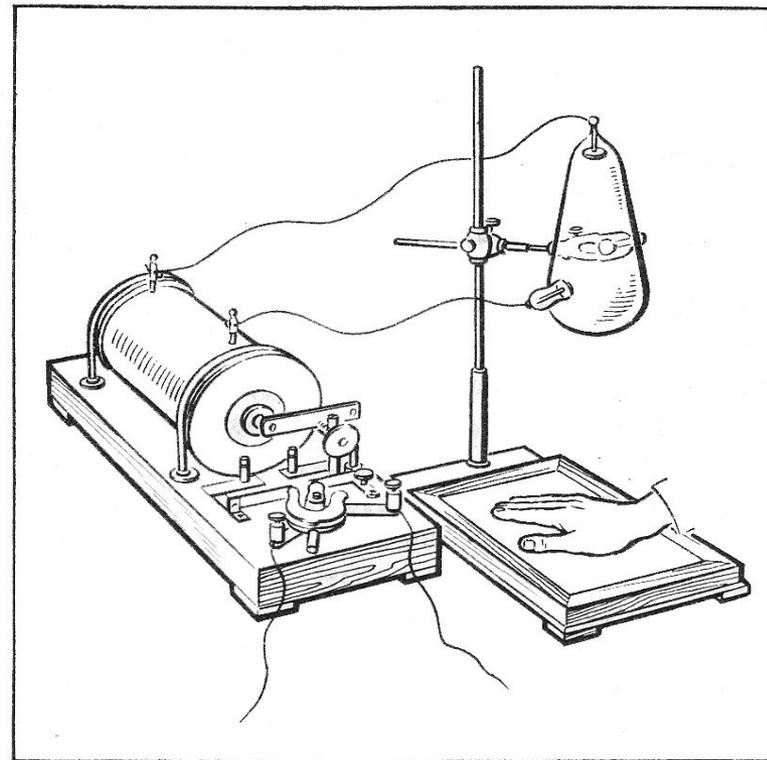
# **ФОТОНЫ**

**Коротковолновая граница  
спектра тормозного  
рентгеновского излучения.**

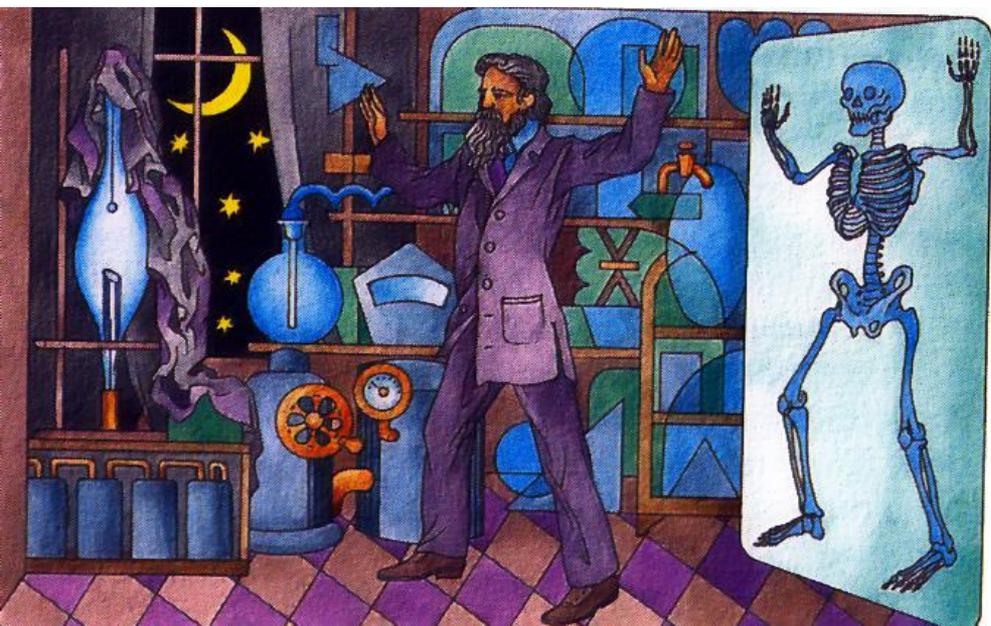
# Рентгеновское излучение (X-лучи)



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.

