

# ЛЕКЦИЯ № 5

## Раздел 6. Элементы квантовой механики и атомной физики

К середине XIX в. казалось было однозначно установлено, что свет – это электромагнитная волна и были хорошо изучены оптические (волновые) свойства излучения: интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия.

Однако к концу XIX в. были обнаружены явления, явно противоречащие волновым представлениям о природе излучения (тепловое излучение тел, фотоэффект, эффект Комптона, излучение атомов и их строение и др.).

### 1. Квантово-оптические явления

Чтобы разрешить противоречия, немецкий физик Макс Планк в 1900 г. (14 декабря 1900 г.) высказал гипотезу о том, что *излучение испускается (а позже было признано, что и поглощается и распространяется) порциями (квантами, корпускулами), т. е. особыми частицами (эти частицы позже были названы фотонами), энергия, масса и импульс которых неразрывно связаны с их волновыми характеристиками:*

$$W_{\phi} = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} = mc^2; \quad (5-1)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k, \quad (5-2)$$

где  $h = 6,623 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

(  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.)

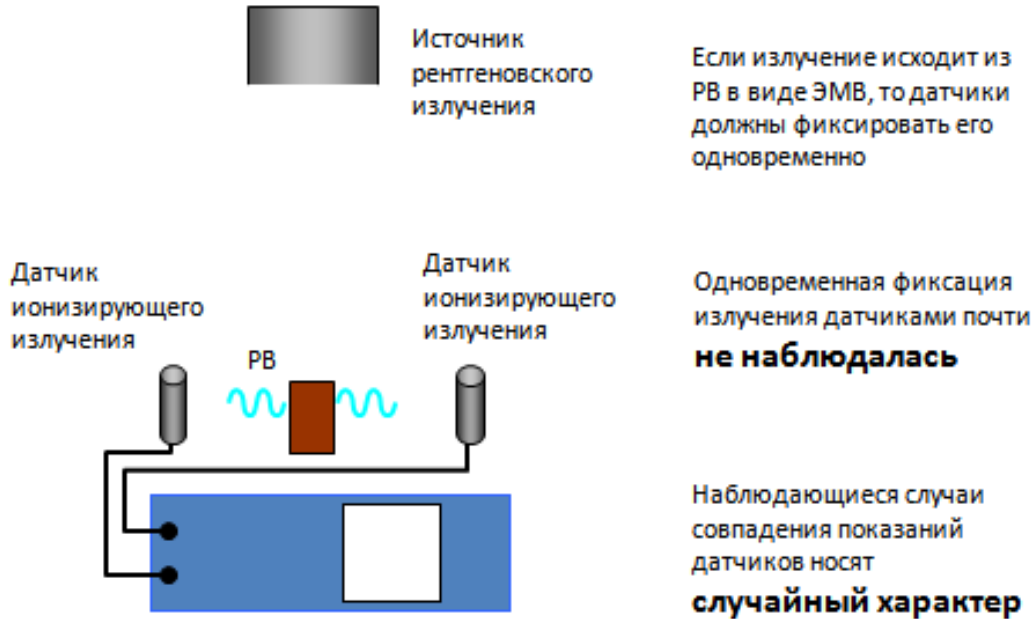
Таким образом, оказалось, что *излучение – это поток частиц (корпускул, квантов) – фотонов, которым при этом присущи и волновые свойства.*

Свойства фотонов как частиц достаточно необычны. Так, фотоны не имеют массы покоя, движутся только со скоростью света, имеют энергию, импульс, спин, релятивистскую массу, но вместе с тем могут интерферировать.

$$m_f = \frac{h}{c\lambda} = \frac{10^{-34}}{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-7}} \sim 10^{-36} \text{ кг.}$$

Корпускулярную природу излучения подтверждает опыт Боте:

### Опыт Боте



#### 1.1. Тепловое излучение

Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны. Излучение сильно нагретых тел обнаруживается непосредственно органами чувств человека (излучение Солнца, лампы накаливания, костра, нагретого металла). Излучение менее нагретых тел, хотя и не видно, тем не менее существует и обнаруживается приборами (например, микроволновыми датчиками автомобильных охранных систем или автоматически открывающихся дверей, реагирующими на излучение тела приближающегося человека). Тепловое излучение тел не следует путать с отраженным или рассеянным телами излучением, которое упало на эти тела от других источников излучения.

