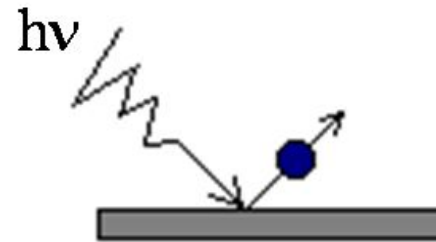
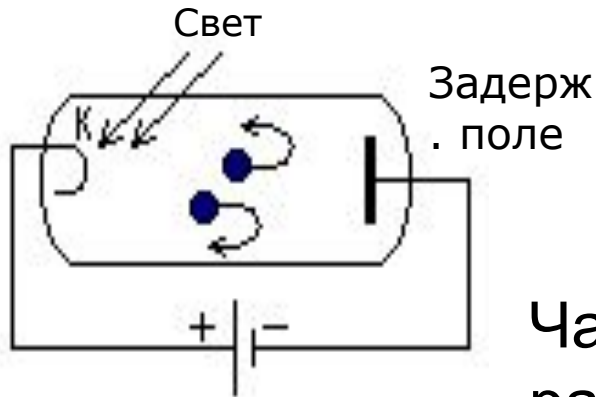
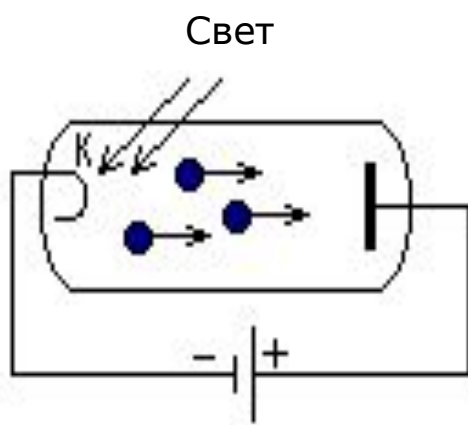


# Фотоэффект объяснение Эйнштейна

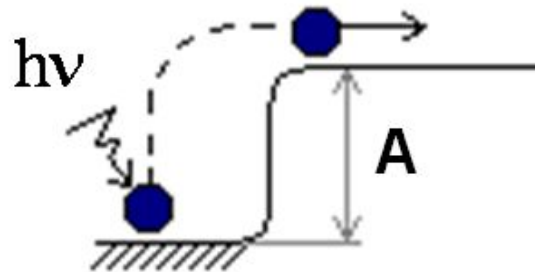
Электроны поглощают свет **квантами  $h\nu$**  (введенными Планком). Энергия кванта усваивается электроном **целиком**.



