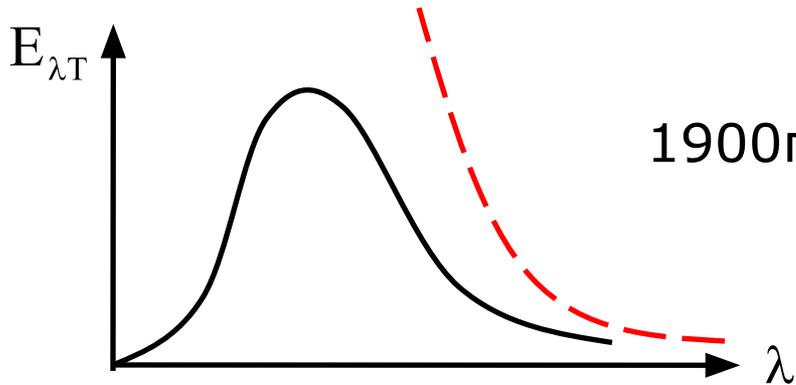


# Квантовая оптика

# Истоки квантовой теории

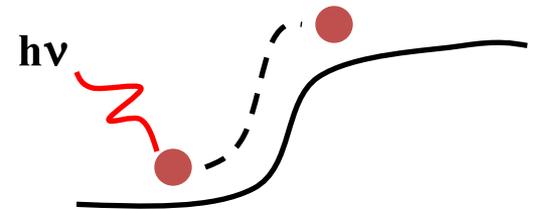
I. Излучение абсолютно чёрного тела □ ультрафиолетовая катастрофа

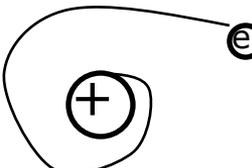


1900г. Планк – излучение квантами!

II. Фотоэффект – противоречие классической теории света

1905г. Эйнштейн – поглощение квантами □ фотон

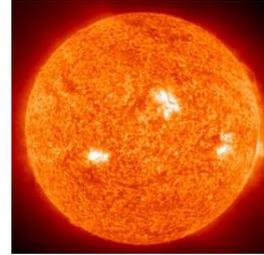


III.  Неустойчивость атома Резерфорда } 1913г. На стационарн орбите атома эл-н не излучает

# **Тепловое излучение**

Тепловое излучение – испускание электромагнитных волн за счет внутренней энергии тел.

Нагретые тела -  
тепловое излучение

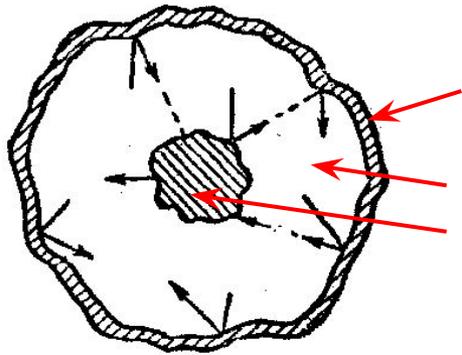


Нетепловое излучение -  
внешний источник энергии



Люминесценция во всех её проявлениях:  
экраны дисплеев, светодиоды, лазеры и т.п.

**Тепловое излучение может находиться в равновесии с окружающими телами.**



Полость с идеально  
отражающей поверхностью  
Вакуум  
Тело

Температура тела изменяется до  
тех пор, пока количество  
излучаемой телом энергии не  
станет равным количеству  
поглощаемой энергии.

Т.е. полость будет заполнена электромагнитным  
полем в виде электромагнитных волн  
(«излучением»). Поглощение этих ЭМВ  
(«излучения») телом при равновесии компенсирует  
энергию излучаемую телом.

**равновесие**

**детальное:**

Согласно опыту и представлениям

термодинамики:

**Излучаемая и поглощаемая энергия равны для каждой частоты  $\omega$  (длины волны  $\lambda$ ).**

# Характеристики теплового излучения.

## Энергетическая светимость

$R_T$  ←  $\frac{Вт/м^2}{м^2}$  Поток энергии, испускаемый ед. поверхности излучающего тела в ед. времени по всем направлениям в интервале частот от 0 до бесконечности.

$dR_{\omega T} = r_{\omega T} d\omega$  Поток энергии, испускаемый ед. пов-ти излучающего тела в ед. времени по всем направлениям в интервале частот \_\_\_\_\_.

$r_{\omega T}$  ←  $\frac{Вт \cdot с}{м^2}$  **Испускательная способность**

**Испускательная способность тела (спектральная плотность потока энергии излучения)** — это количество энергии, испускаемой в единицу времени единицей поверхности тела в единичном интервале частот по всем направлениям.

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

**Поглощательная способность**

$$a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

← Часть этого потока, поглощенная телом.

← Поток энергии ЭМВ падающих на тело в интервале частот  $[\omega, \omega + d\omega]$  .

Доля энергии, поглощенной телом, на частоте  $\omega$  при температуре  $T$

$$a_{\omega T} \leq 1 \quad \alpha_{\omega T} = 1$$



**Абсолютно черное тело (АЧТ)**

# Закон Кирхгофа



Если через малое отверстие заглянуть внутрь полости, в которой установилось термодинамическое равновесие между излучением и нагретыми телами, то глаз не различит очертаний тел и зафиксирует лишь однородное свечение всей полости в целом.

## Закон Кирхгофа

Для системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, отношение испускательной и поглотительной способностей не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же универсальной функцией частоты и температуры.

$$\left( \frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} \right)_2 = \dots = \left( \frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} \right)_N = f(\omega, T).$$

$$\text{АЧТ: } \alpha_{\omega T} = 1 \Rightarrow (r_{\omega \text{АЧТ}}) = f(\omega, T) \Rightarrow$$

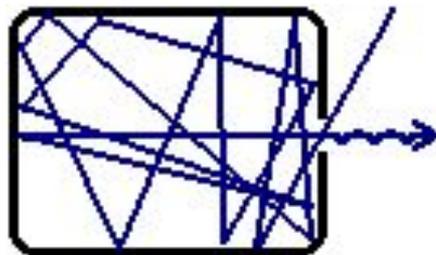
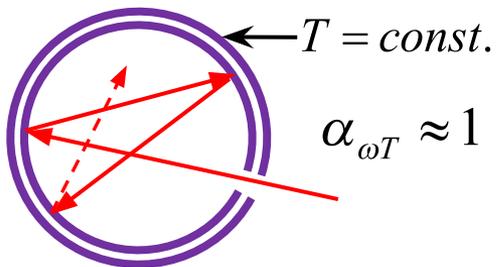
Теоретический интерес к исследованию испускательной способности АЧТ

***Законы излучения  
абсолютно черного  
тела. Формула  
Планка.***



# Закономерности излучения абсолютно черного тела

$$(r_{\omega АЧТ}) = f(\omega, T) \xrightarrow{\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}} (r_{\lambda T})_{АЧТ} = \varphi(\lambda, T)$$



Модель АЧТ – полость, содержащая ЭМВ в условиях теплового равновесия

$$f(\omega, T) = (r_{\omega АЧТ})$$

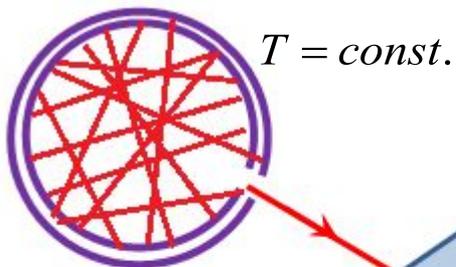
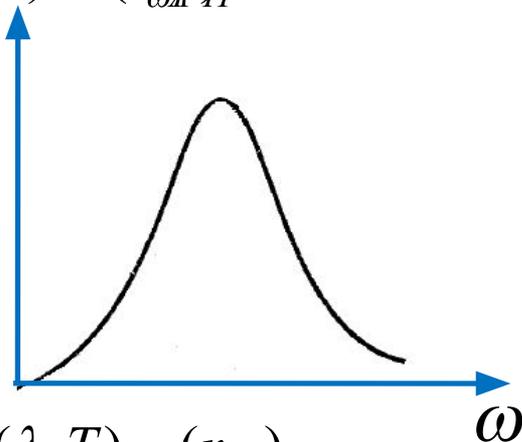
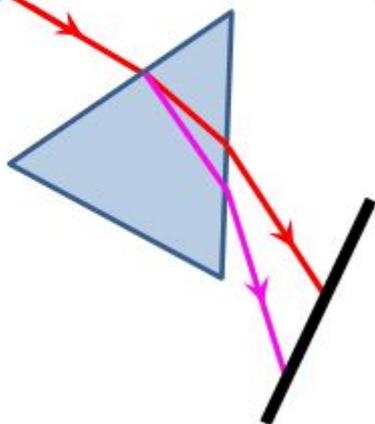