Основные характеристики теплового излучения:

1) световой поток  $\equiv$  мощность излучения – это величина энергии, излучаемая веществом в единицу времени:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt}, \quad (5-3)$$
$$[\Phi_e] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

2) энергетическая светимость излучения – это величина энергии, излучаемая веществом в единицу времени с поверхности единичной площади:

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \quad (5-4)$$

$$[R_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3) **излучательная способность вещества**  $\equiv$  спектральная плотность энергетической светимости – это величина энергии, излучаемая веществом в единицу времени с поверхности единичной площади в единичном интервале частот или в единичном интервале длин волн:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{dR_e}{d\omega}, \quad [\varepsilon(\omega)] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}, \quad (5-5a)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{dR_e}{d\lambda}, \quad [\varepsilon(\lambda)] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \quad (5-5б)$$

Связь между  $\varepsilon(\omega)$  и  $\varepsilon(\lambda)$  – ?

Т. к. энергетическая светимость вещества одинаковая при данной  $T$ , то можно записать

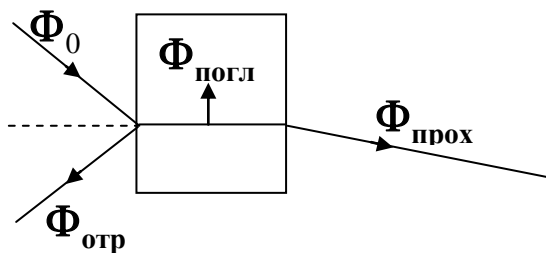
$$\varepsilon(\omega)d\omega = \varepsilon(\lambda)d\lambda$$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad d\omega = \left| -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda \right|$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \varepsilon(\omega). \quad (5-6)$$

Основная задача при объяснении механизма теплового излучения – найти выражение для  $\varepsilon(\omega)$  или  $\varepsilon(\lambda)$ .

При облучении электромагнитным излучением любого вещества часть светового потока отражается  $\Phi_{\text{отр}}$ , часть поглощается веществом  $\Phi_{\text{погл}}$  и остаток проходит сквозь вещество  $\Phi_{\text{прох}}$ .



$$\Phi_0 = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{прох}}$$

где  $\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_0}$  – отражательная способность вещества (коэффициент отражения);

$\tau = \frac{\Phi_{\text{прох}}}{\Phi_0}$  – коэффициент прозрачности вещества;

$a = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_0}$  – поглощательная способность вещества (коэффициент поглощения).

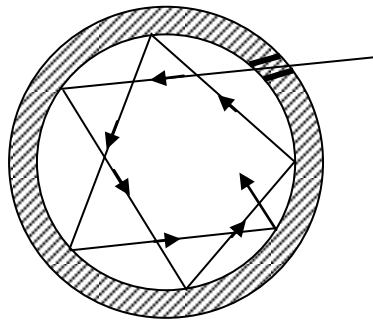
$$1 = \rho + a + \tau$$

Свойства теплового излучения (интенсивность, диапазон длин волн, распределение интенсивности излучения по длинам волн) определяются характеристиками поверхности тела и его температурой.