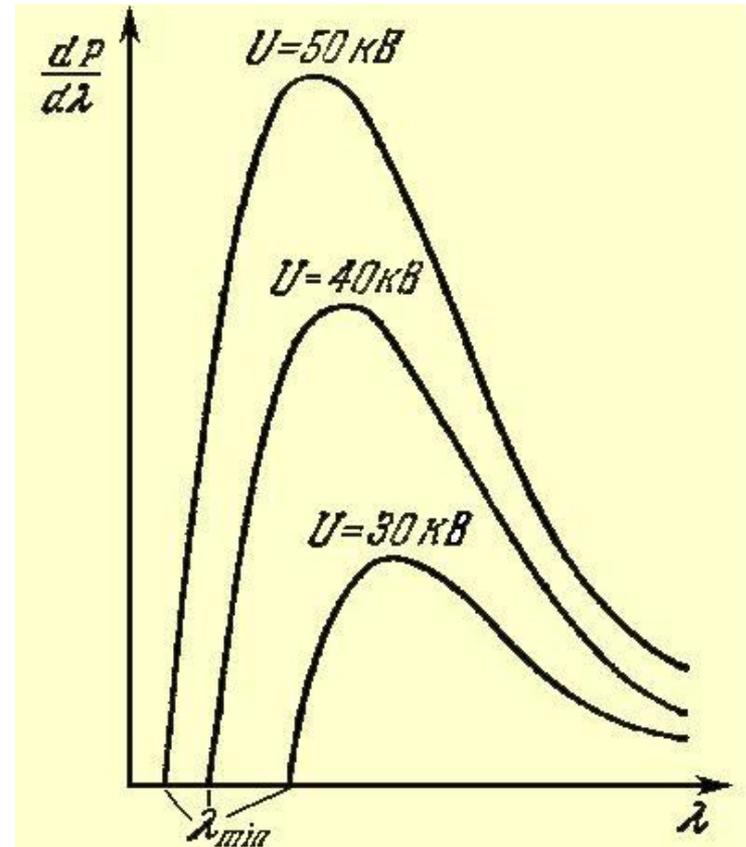
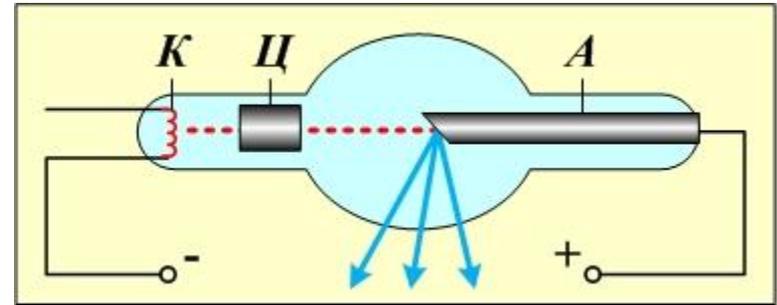


# Тормозное и характеристическое рентгеновское излучение

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

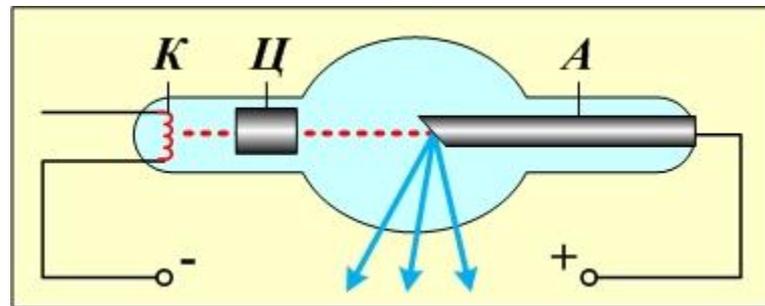
Для тормозного излучения наблюдается некоторая граничная частота (или наименьшая длина волны), выше которой электромагнитные волны не излучаются. Величина наименьшей длины волны (наибольшей частоты) зависит от величины ускоряющего напряжения (см. рис.)

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.

$$h\nu \leq eU.$$

$$\nu = \frac{2\pi c}{\lambda},$$

$$h\nu = \frac{2\pi hc}{\lambda} \leq eU, \quad \lambda_{\min} = \frac{2\pi hc}{eU}, \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU},$$

что совпадает с экспериментально полученной величиной

$$\lambda_{\min} = \frac{12390}{U},$$

где длина волны выражена в ангстремах, напряжение – в вольтах.

5.12.