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

Уравнение  
Эйнштейна

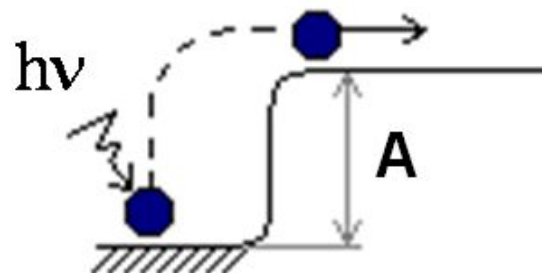
$$h\nu = A + \frac{m_e v_e^2}{2}$$



# Фотоэффект - 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.

Характерная  
для данного  
металла

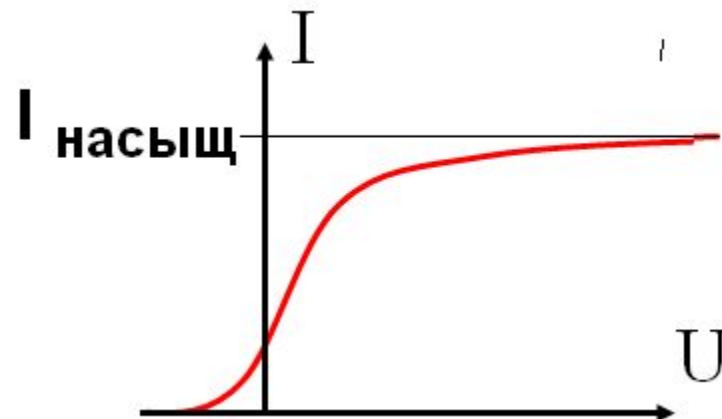
$h\nu < A$  – фототок = 0

$h\nu = A/h$  - **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



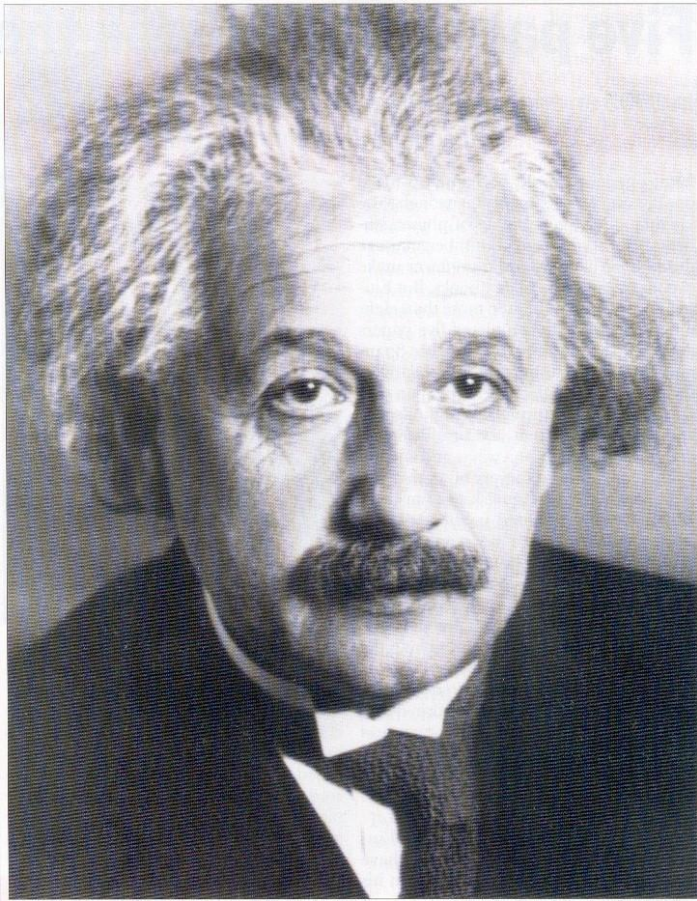
Фотоприёмники -  
электронно-  
оптические  
преобразователи -  
оптическая связь и  
Д



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  $h\nu$

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

$$\left. \begin{array}{l} m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ v = c \end{array} \right\} \boxed{m_0 = 0} \quad \text{Масса покоя фотона равна 0}$$

# 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 проявляется 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,  **$p=2w$**

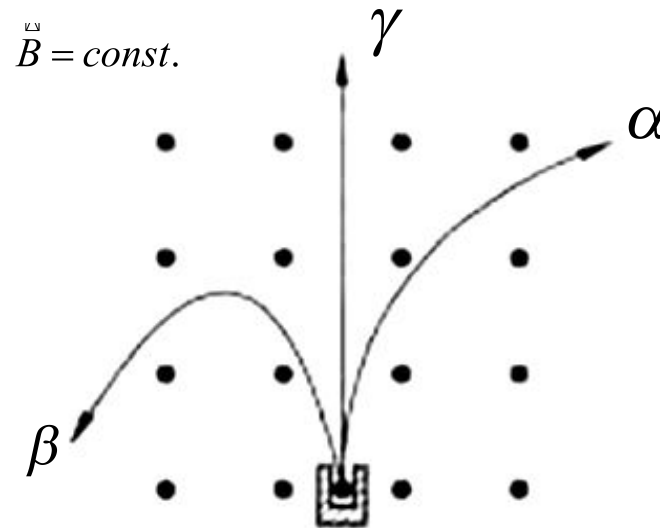
# Опыты Резерфорда.