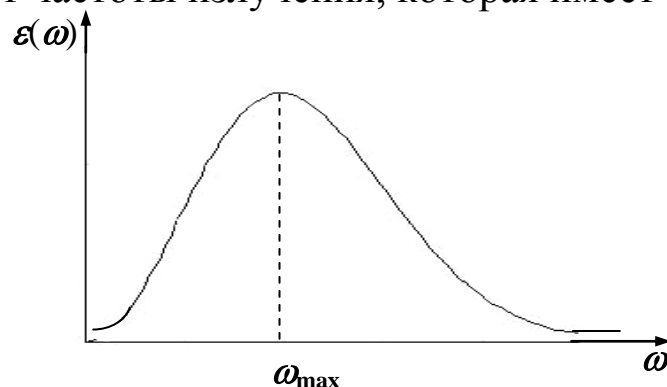
Наиболее простой моделью нагретых тел является модель абсолютно черного тела (АЧТ). Вещество, у которого  $\rho = 0$  и  $\tau = 0$  (ничего не отражает и ничего не пропускает, а все поглощает  $a = 1$ ), называется абсолютно черным телом (АЧТ).

Свойства излучения АЧТ определяются только его температурой.

Модель АЧТ:



Экспериментально была исследована зависимость излучательной способности АЧТ от частоты излучения, которая имеет вид:



Все попытки классической физики объяснить механизм теплового излучения с позиции электромагнитной теории не привели к успеху.

Первой была попытка Кирхгофа, который установил следующий закон (закон Кирхгофа для теплового излучения):

если тела находятся при одинаковой температуре, то отношение излучательной способности тел к их поглощательной способности

для всех тел абсолютно одинаковая и является некоторой универсальной функцией (универсальной функцией Кирхгофа), зависящей только от частоты излучения и абсолютной температуры тела

$$\boxed{\frac{\varepsilon_1(\omega)}{a_1(\omega)} = \frac{\varepsilon_2(\omega)}{a_2(\omega)} = \dots = f(\omega, T)} \quad (5-7)$$

Для АЧТ  $a(\omega)=1$ , тогда  $f(\omega, T) = \varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega)$  – универсальная функция Кирхгофа является излучательной способностью АЧТ.

Однако получить выражение для  $f(\omega, T)$  Кирхгоф не смог.

## Закон Кирхгофа



Г. Р. Кирхгоф  
(1824 -1899)

В состоянии теплового равновесия отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а определяется только его температурой и длиной волны излучения.

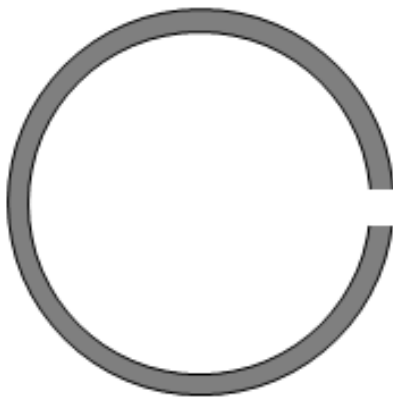
$$\frac{\varepsilon_\nu}{a_\nu} = f(\nu, T) \qquad \frac{\varepsilon_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T)$$

Тело, которое при данной температуре лучше испускает волны какой-либо длины, должно их и лучше поглощать.

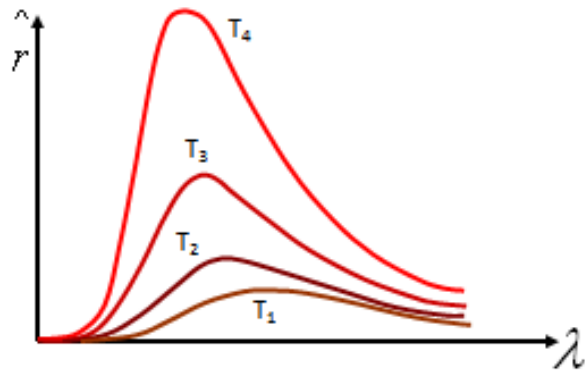
Согласно закону Кирхгофа зачерненная часть платиновой пластинки при нагревании светится ярче, чем не зачерненная.