Схема определения

$$(r_{\omega АЧТ}) = f(\omega, T)$$



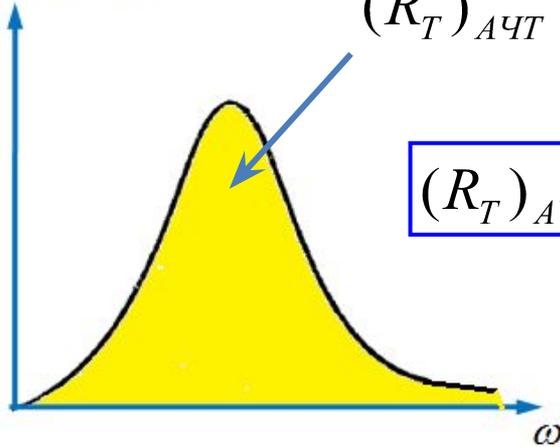
ЭКСПЕРИМЕНТ



# Закономерности излучения абсолютно черного тела

## Закон Стефан-Больцмана

$$f(\omega, T) = (r_{\omega T})_{AЧТ}$$



$$(R_T)_{AЧТ} = \int_0^{\infty} (r_{\omega T})_{AЧТ} d\omega$$

$$(R_T)_{AЧТ} = \sigma T^4$$

Энергетическая светимость  
АЧТ

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$

Постоянная  
Стефана  
Больцмана

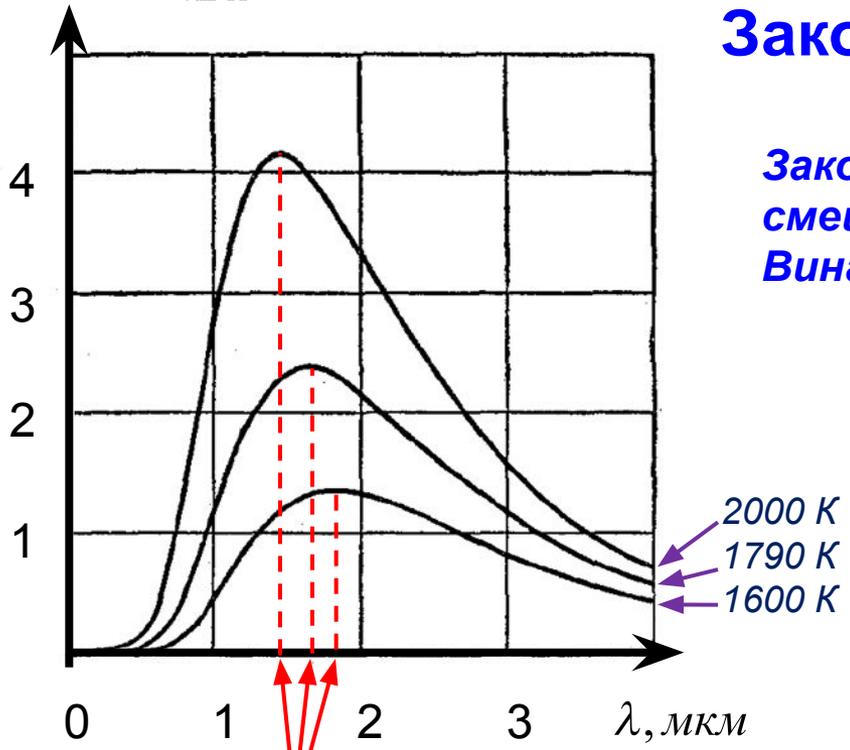
$$550 \text{ } ^\circ\text{C} = 823 \text{ } ^\circ\text{K} \longrightarrow (R_T)_{AЧТ} = 2,6 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2} = 2,6 \frac{Вт}{см^2}$$

$$\varphi(\lambda, T) = (r_{\lambda T})_{\text{АЧТ}} \cdot 10^{11} \text{ Вт} / \text{м}^3$$

# Закон смещения Вина

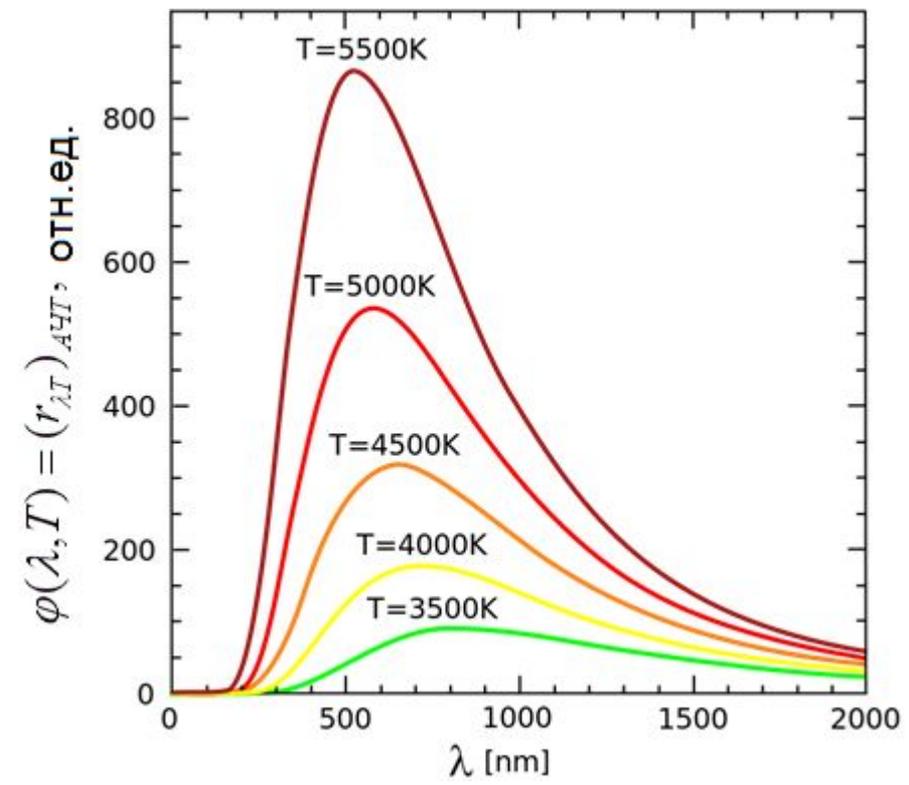
**Закон смещения Вина**

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ .}$$



Инфракрасная область

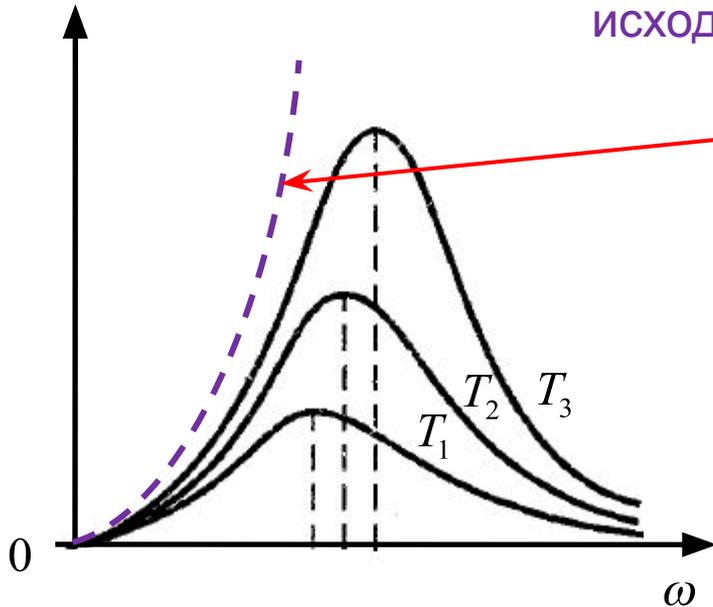
Видимая область



# «Ультрафиолетовая катастрофа»

Теория Релея – Джинса;  
строгая в рамках классической физики теория,  
исходящая из волновой природы света.

$$f(\omega, T) = (r_{\omega T})_{\text{АЧТ}}$$



$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot kT$$

Формула Релея - Джинса

$$(R_T)_{\text{АЧТ}} = \int_0^{\infty} f_{\omega T} d\omega = \frac{kT}{4\pi^2 c^2} \int_0^{\infty} \omega^2 d\omega = \infty$$

## Гипотеза и формула Планка (1900).

Электромагнитное излучение испускается в виде **отдельных порций энергии** (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{h}{2\pi} \omega = \hbar \omega$$

$$\hbar = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Энергия электромагнитного излучения (в том числе заполняющего нагретую полость) может изменяться не непрерывно, а дискретно, а именно на величину кратную  $h\nu$ .



# Квант действия Макса Планка (1900 г.)

## Макс Планк



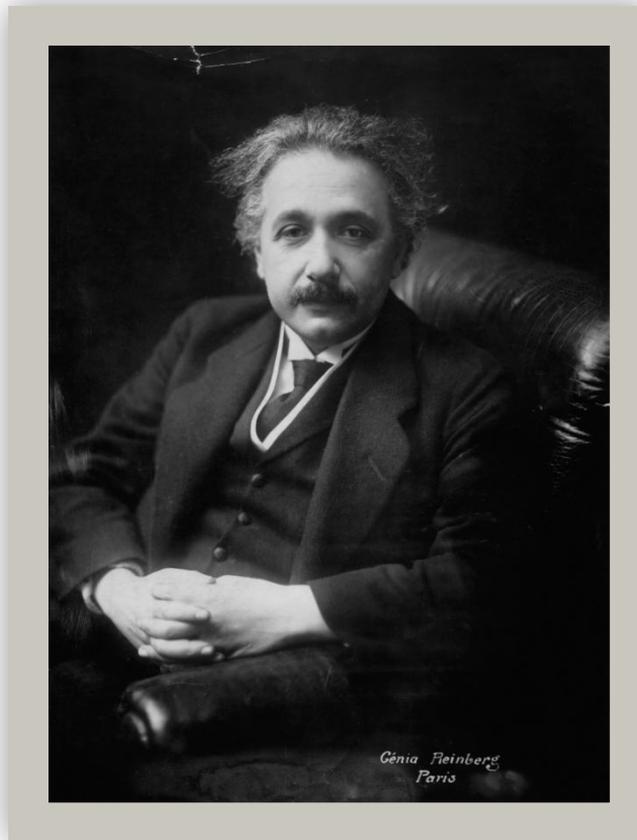
**Планк Макс (1858-1947)** – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой теории.

“...он убедительно показал, что кроме атомистической структуры материи существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной, введённой Планком. Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX века, и с того времени почти полностью обусловило её развитие.”

/А.Эйнштейн/

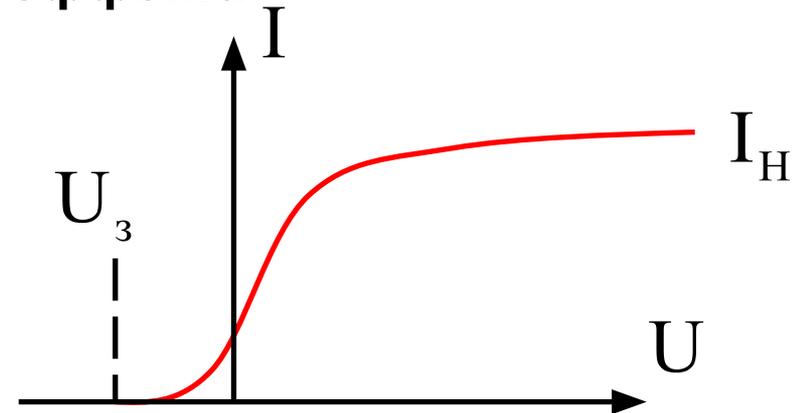
*Нобелевская премия (1918г.) за открытие кванта действия*

Фотоэлектрический эффект.  
Формула Эйнштейна.