## Планетарная модель

### атома.



1871 – 1937



## Цель опыта Резерфорда



Исследование распределения положительного и отрицательного зарядов в атоме

Было известно: атомы нейтральны, в состав атомов входят электроны, линейчатые спектры излучения



Модель Томсона:

положительный заряд равномерно распределён в пределах атома, электроны - внутри

## Метод исследования

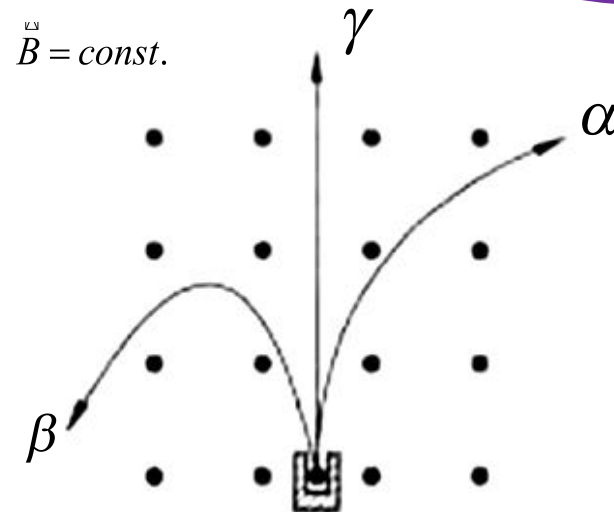


Исследование рассеяния альфа-частиц атомами тонкой металлической фольги

## Схема установки:



$$\alpha (He^{++}) \Rightarrow v = 10^7 \text{ м/с}$$
$$m(He^{++}) \cong 10^4 m(e^-)$$



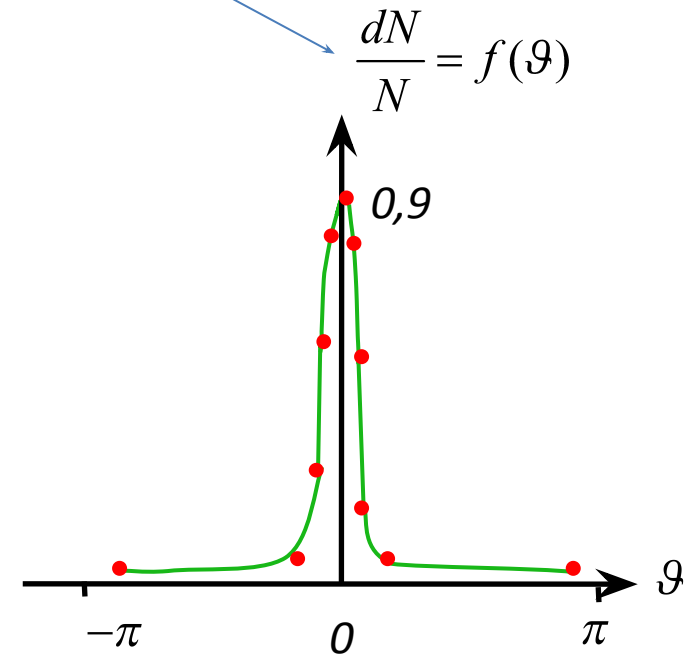
Вакуум...ZnS...Сцинтилляции и...

Результаты  
исследований:



Вакуум...ZnS...Сцинтилляции  
и...

Относительное  
число частиц



Линейные размеры ядра составляют 1/10 000 линейных  
размеров атома; почти вся масса атома сосредоточена в  
ядре



Атом пуст

Оценка линейного размера ядра

**$5 \cdot 10^{-12}$  см**

Линейные размеры ядра составляют  $1/10\,000$  линейных размеров атома; почти вся масса атома сосредоточена в ядре.

1911 г.