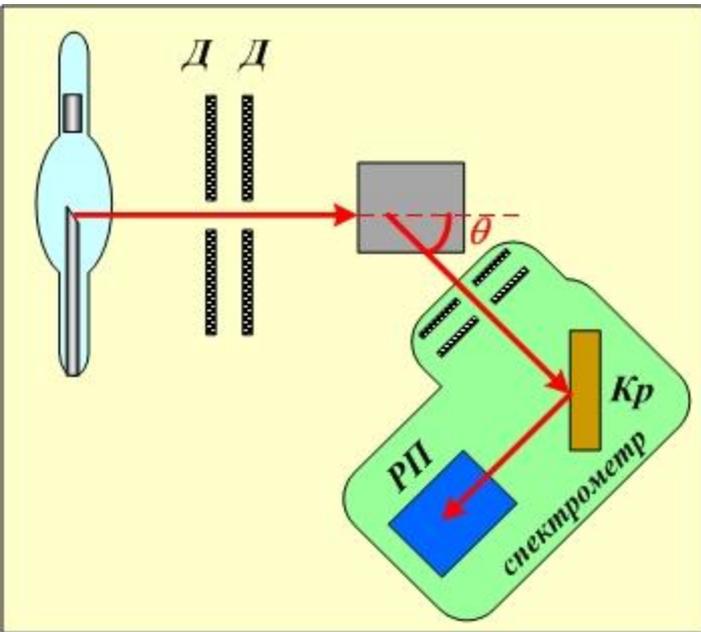


# ФОТОНЫ

Эффект Комптона.

# Эффект Комптона.

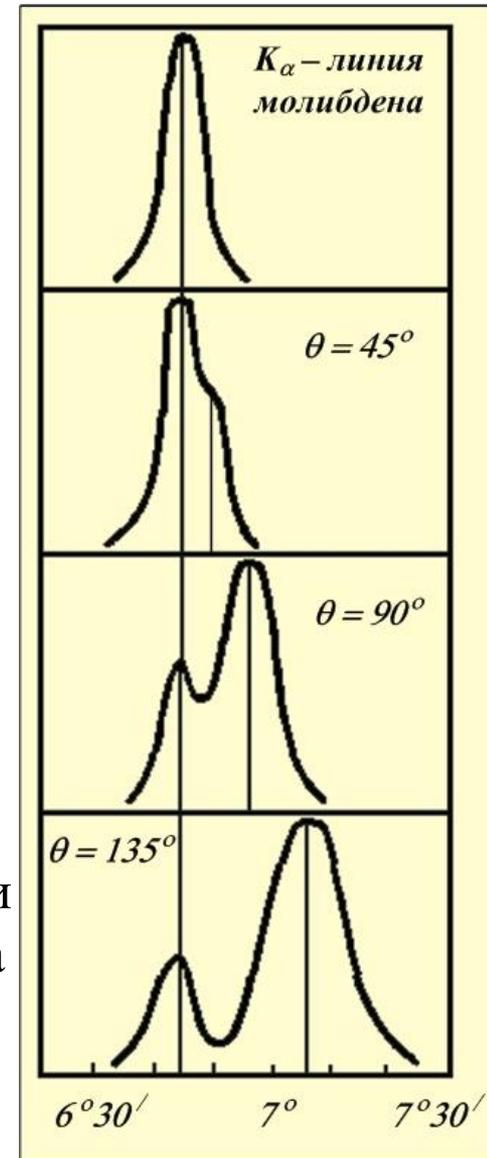
(Неупругое рассеяние рентгеновских фотонов на электронах)



Э. Комптон в 1922 – 23 г. исследовал взаимодействие характеристического рентгеновского излучения молибдена ( $K_{\alpha}$  – 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.



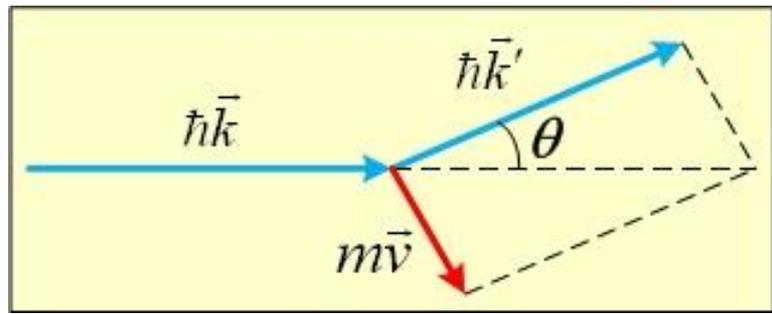
Экспериментально было установлено, что изменение длины волны при рассеянии рентгеновского излучения составляет