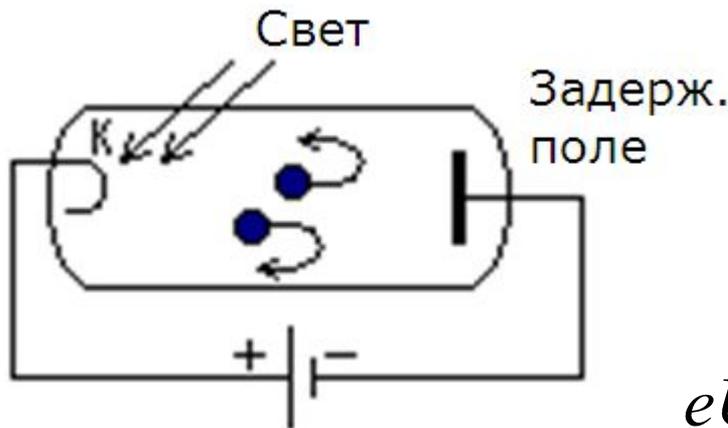
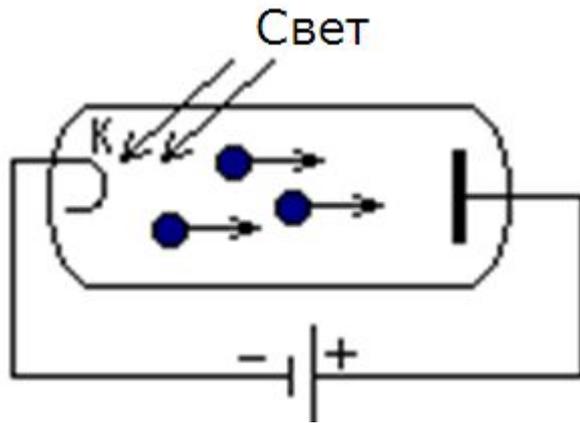


# Фотоэффект

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта



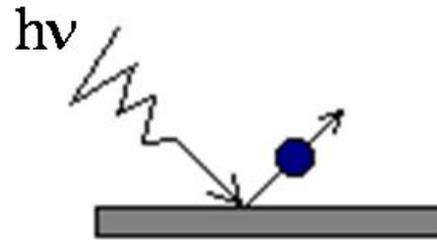
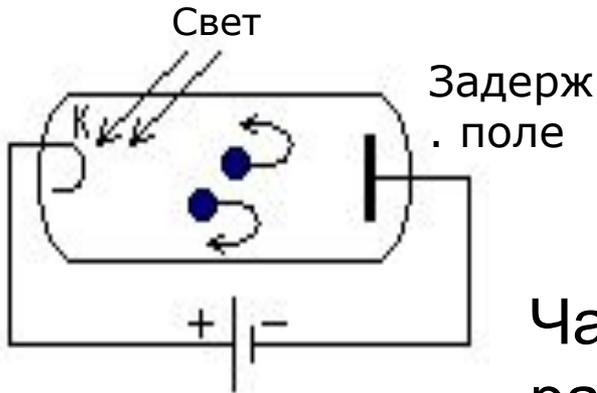
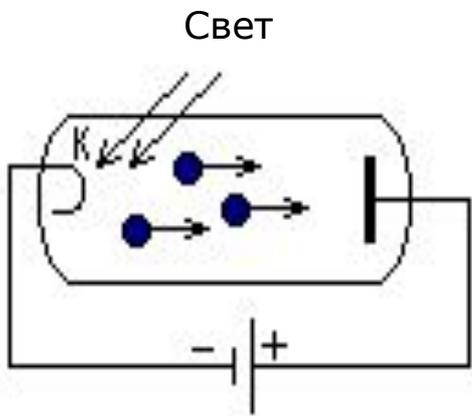
$$eU_3 = \frac{mv^2}{2}$$



- Фототок насыщения пропорционален световому потоку (Столетов)
- Существует своя так называемая красная граница: если длина волны падающего света больше некоторой величины, то фотоэффекта не наблюдается. Для каждого металла красная граница своя.
- Кинетическая энергия электрона (задерживающий потенциал)

# Объяснение Эйнштейна

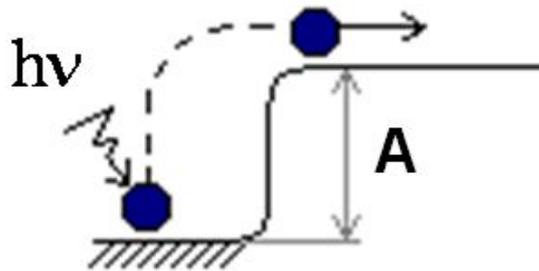
Электроны поглощают свет **квантами  $h\nu$**  (введенными Планком). Энергия кванта усваивается электроном **целиком**.



Часть энергии кванта расходуется на работу выхода электрона из металла, остальное – превращается в кинет. энергию электрoна

Уравнение Эйнштейна

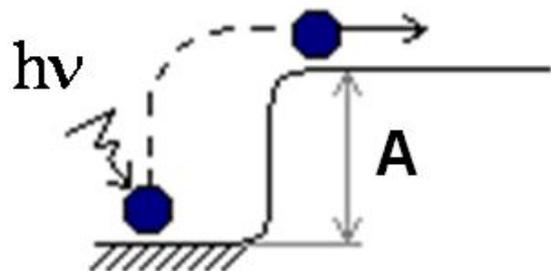
$$h\nu = A + \frac{m_e v_e^2}{2}$$



# Объяснение Эйнштейна

Уравнение Эйнштейна

$$h\nu = A + \frac{m_e v_e^2}{2}$$



Часть энергии кванта расходуется на работу выхода электрона из металла, остальное – превращается в кинет. энерг электрона.

**ДО СИХ**  
Характерная для данного металла

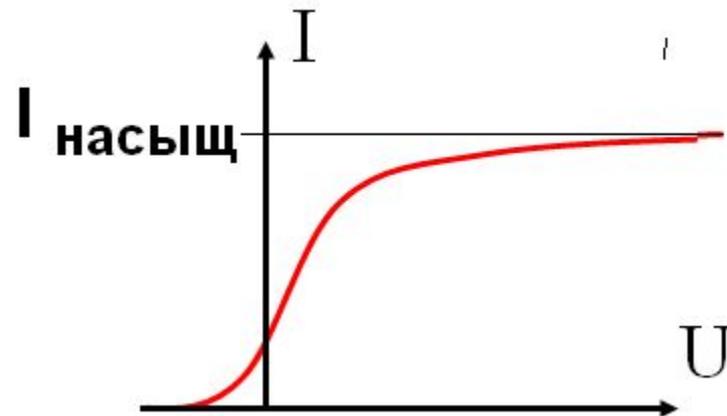
$h\nu < A$  – фототок = 0

$h\nu = A/h$  - **красная граница**

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = h\nu - A$$

**Кинетическая энергия электрона линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности**

Число выбитых электронов (ток насыщения) пропорционально числу квантов, т.е. интенсивности света - **закон Столетова**



# ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



Фотоприёмники -  
электронно-  
оптические  
преобразователи -  
оптическая связь и

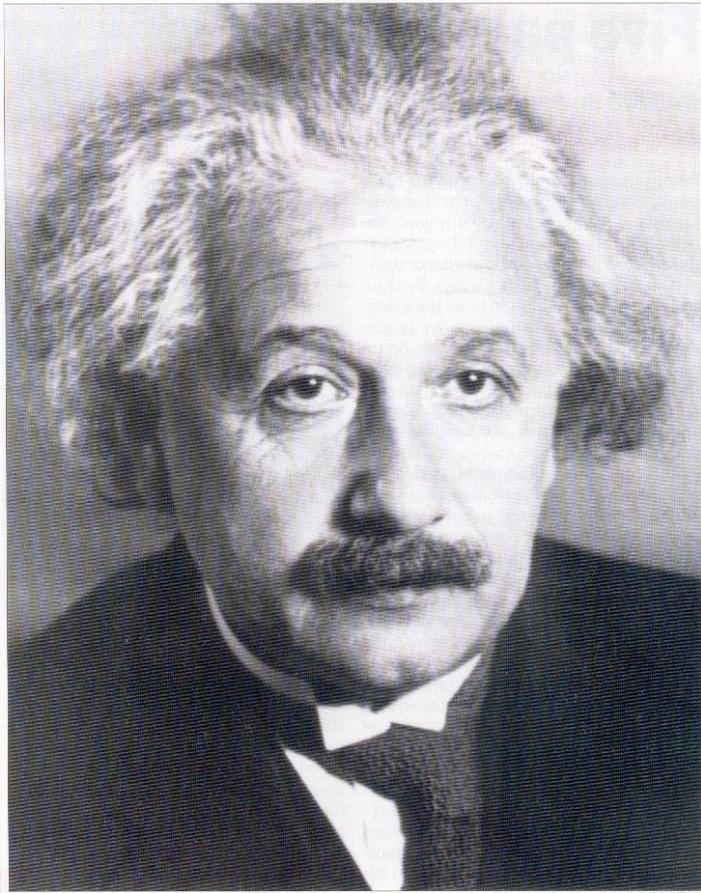
Д



Фотовольтаика –  
солнечные батареи -  
возобновляемая  
энергетика.



# Фотон Альберта Эйнштейна (1905 г.)



## Альберт Эйнштейн

**Альберт Эйнштейн (1879-1955)** – один из создателей современной физики, создатель специальной и общей теории относительности. В 1905 г. ввёл представление о дискретной квантовой структуре светового излучения, рассматривая последнее, как поток квантов света, или фотонов – **фотонная теория света**.

*Нобелевская премия 1921 г. за открытие законов фотоэлектрического эффекта.*

# Фотон Альберта Эйнштейна (1905)

Эйнштейн: свет не только испускается квантами (Планк, излучение АЧТ), и не только поглощается квантами (Эйнштейн, фотоэффект), но и распространяется в виде квантов – фотонов.