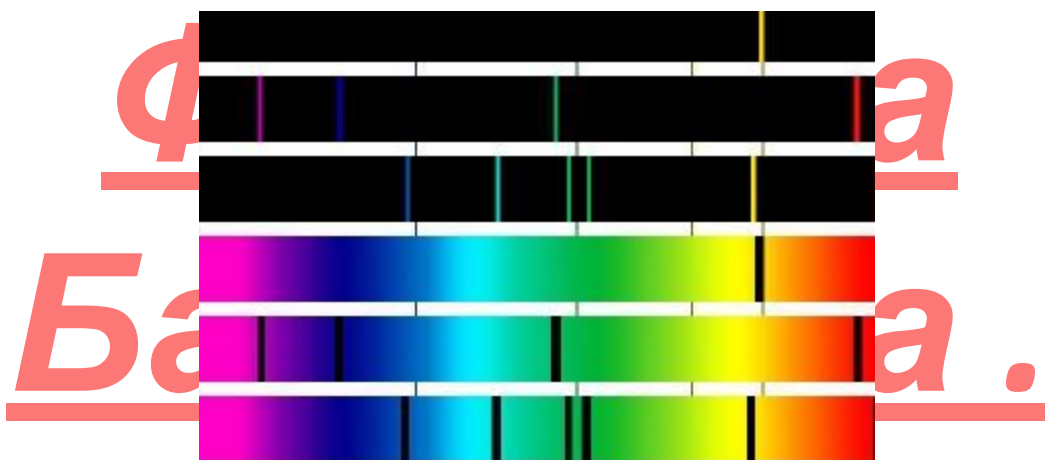
## Планетарная (ядерная) модель атома:

«Атом состоит из положительно-заряженного ядра, вокруг которого перемещаются по замкнутым траекториям, подобно планетам вокруг Солнца, электроны».

## Недостатки планетарной модели атома.

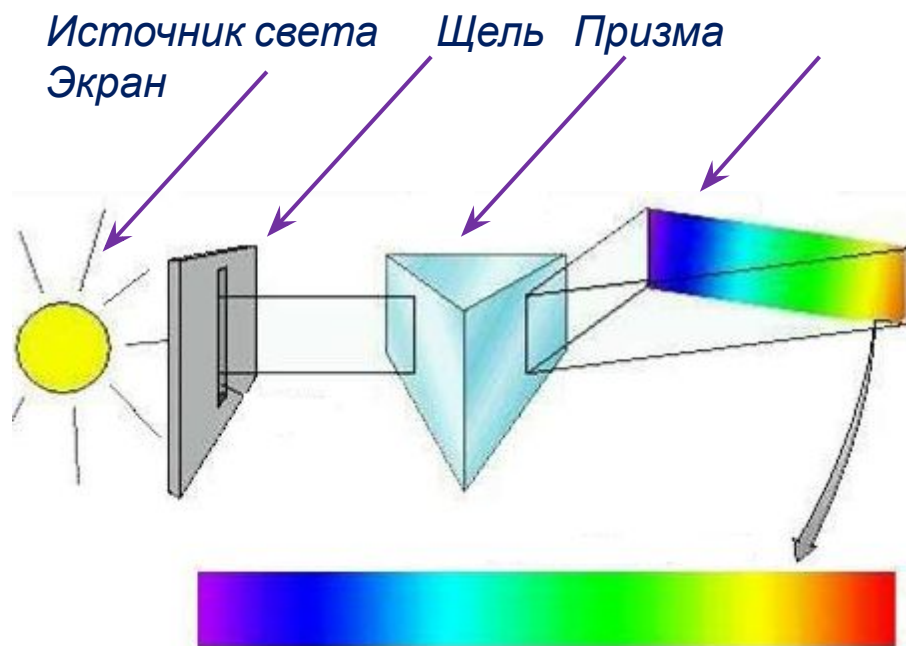
1. **Неустойчивость:** криволинейное движение заряженной частицы (электрона)  Излучение ЭМВ   
Электрон должен в конечном счете упасть на ядро
2. Нет объяснения дискретности спектров испускания.