## Излучение абсолютно черного тела



Нагрев внутренней полости модели приводит к излучению энергии через отверстие в полости



Следующий шаг в изучении механизма теплового излучения был сделан Стефаном и Больцманом, которые экспериментально установили, что энергетическая способность АЧТ пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

$$R = \sigma T^4. \quad (5-8)$$

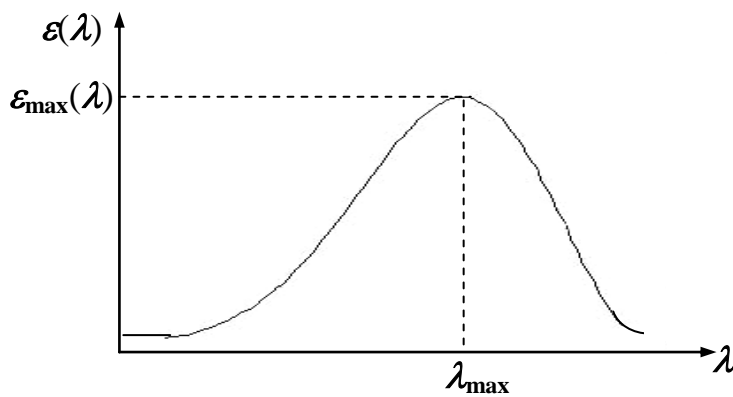
– закон Стефана-Больцмана для теплового излучения,

здесь  $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Этот закон позволяет определить лишь интегральную характеристику теплового излучения – полную энергию, излученную телом в единицу времени с единичной поверхности, но во всем частотном диапазоне от 0 до  $\infty$ .

$$R = \int_0^{\infty} \varepsilon(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda.$$

Вин установил два закона (законы Вина для теплового излучения), которые относятся только к одной длине волны (или одной частоте), соответствующей максимуму излучательной способности АЧТ:



$$1) \quad \boxed{\lambda_{\max} = \frac{b}{T}}, \quad (5-9)$$

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

Формулу (5-9) иногда называют законом смещения Вина для теплового излучения

$$2) \quad \boxed{\varepsilon_{\max}(\lambda) = cT^5}, \quad (5-10)$$

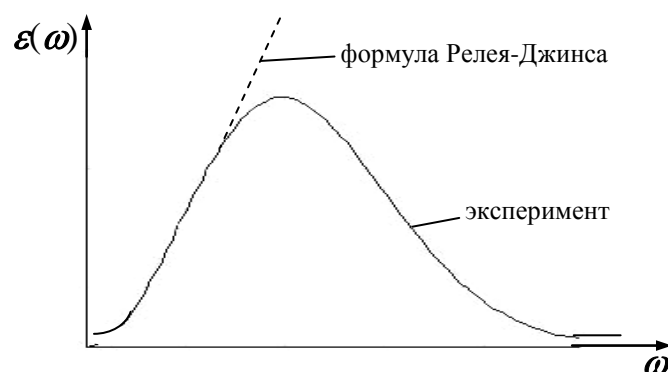
где  $c = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5} - \text{const.}$

И, наконец, венцом классической физики в объяснении механизма теплового излучения стала формула, полученная Релеем и Джинсом, для излучательной способности АЧТ:

$$\boxed{\varepsilon(\omega) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} k_B T}, \quad (5-11)$$

– формула Релея-Джинса для теплового излучения.

Эта формула очень хорошо совпадала с экспериментом в области коротких частот (больших длин волн).



Однако в области больших частот (коротких длин волн) формула Релея-Джинса терпит катастрофу → «ультрафиолетовая катастрофа».

Более того, попытка вычислить  $R_{\text{АЧТ}}$  тоже приводит к абсурду

$$R = \int_0^{\infty} \varepsilon(\omega) d\omega \sim \int_0^{\infty} \omega^2 d\omega = \infty \quad ?$$

## Рэлей и Джинс



Д. Х. Джинс  
(1877 - 1946)



Д. У. Стретт  
(лорд Рэлей)  
(1842 - 1919)

Лишь после того, как Макс Планк сформулировал знаменитую гипотезу (носящую его имя) о дискретном характере излучения энергии нагретыми телами, им была получена формула (формула Планка), идеально соответствующая экспериментальному графику универсальной функции Кирхгофа:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{dW}{dtdSd\omega} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (5-12)$$

## Пирометрия

**Пирометры** — приборы для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.



Переносной пирометр  
инфракрасного излучения



Стационарный пирометр  
инфракрасного излучения



Оптический пирометр



## 1.2. Внешний фотоэлектрический эффект

В 1887 году немецкий физик Герц открыл явление, которое получило название «Внешний фотоэффект» – это явление вырывания электронов с поверхности металлов при облучении их электромагнитным излучением.