Свет состоит из частиц – фотонов, несущих энергию  $h\nu$

$$\left. \begin{array}{l} E = mc^2 \\ E = h\nu \\ P = mc \end{array} \right\} P_\phi = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$P_\phi = \frac{h}{\lambda}$$

Фотон обладает импульсом

$$\left. \begin{array}{l} m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ v = c \end{array} \right\} m_0 = 0$$

Масса покоя фотона равна 0

# Свойства фотона

Фотон обладает:

а) корпускулярными св-вами

- он неделим при любых взаимодействиях
- он обладает импульсом

б) волновыми св-вами

- ему соответствует определённая частота  $\nu$  (длина волны  $\lambda$ )
- он проявл в явлениях интерференции и дифракции

Корпускулярно-волновой дуализм. Статистическое объяснение непротиворечивости корпускулярных и волновых свойств.

# Световое давление

Если фотоны имеют импульс, они должны оказывать давление на поверхность.

$$\left. \begin{array}{l} E = mc^2 \\ P = mc \end{array} \right\} P = \frac{E}{c}$$

Если  $n$  – концентрация фотонов, то

$nc$  – число фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади

$$\text{давление} \rightarrow p = \frac{E}{c} nc = En = w$$

энергия фотонов в ед объёма

Если все упавшие фотоны поглотятся  **$p = w$**

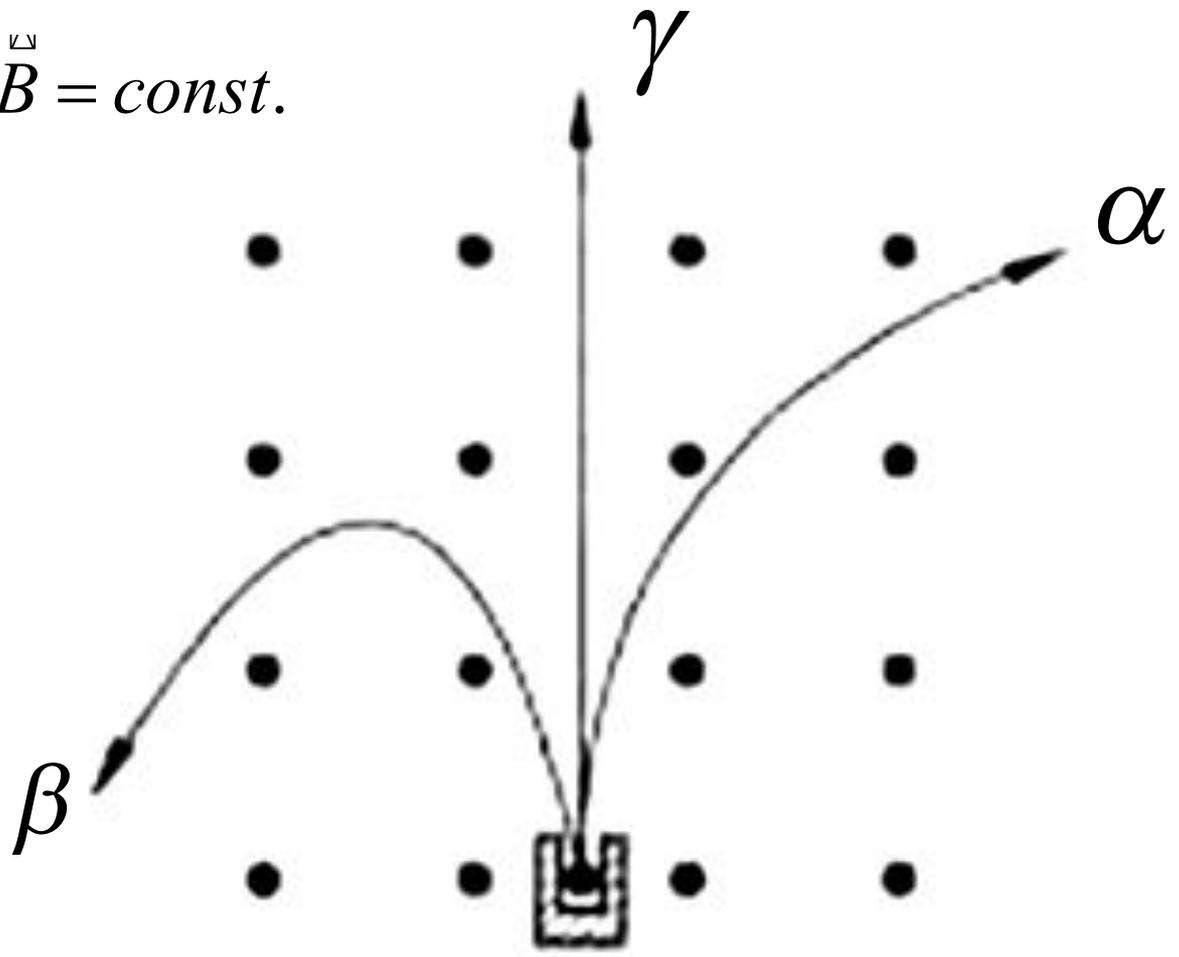
Если все фотоны отразятся,  **$p = 2w$**

# 2. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома .



1871 – 1937

$\vec{B} = \text{const.}$



1.

1. Цель  
опыта



Исследование распределения  
положительного и отрицательного зарядов  
в атоме

Резерфорда

2. Метод  
исследования



Исследование рассеяния альфа-частиц  
атомами тонкой металлической фольги

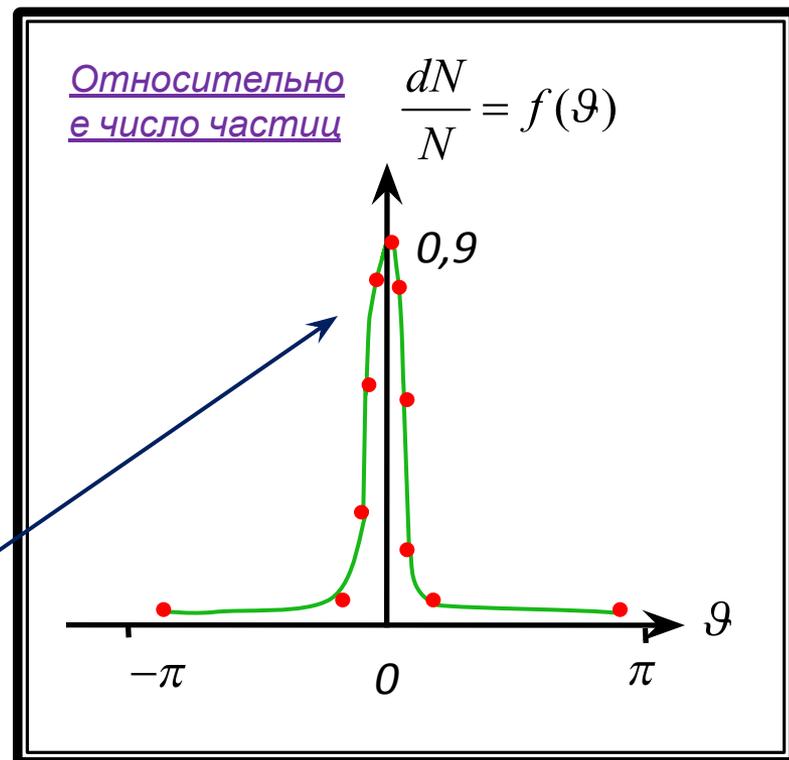
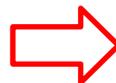
$$\alpha (He^{++}) \Rightarrow v = 10^7 \text{ м/с}$$

$$m(He^{++}) \cong 10^4 m(e^-)$$

3. Схема установки:



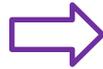
Вакуум...ZnS...Сцинтилляци  
и...



4. Результаты  
исследований:

Подавляющее число

1. Цель  
опыта



Исследование распределения  
положительного и отрицательного зарядов  
в атоме

Резерфорда

2. Метод  
исследования



Исследование рассеяния альфа-частиц  
атомами тонкой металлической фольги

3. Результат опыта и теоретических  
расчётов

Резерфорда:

Атом – пуст: линейные размеры ядра составляют 1/10 000  
линейных размеров атома; почти вся масса атома  
сосредоточена в ядре.

Суть фундаментального  
результата исследований  
Резерфорда: оценка  
линейного размера ядра.



$$5 \cdot 10^{-14} \text{ м}$$

$$5 \cdot 10^{-12} \text{ см}$$

$$5 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$$

**Планетарная (ядерная) модель атома:** «Атом состоит из положительно-заряженного ядра, вокруг которого перемещаются по замкнутым траекториям, подобно планетам вокруг Солнца, электроны».

1911 г.

## **2. Недостатки планетарной (ядерной) модели атома.**

### **1. Неустойчивость модели...**

Излучение ЭМВ...

Электрон должен в конечном счете упасть на ядро...

### **2. Нет объяснения дискретности спектров испускания...**

Исследование спектров атомов были еще одним ключом к пониманию его строения.

Что такое спектр и каковы особенности спектра невзаимодействующих атомов (например в случае разреженного газа)

1. Линейчатый характер
2. Разбиение на группы (называемые сериями)

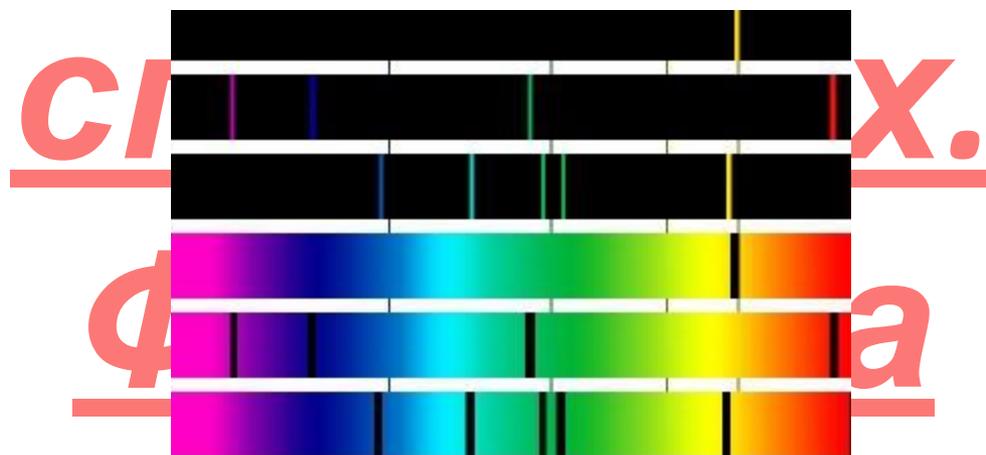
Формула Бальмера для спектра водорода (1885)

Обобщенная формула Бальмера

1.