# Закономерности в атомных спектрах.



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

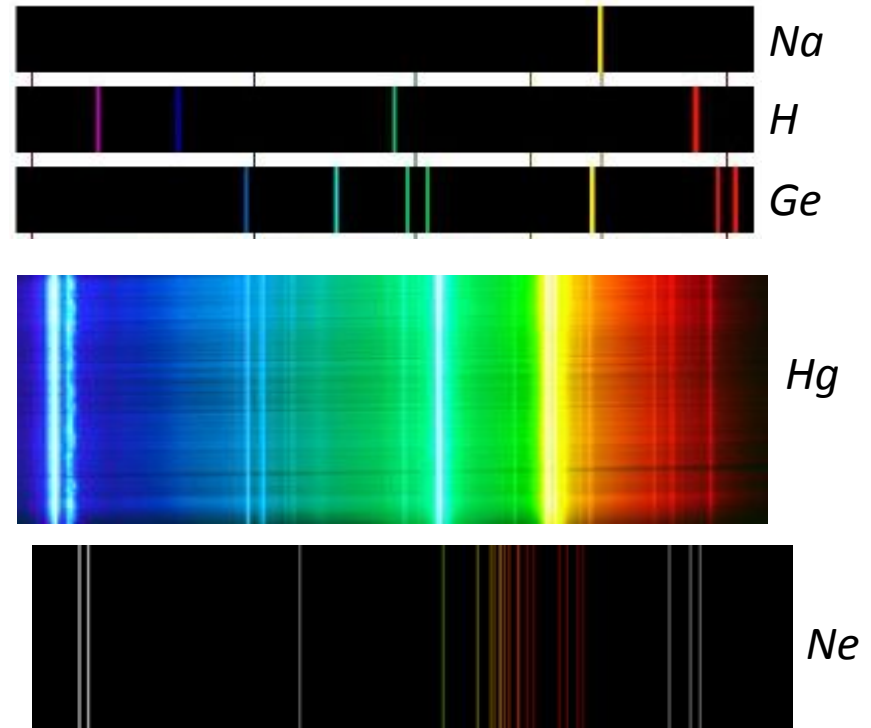
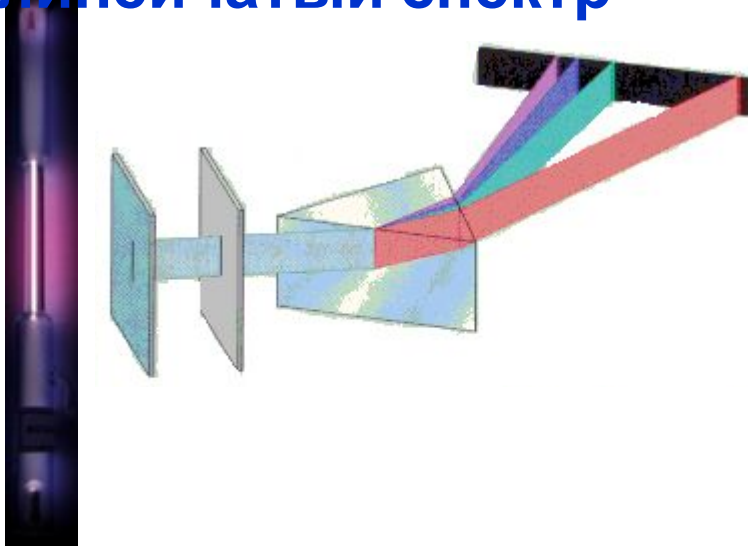
# Сплошной и линейчатый спектры испускания.



Сплошной спектр солнечного света

Излучение индивидуальных атомов (разреженного газа) состоит из отдельных узких спектральных  линий

**линейчатый спектр**

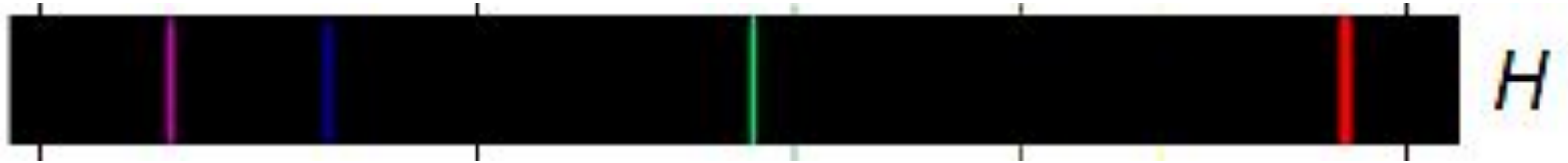


**Для атомов каждого  
вещества характерен  
свой спектр.**



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

# Закономерности в спектре атома водорода. Формула Бальмера.



Серия линий в видимой  
части спектра атома  
водорода

**Серия Бальмера**

1885г.  
Математически  
записанная Бальмером  
наблюдаемая  
закономерность...