### Понятие о фотоэффекте

**Фотоэффект** — это испускание электронов веществом под действием света (и, вообще говоря, любого электромагнитного излучения).

В конденсированных веществах (твёрдых и жидких) выделяют внешний и внутренний фотоэффект.

**Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией)** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений.

Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются *фотоэлектронами*, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется *фототоком*.

---

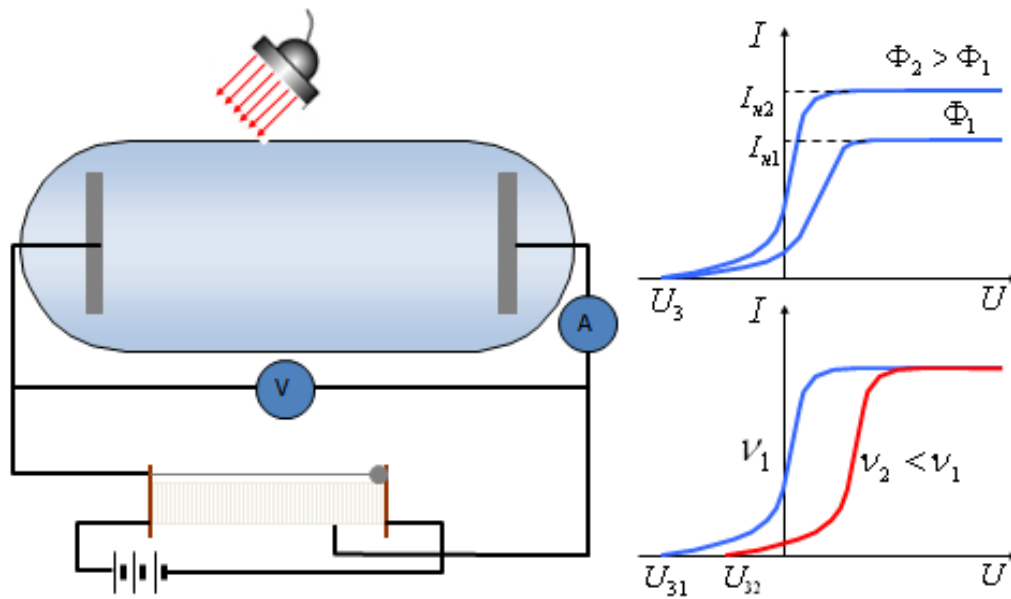
Все попытки классической физики объяснить это явление на основе волновых представлений не привели к успеху.

Резонанс!-?

Опыты Столетова:

- 1)  $W_k \neq f(I_{\text{света}})$ ,  $W_k = f(\nu)$
- 2) Существует  $\nu_{\min}$ !  $\nu_{\min} = f$  (сорта металла, состояния поверхности);
- 3) Количество электронов ( $I_e$ )  $\sim$  интенсивности света (световому потоку).

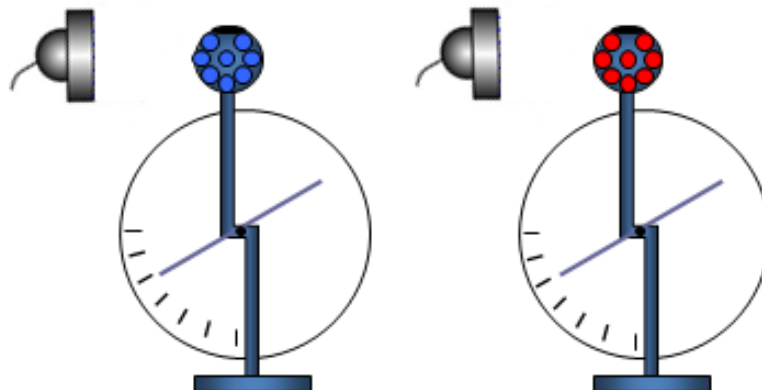
## Опыты Столетова



## Выводы Столетова

- 1) на цинковые пластины действуют только ультрафиолетовые лучи;
- 2) прохождение 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.