# Закономерности

## в атомных

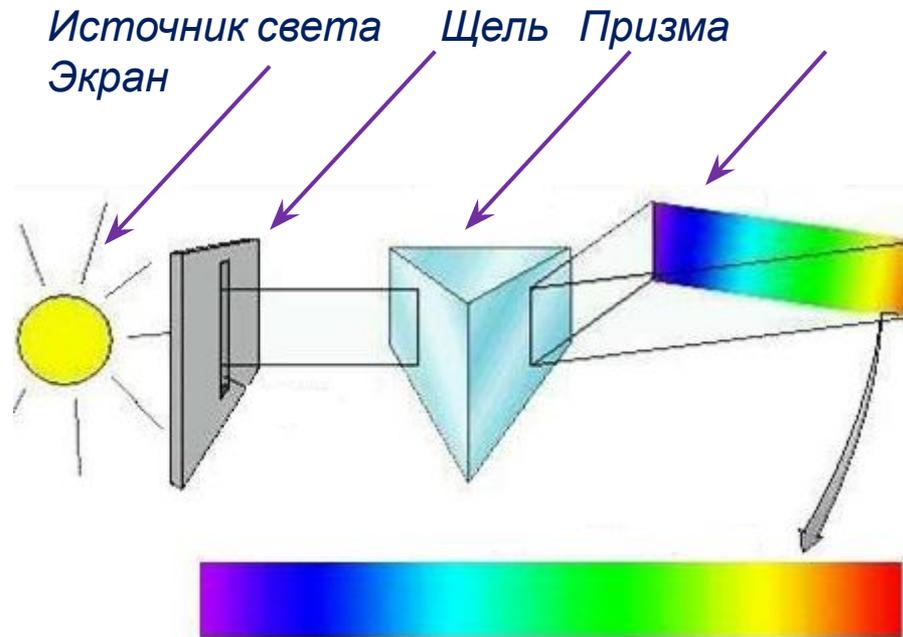


Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.  
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.

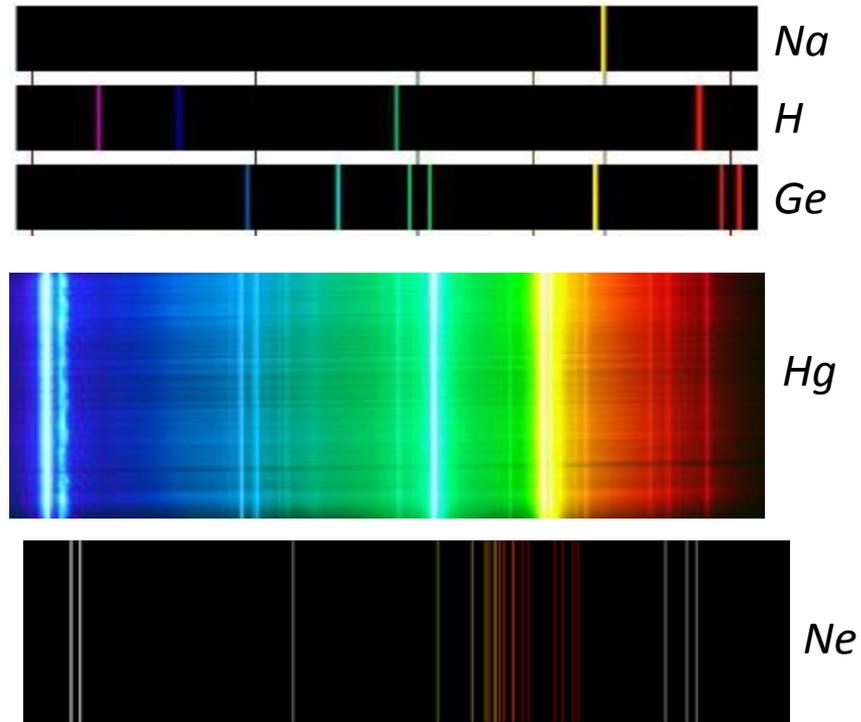
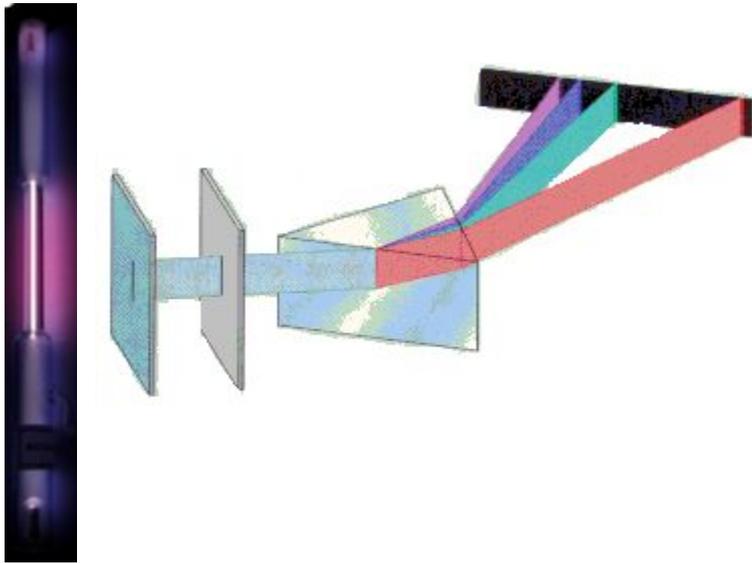
## Бальмера

1.

Сплошной и линейчатый спектры  
испускания.



Сплошной спектр солнечного  
света



**Для атомов каждого вещества характерен свой спектр.**



**Линейчатые спектры испускания атомов**  
(окрашенные изображения щели)

2.

Закономерности в спектре атома водорода. Формула Бальмера.



Серия линий в  
видимой части  
спектра атома  
водорода

Серия Бальмера

Формула

Бальмера

$$\omega = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

$$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$$

Постоянная  
Ридберга

1885г.  
Математически записанная  
Бальмером наблюдаемая  
закономерность...

Дальнейшие  
исследования спектра  
водорода...



Открытие новых  
серий

Обобщенная  
формула Бальмера

$$\omega = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n > m$$

$$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад}/\text{с}$$

$m$  – номер серии

$m=1$  – серия Лаймана

$m=2$  – серия

Бальмера

$m=3$  – серия Пашена

$m=4$  – серия Брэкета

$m=5$  – серия Пфунда

$$n = m + 1, m + 2, \dots$$

Критерий состоятельности модели атома  
Бальмера.

вывод формулы

# Атом Бора

I. Из всех возможных классических орбит **только некоторые** являются разрешёнными, а именно – те для которых момент количества движения удовлетворяет условию:

$$\boxed{mvR = n\hbar} \quad (\hbar = \frac{h}{2\pi}); \quad \underline{n = 1, 2, 3...}$$

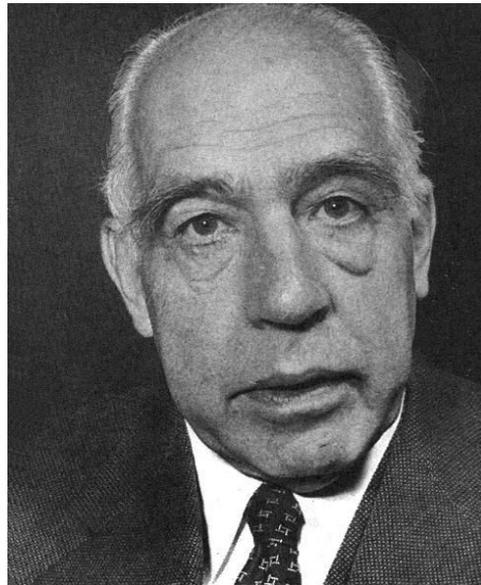
II. Когда электрон находится на одной из разрешённых орбит он (в противовес теории Максвелла) **не излучает !**

III. Электрон излучает энергию только **при переходе** с одной разрешённой орбиты на другую. Значение излучённой при этом энергии определяется соотношением **Энштейна Планка.**

$$\underline{E_2 - E_1 = h\nu}$$



*Постулаты Бора.*  
*Модель атома водорода по*  
*Бору.*



*Нильс Бор*  
*(1913г.)*

# Опыты Резерфорда



## Планетарная модель атома

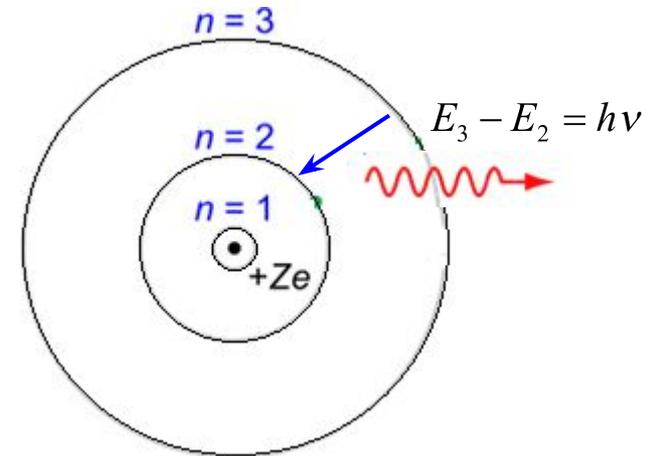
Проблема планетарной модели:  
при движении по криволинейной  
траектории электрон излучает энергию

## Первый постулат Бора.

Атом может находиться только в особых стационарных или квантовых (дискретных) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . Находясь в одном из стационарных состояний атом не излучает.