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

# Дальнейшие исследования спектра атома 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  
(ультрафиолет)

$m=2$  – серия Бальмера (видимая)

$m=3$  – серия Пашена (инфракрасная)

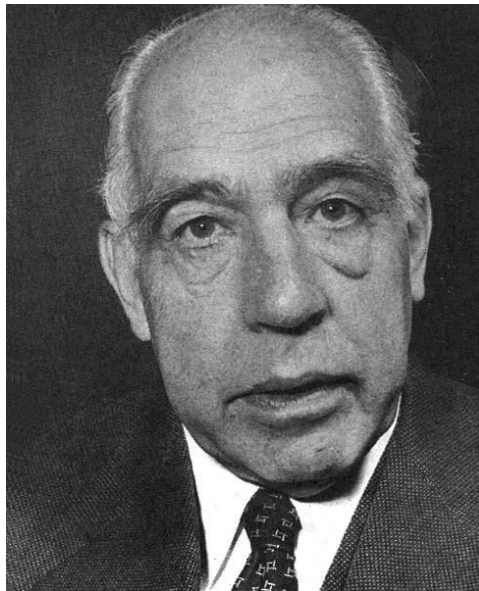
$m=4$  – серия Брэкета (инфракрасная)

$m=5$  – серия Пфунда (инфракрасная)

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

**Критерий состоятельности модели атома  
получение формулы Бальмера.**

# Постулаты Бора. Модель атома водорода по Бору.



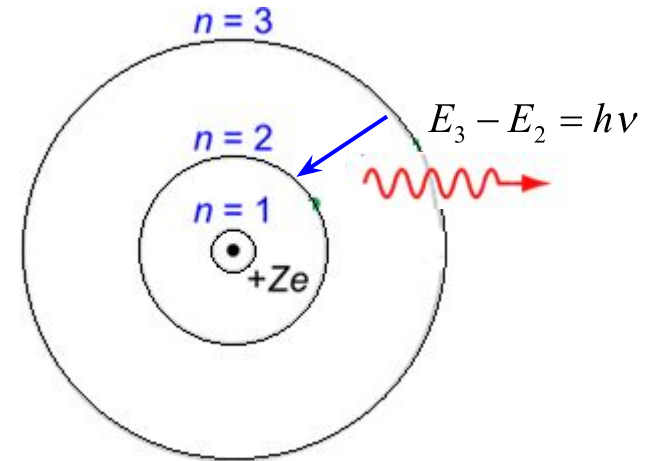
Нильс Бор  
(1913г.)

## Первый постулат Бора.

Атом может находиться **только** в особых *стационарных, или квантовых* (дискретных) *состояниях*, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . Находясь в любом 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.

$$E_n - E_m = h\nu$$

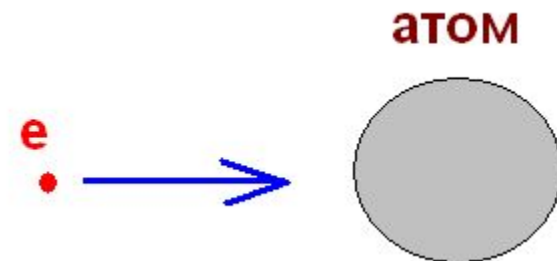
---

## Опыт Франка и Герца (1914).

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

**Идея опыта:** свободный электрон при столкновении с атомом не может передать ему свою энергию путём изменения кинетической энергии атома из-за огромной разницы масс.

Упругое столкновение.