Объяснить это явление удалось в 1905 г. немецкому физику Эйнштейну. Он использовал гипотезу Планка о квантовой природе излучения и в свою очередь предположил, что свет не только излучается, но и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), которые в дальнейшем были названы фотонами.

Используя закон сохранения энергии, Эйнштейн записал формулу для внешнего фотоэффекта:

$$W_f = A_{\text{вых}} + W_{k \text{ max}} \quad (5-13)$$

$$[A_{\text{вых}}] = \text{эВ} \quad 1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \quad (5-13a)$$

## Уравнение Эйнштейна



Альберт Эйнштейн  
(1879 - 1955)

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

$$W = h\nu$$

$$W = A_{\text{вых}} + W_{\text{кин}}$$

Уравнение Эйнштейна  
для фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$

Законы фотоэффекта:

- 1)  $W_k = f(\nu)$
- 2) Фотоэффект возникает при  $W_f \geq A_{\text{вых}}$ ;

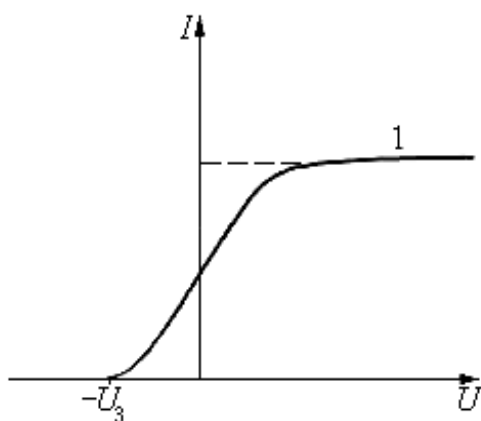
$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} \quad - \quad (5-14)$$

красная граница внешнего фотоэффекта

### 3) Один фотон – один электрон

количество электронов  $\sim$  количеству фотонов ( $I, \Phi$ ).

Иногда требуется вылетевшие из металла электроны задержать у поверхности. Для этого используют встречное электрическое поле

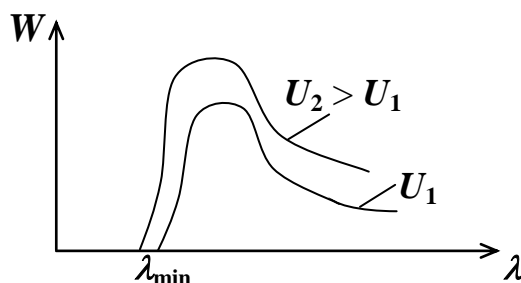
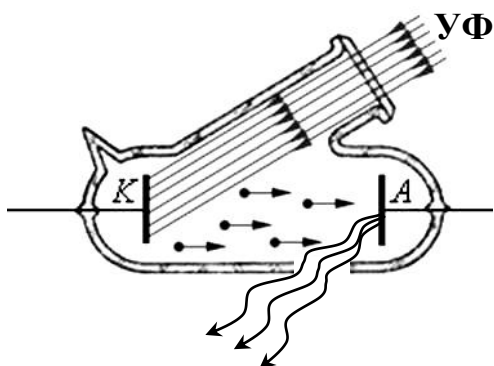


$$q_e U_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad (5-15)$$

$U_3$  – задерживающее напряжение электрического поля.

по ВАХ  $I = f(U)$  определяют постоянную Планка  $h$ .