Стационарным состояниям соответствуют дискретные круговые орбиты, для которых момент импульса принимает определенные значения.



$$m_e v r = n \hbar$$
$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$

## Второй постулат Бора.

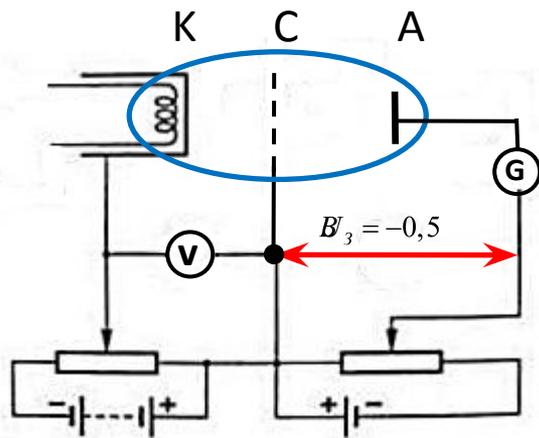
Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается поглощением или излучением кванта энергии (фотона), равного разности энергий стационарных состояний.

$$E_n - E_m = h\nu$$

# Опыт Франка и Герца (1914).

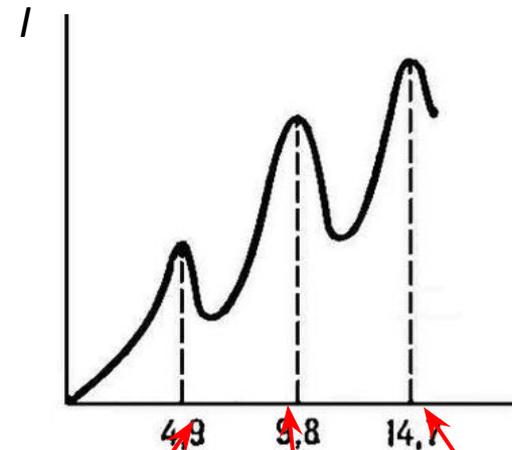
**Цель опыта:** экспериментальное доказательство существования дискретных энергетических состояний в атоме (1-ый постулат Бора).

**Схема опыта:**



1. Пары Hg в откаченном объёме;
2. Катод-сетка: ускор. разность потенциалов
3. Сетка-анод: задерживающая разность потенциалов

**Результат эксперимента:**



Ускоряющее напряжение, В

Начало неупругих взаимодействий

Начало 2-х ВОЗМОЖНЫХ неупругих ...

...3-х...

Если при столкновении внутренняя энергия атома ртути не меняется (упругое столкновение), энергия электрона практически не меняется (из-за разницы масс).

**Атом поглощает энергию (механическую) дискретно!**

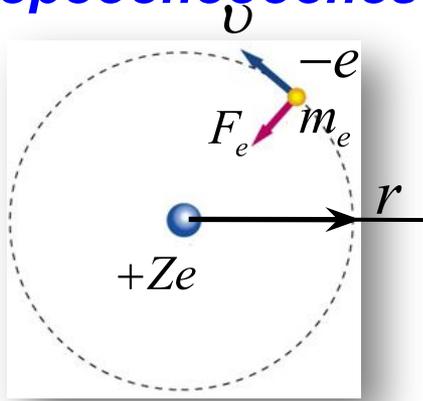
Доказательство 1-го постулата Бора.

Комптон 1925. При  $U > 4.9$  В атомами ртути излучается свет с  $\lambda = 0.2537$  мкм (УФ)

$\lambda = 0.2537$  мкм  $\longleftrightarrow$  Фотон  $h\nu = 4.9$  эВ

Доказательство второго постулата Бора

# Боровская модель атома водорода, водородоподобного иона



1-ый п-т. Бора  $\Rightarrow$

$$m_e v r = n \hbar$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$

2-ой з-н Н.  $\Rightarrow$

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^2}$$

1 ЭЛЕКТРОН  
В ПОЛЕ  
ЯДРА С  
ЗАРЯДОМ  
 $+Ze$

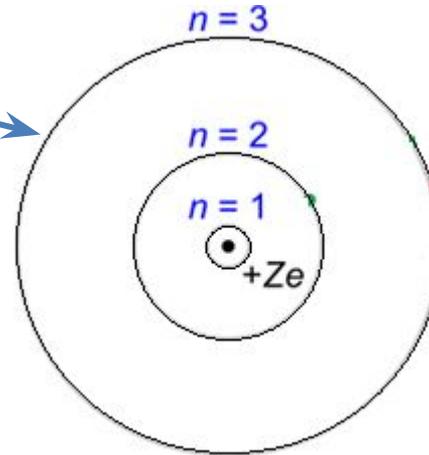
$v, r$

**Радиусы боровских орбит**

$$\Rightarrow r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e Z e^2} \cdot n^2$$

**Скорость электрона на боровских орбитах**

$$\Rightarrow v_n = \frac{Z e^2}{2 h \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n}$$



**Атом H, Z=1**

$$r_1 = 0.53 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0.53 \text{ \AA}$$

$$v_1 = 2 \cdot 10^6 \text{ м/сек}$$

**Энерг**

$$E = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r} = - \frac{m_e Z^2 e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_n = - \frac{m_e Z^2 e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

2-ой п.Бора  $\rightarrow E_n - E_m = h\nu$   $E_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} > E_m = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{m^2}$

$n > m$

$\downarrow$

$$\nu = \frac{1}{h}(E_n - E_m) = \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

**Постоянная Ридберга**

$\downarrow$

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \epsilon_0^2}$$

$Z=1 \Rightarrow R = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \epsilon_0^2} = \frac{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{4 \cdot (6,6 \cdot 10^{-34})^3 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$

**Формула Бальмера**

$$\omega = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

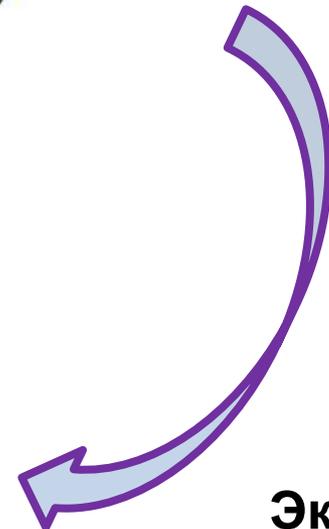
$n = 3, 4, 5, \dots$

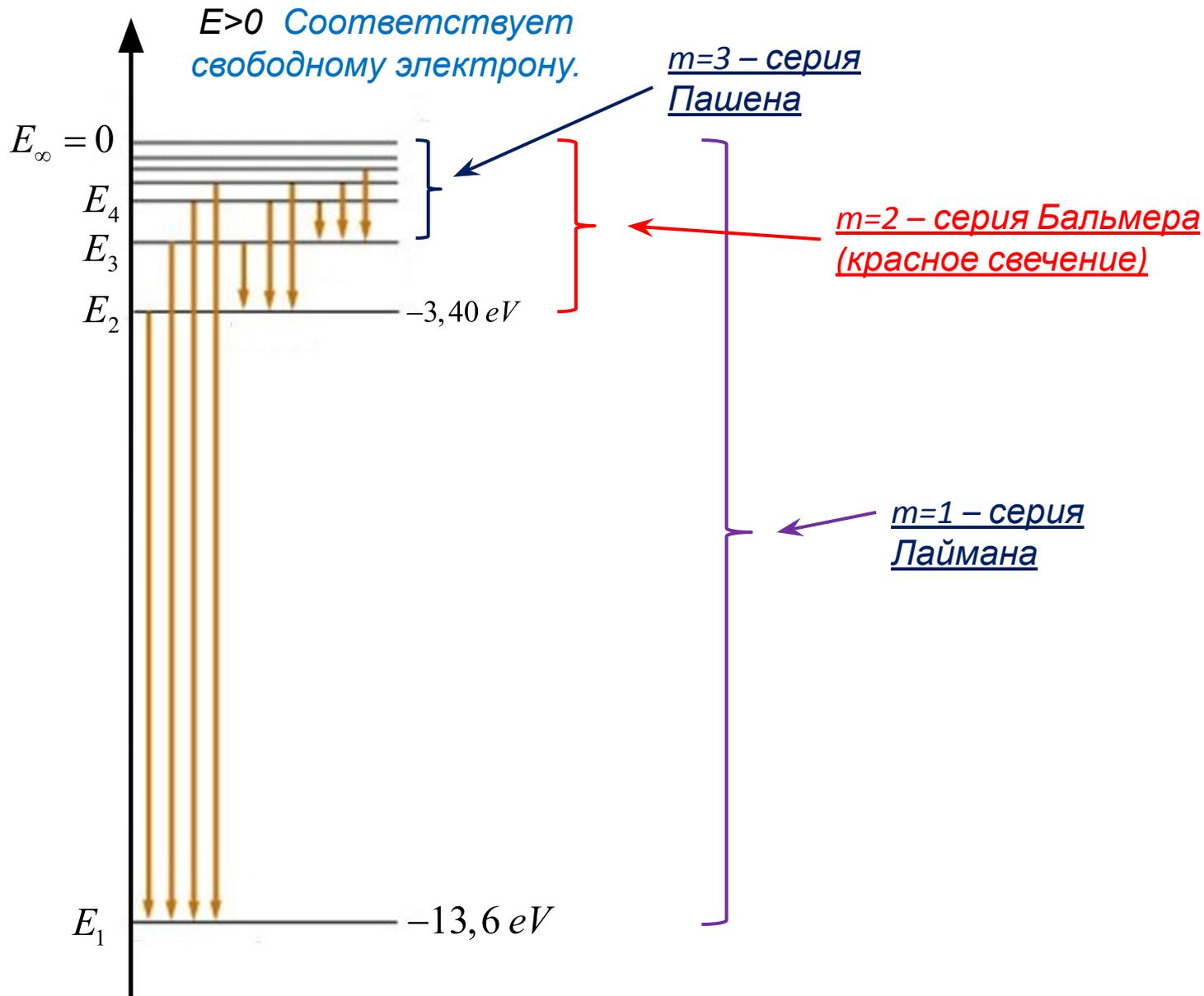
$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$

**Теория Бора**



**Эксперимент**





## Недостатки теории Бора

Не удаётся рассчитать атомы с двумя (атом He) и более электронами.

Ничего не говорит об интенсивности линий излучения (а она разная для разных линий (например, водород светится красным)).