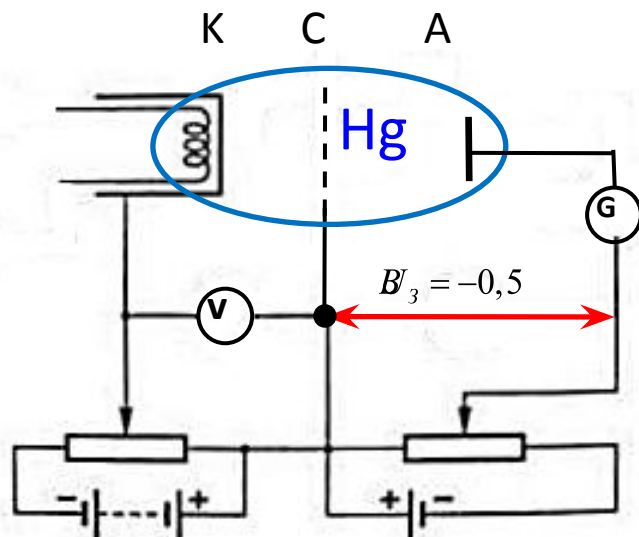
Но электрон может передать свою энергию электронам, принадлежащим атому. При этом изменится внутренняя энергия атома.

Неупругое столкновение.

Если внутренняя энергия атома может изменяться непрерывно, электрон в неупругих столкновениях может передать атому **любую** порцию энергии.

Если внутренняя энергия атома может изменяться лишь дискретно ( **1-ый постулат Бора** ), электрон в неупругих столкновениях может передать атому лишь определённые (дискретные) порции энергии.

# Опыт Франка и Герца (1914).

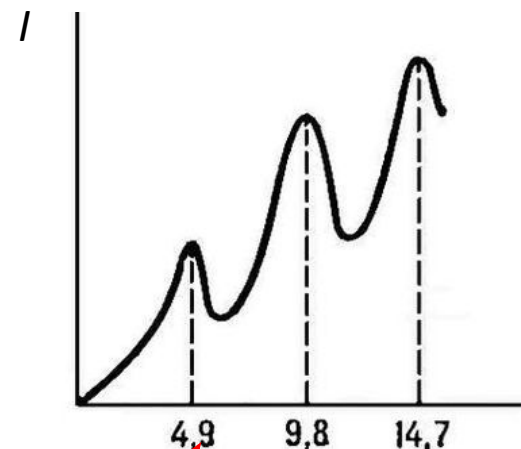


1. Пары Hg в откаченном объёме;
2. Катод-сетка: ускор. разность потенциалов
3. Сетка-анод: задерживающая разность потенциалов

Атом поглощает энергию (механическую) дискретно!

Доказательство 1-го постулата Бора.

## Результат эксперимента:



Ускоряющее напряжение, В

Начало неупругих взаимодействий

Начало 2-х возможных неупругих ...

...3-х...