### 1.3. Тормозное рентгеновское излучение



### Рентгеновские лучи

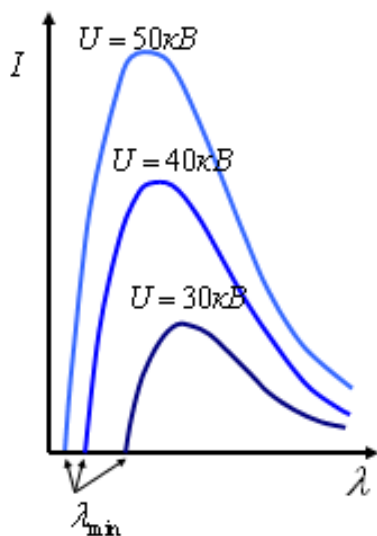


К. Рентген

**Тормозное излучение** возникает при движении заряженных частиц с ускорением (например, при торможении ранее ускоренных электронов).

# Рентгеновские лучи

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

$$W_f \leq W_{Ke} = q_e U$$

$$h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = q_e U \rightarrow \boxed{\lambda_{\min} = \frac{hc}{q_e U}} \quad (5-16)$$

## Применение

Выявление дефектов в изделиях (рельсах, сварочных швах и т. д.) с помощью рентгеновского излучения



Дефектоскоп



Медицина



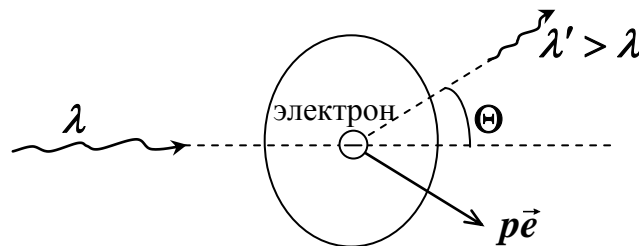
Рентгеновский снимок Солнца

Астрономия

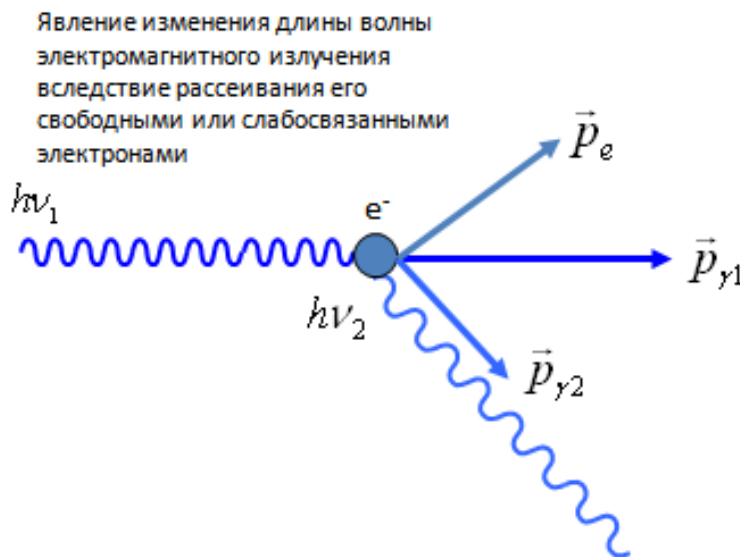
## 1.4. Эффект Комптона

В 1924 году американский физик Комптон обнаружил, что при облучении вещества электромагнитным излучением наблюдается отклонение излучения от первоначального направления на некоторый угол и прошедшее излучение имеет большую длину волны...

Свет – электромагнитная волна – дифракция ?



### Эффект Комптона



Артур Холли Комптон

Комптон воспользовался квантовой гипотезой Планка (свет-поток фотонов) и смог объяснить открытое им явление:

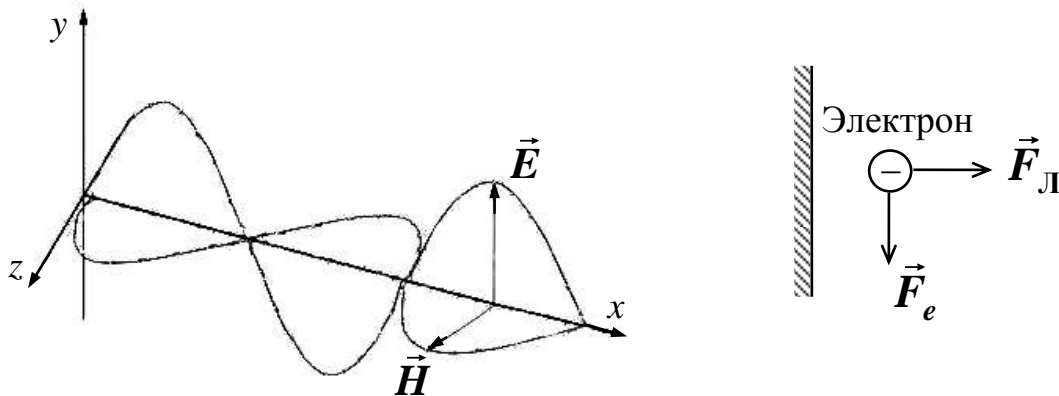
$$\begin{cases} \vec{p}_f = \vec{p}'_f + \vec{p}_e & \text{т. к. } W'_f = \frac{hc}{\lambda'} < W_f = \frac{hc}{\lambda} \\ W_f = W'_f + W_{Ke} & \text{тогда } \underline{\lambda' > \lambda!} \end{cases}$$

$$\boxed{\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \Lambda_c (1 - \cos \Theta) = 2\Lambda_c \sin^2 \frac{\Theta}{2}}, \quad (5-17)$$

где  $\Lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м – постоянная Комптона.

## 1.5. Давление света

Свет, попадая на вещество, оказывает давление. Объяснить это возможно и по электромагнитной теории и по квантовой физике.



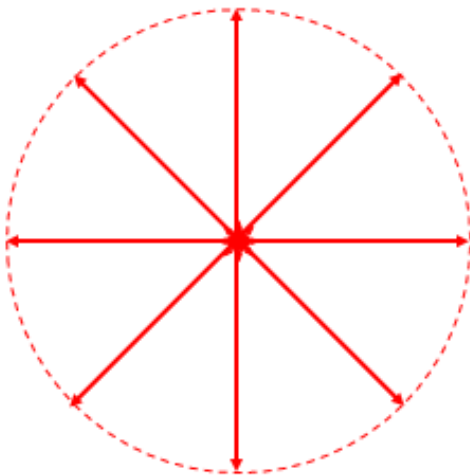
Свет – поток фотонов.

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{\Delta p / \Delta t}{\Delta s} = \frac{\Delta N \cdot p_{\phi}}{\Delta s \Delta t} = \frac{\Delta N (1 + \rho) h / \lambda}{\Delta s \Delta t} = (1 + \rho) \frac{\Delta N h c}{\lambda c \Delta t \Delta s} =$$

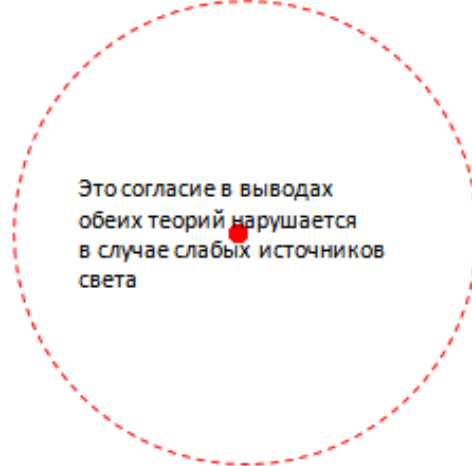
$$= (1 + \rho) \frac{\Delta W}{\Delta V} = (1 + \rho) \omega.$$

## О согласии теорий

Свет как волновой процесс по всем направлениям распространяется с одинаковой интенсивностью



Свет как поток фотонов по всем направлениям распространяется с одинаковой плотностью



Т. о. свет по электромагнитной теории – это электромагнитная волна, а по квантовой физике – это поток частиц (фотонов).

Современная физика констатирует наличие корпускулярно-волнового дуализма света: свет – это одновременно электромагнитная волна и фотон.