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

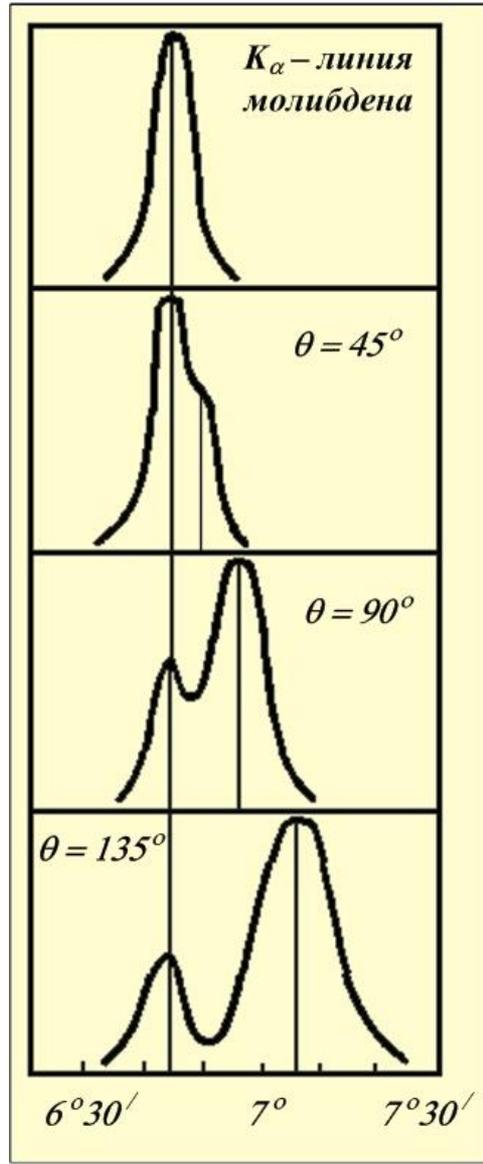
$$\Lambda = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

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,  
 $\vartheta$  — угол рассеяния,  $\vec{k}'$  — импульс фотона после столкновения.



*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:

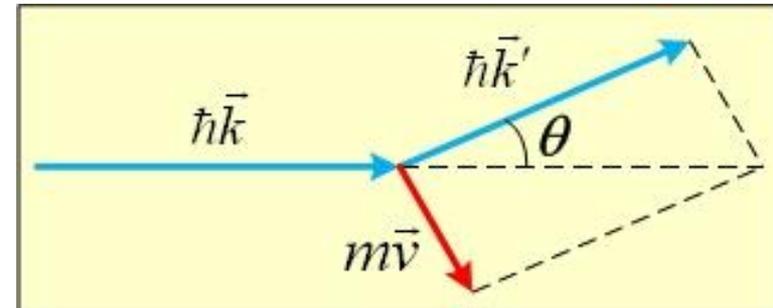
$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}.$$

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:

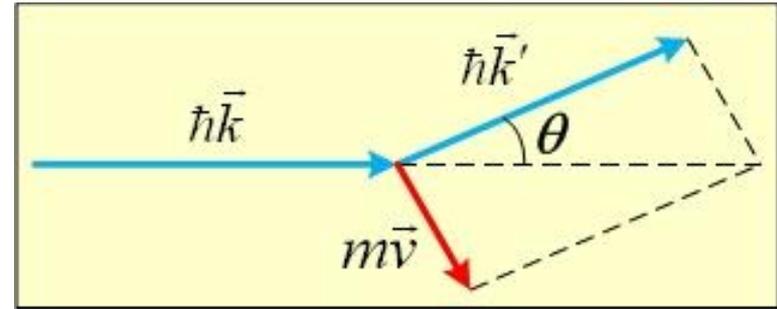
$$\hbar^2 (\vec{k} - \vec{k}')^2 = p^2,$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.13.

# ФОТОНЫ

Давление света.

# Давление света.

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

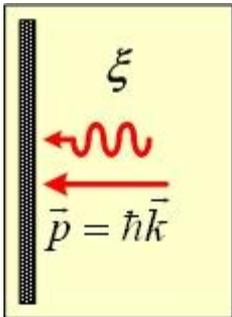
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

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.

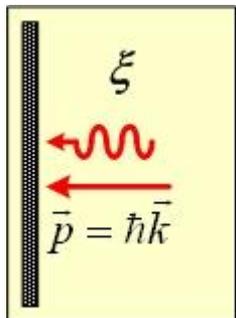
## 1. Фотоны полностью поглощаются.



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

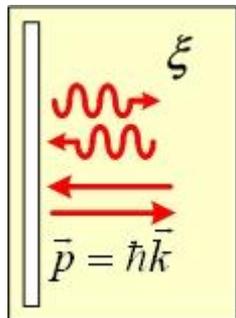
$$|\Delta p| = \frac{\Delta E}{c}.$$

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

$$P = \frac{W}{c},$$

$W = \frac{1}{S} \frac{\Delta E}{\Delta t}$  – 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  $\rho$  есть 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.

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

# Корпускулярно-волновой дуализм света

Свет по своей природе дуалистичен:  
с одной стороны он проявляет ярко  
выраженные волновые свойства -  
интерференцию, дифракцию, а с другой  
проявляет себя, как поток частиц -  
фотонов.