Основной недостаток непоследовательность:

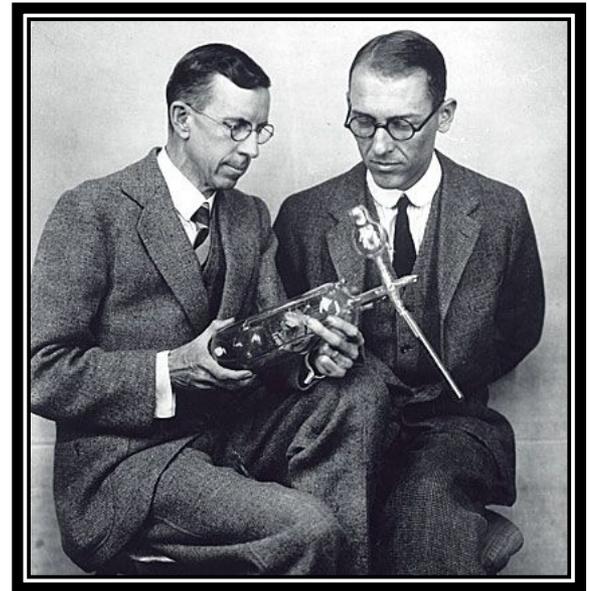
вычисление орбит на основе законов классической механики, считая при этом неприменимой классическую электродинамику.

Промежуточный этап в поисках адекватной теории, получившей название квантовой физики.

*Гипотеза де-Бройля.*  
*Опыты по дифракции*  
*электронов.*



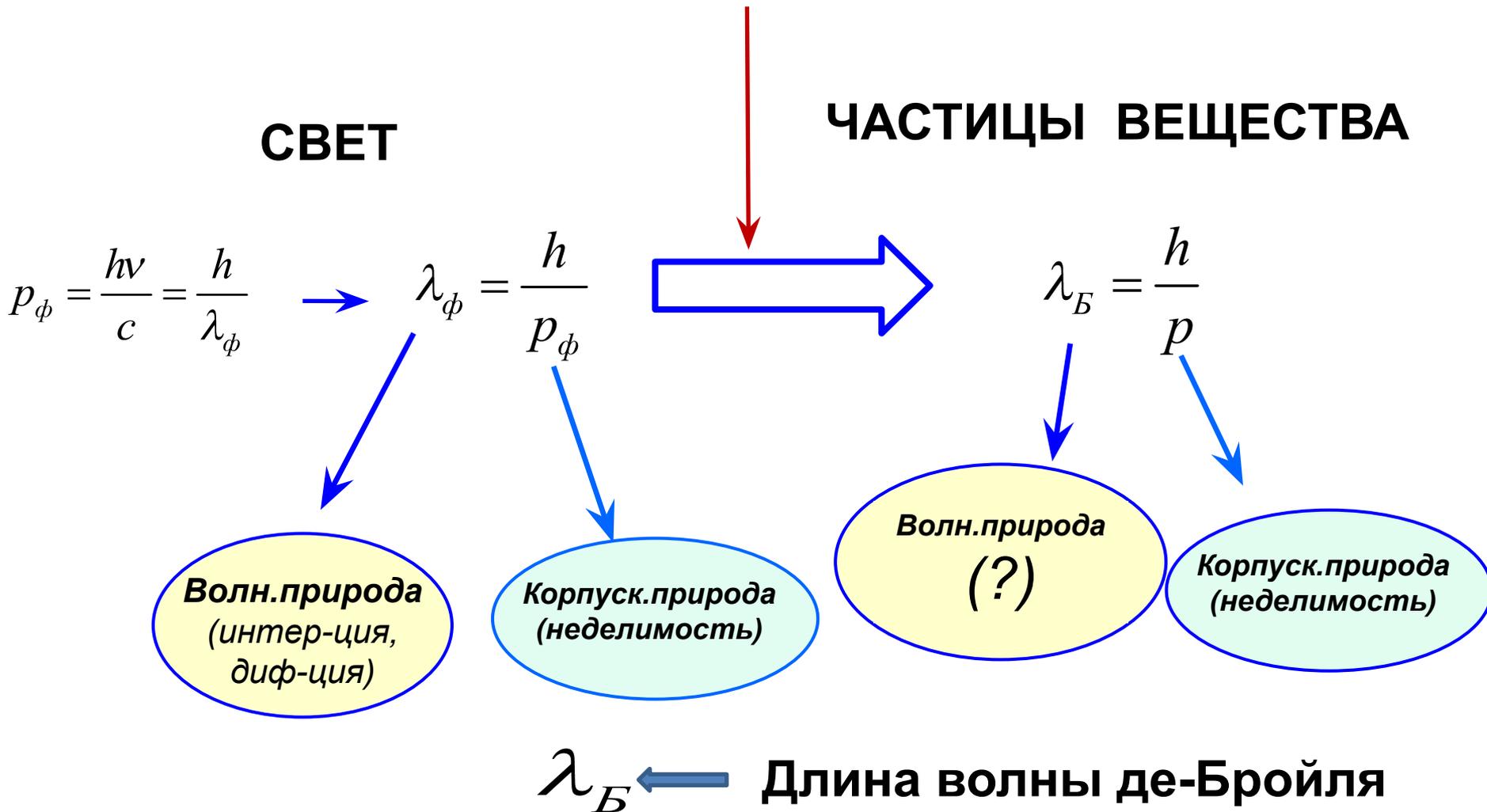
1924 г.  
*Де-Бройль*



1927 г.  
*Дэвиссон и*  
*Джермер*

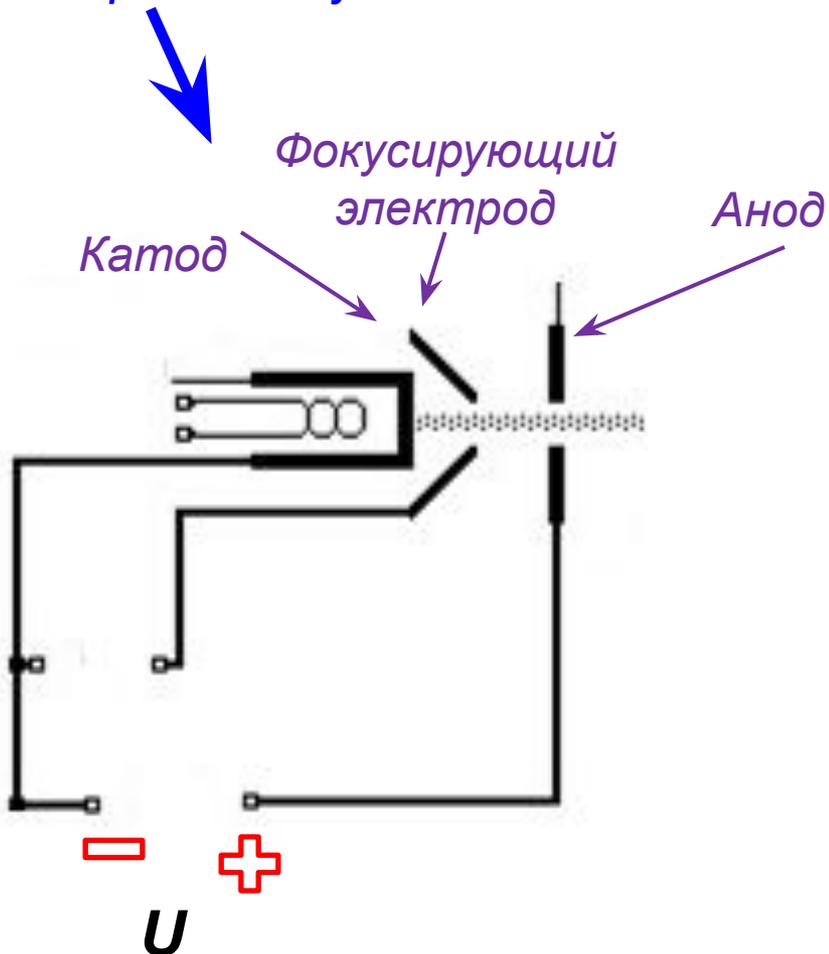
# Гипотеза де-Бройля (1924):

«Корпускулярно-волновой дуализм - универсален»



# Оценка длины волны де-Бройля для электронов.

Электронная пушка



$$eU = \frac{m_e v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$$



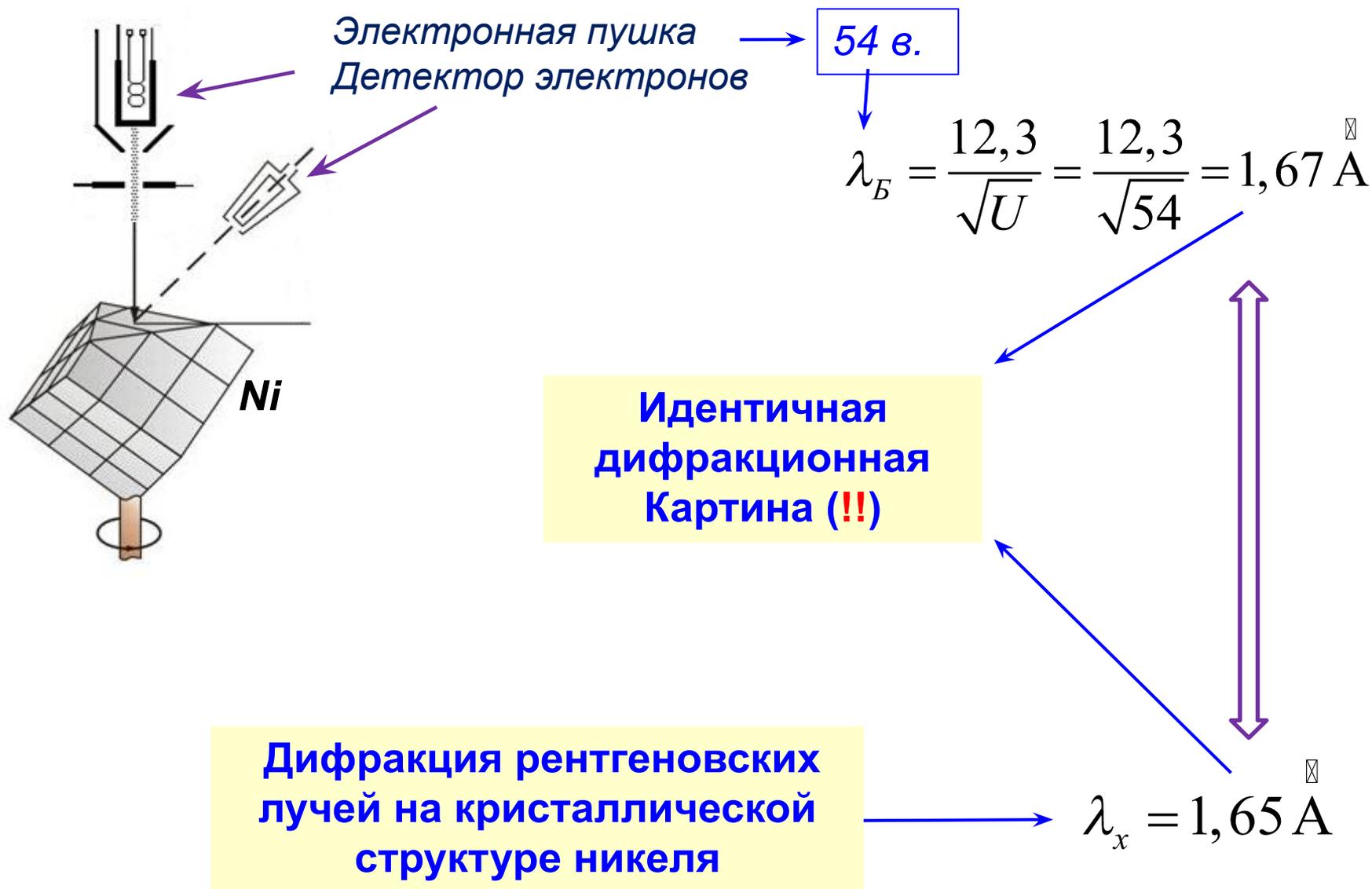
$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}$$

$$\lambda_B = \frac{12,3 \text{ \AA}}{\sqrt{U}} \quad [U] - B$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$U = 54 \text{ В} \Rightarrow \lambda_B = \frac{12,3}{\sqrt{54}} = \frac{12,3}{\sqrt{54}} = 1,67 \text{ \AA}$$

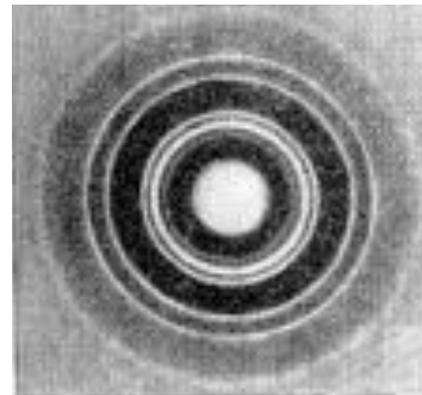
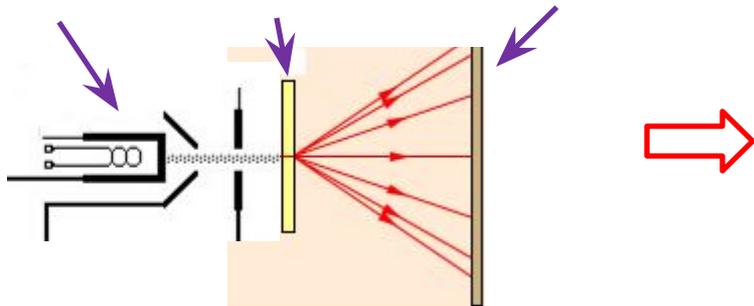
# Опыты Дэвиссона и Джермера: первое подтверждение идеи де-Бройля



## Дальнейшие опыты по дифракции микрочастиц.

Томсон и одновременно Тартаковский: дифракция при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу (1927).

Эл.пучка фольга фотопластинка



Электронограмма

Полная аналогия с рентгенограммой при  $\lambda_{\text{x-ray}} = \lambda_e$

**Штерн & К.:** дифракционные явления в опытах с атомными и молекулярными пучками.

**Доказаны волновые свойства частиц!**

Каждой ? Или совокупности ?

$$\longleftrightarrow \lambda_B = \frac{h}{mv} \propto \sqrt{\frac{1}{mE_k}}$$

Длина волны де Бройля для атомов имеет того же масштаба что и для электронов, благодаря малой (тепловой) скорости/

# Биберман, Сушкин и Фабрикант (1949): Опыты по дифракции электронов с пучками слабой интенсивности

Электрон

регистрировался как



«КОРПУСКУЛЯРНОСТЬ»

**одно целое**

Место прихода электрона на фотопластинку имело **случайный характер**. При достаточной экспозиции **получалась дифракционная картина**.



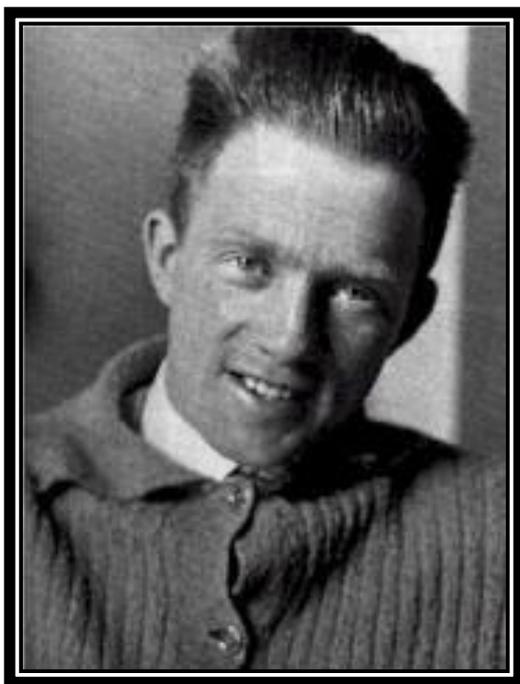
«ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА»

**Вывод.** Единичная частица обладает волновыми свойствами. А именно, её положение в пространстве определяется вероятностным законом и этот вероятностный закон таков, что при усреднении (по времени или по большому числу частиц) реализуется волновая картина.

Усреднение по времени (пускаем электроны по одному и ждём пока их не придёт достаточно много) или по большому числу частиц в потоке (много электронов одновременно, видим мгновенную картину) эквивалентно.

В то же время **микрочастицы обладают свойствами корпускулярности**: масса, размеры, заряд - неделимы.

*Принцип  
неопределённости  
Гейзенберга (1927г).*



*Гейзенберг, Вернер Карл  
(1901-1976)*

# Оптика:

При каких то условиях свет в однородной среде распространяется в виде прямолинейных лучей



Можно говорить о фотонах (частицах), движущихся по прямолинейным траекториям.

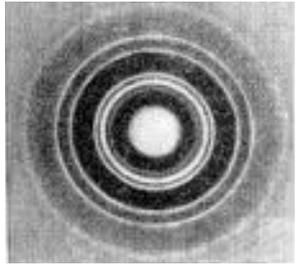
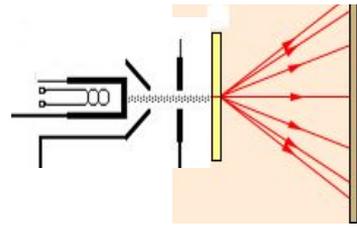
При других условиях наблюдается дифракция, т.е. существенно непрямолинейное распространение света, которое описывается, исходя из волновых представлений.



Понятие о траектории фотона здесь неадекватно.

# Микрочастицы вещества

Обладают волновыми свойствами: дают такие же дифракционные картины, как и рентгеновские лучи.



Следует ожидать, что при определённых условиях понятия о положении в пространстве и траектории неприменимы к описанию движения микрочастиц.

# Принцип неопределённости Гейзенберга

Степень точности, с которой к частице может быть применено представление об её определённом положении в пространстве



Соотношение неопределённости Гейзенберга

Частица не может иметь одновременно точного значения координаты  $x$  и проекции импульса на направление  $x$ .



$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$



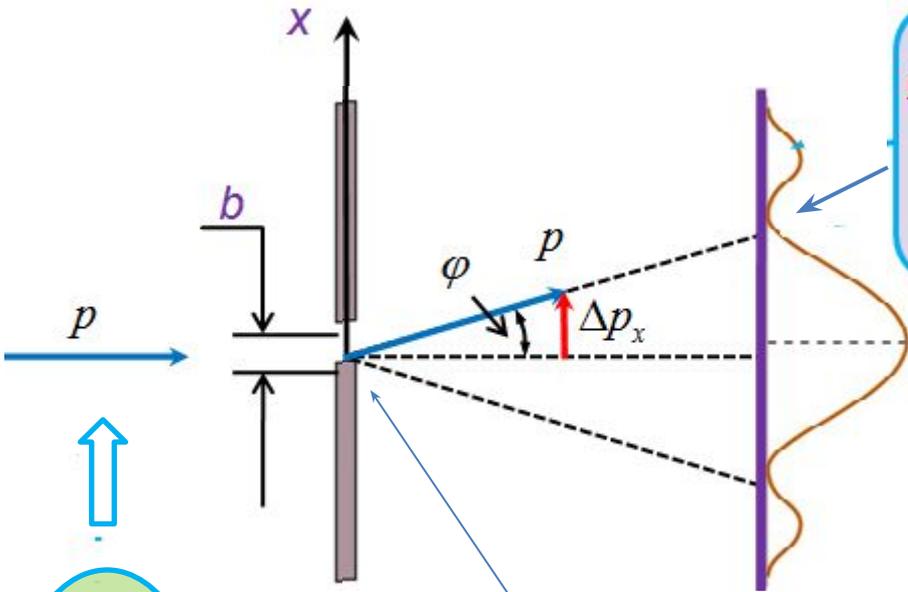
степень неточности

Соотношения неопределённости Гейзенберга

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta p_z \Delta z \geq \frac{\hbar}{2}$$

**Пример.** Определим значение координаты  $x$  свободно летящей микрочастицы, поставив на ее пути щель шириной  $b$ .

При прохождении щели появляется составляющая  $p_x$ . Её величина лежит в пределах  $\Delta p_x$ , определяемых шириной дифракционного максимума.



*Первый дифракционный минимум*  
 $b \sin \varphi = \lambda$

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad b = \Delta x$$

$$p \sin \varphi = \Delta p_x$$

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h$$

$$\Delta x \cdot p \sin \varphi = h \quad \underline{\underline{\Delta x \cdot \Delta p_x = h}}$$

$p_x = 0$   
 $\Delta p_x = 0$   
 $\Delta x = \infty$

«Локализация» частицы путем сужения щели

$$\Delta x \rightarrow 0$$

$$\Delta p_x \rightarrow \infty$$

«Расползание» дифракционной картины

Определенность импульса может быть сохранена путем полной неопределенности координаты (отсутствии преграды со щелью)

$$\Delta p_x \rightarrow 0$$

$$\Delta x \rightarrow \infty$$