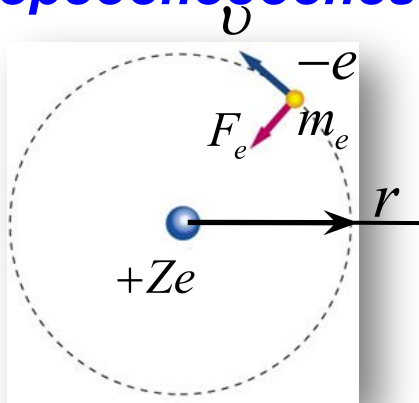
# ДО СИХ

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

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

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**

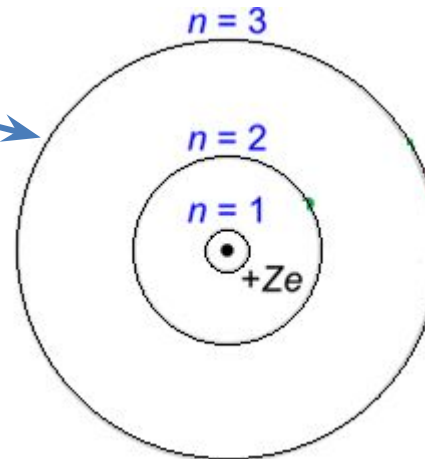


$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e Z e^2} \cdot n^2$$

**Скорость  
электрона на  
боровских  
орбитах**



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



**Атом Н, Z=1**

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

$$v_1 = 2 \cdot 10^6 \text{ м/сек}$$

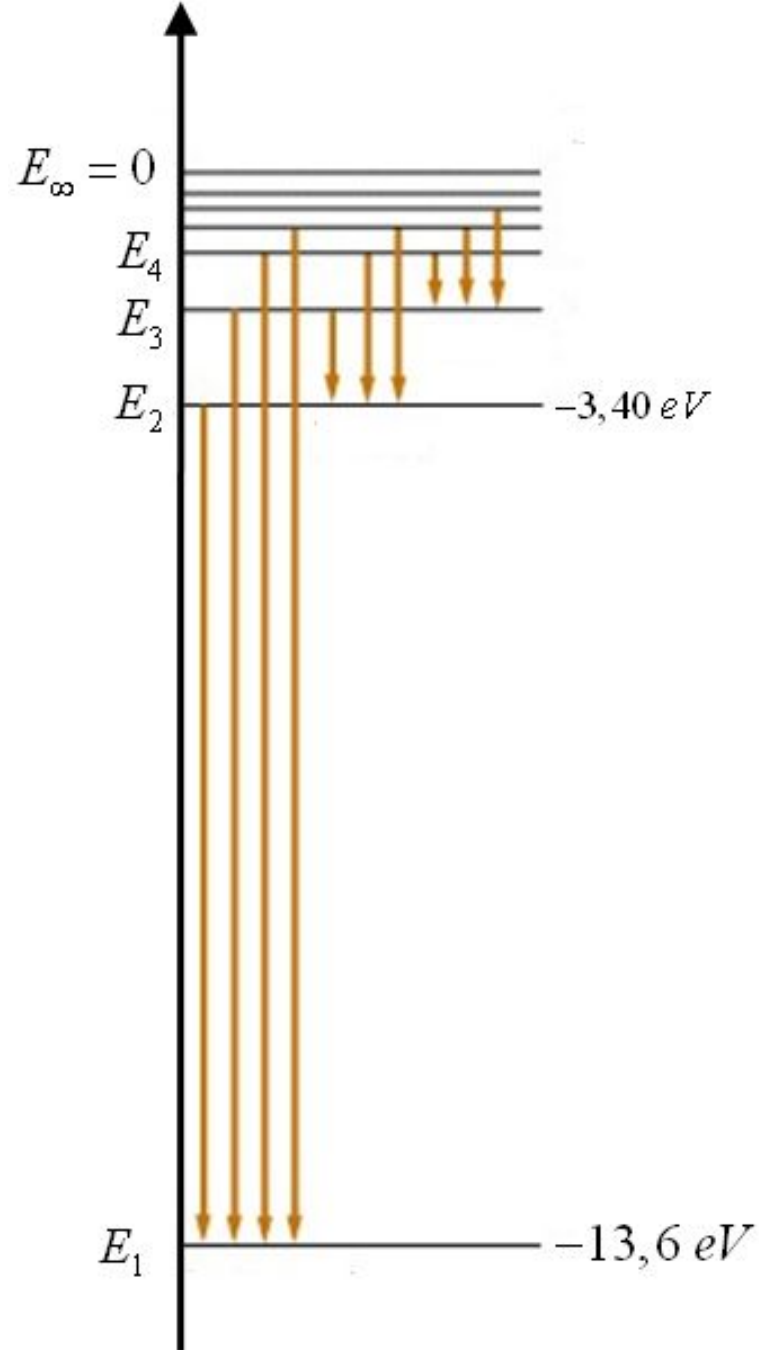
**Энерг**

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

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

# Энергетические уровни атома водорода в модели Бора

$$E_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$



2-ой п.Бора  $\rightarrow E_n - E_m = h\nu$

$$E_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} > E_m = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{m^2}$$

$$n > m$$

$$\nu = \frac{1}{h}(E_n - E_m) = \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Постоянная  
Ридберга

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \varepsilon_0^2}$$

$Z=1 \Rightarrow R = \frac{\pi m_e Z^2 e^4}{4h^3 \varepsilon_0^2} = \frac{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{4 \cdot (6,6 \cdot 10^{-34})^3 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$

Формула  
Бальмера

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

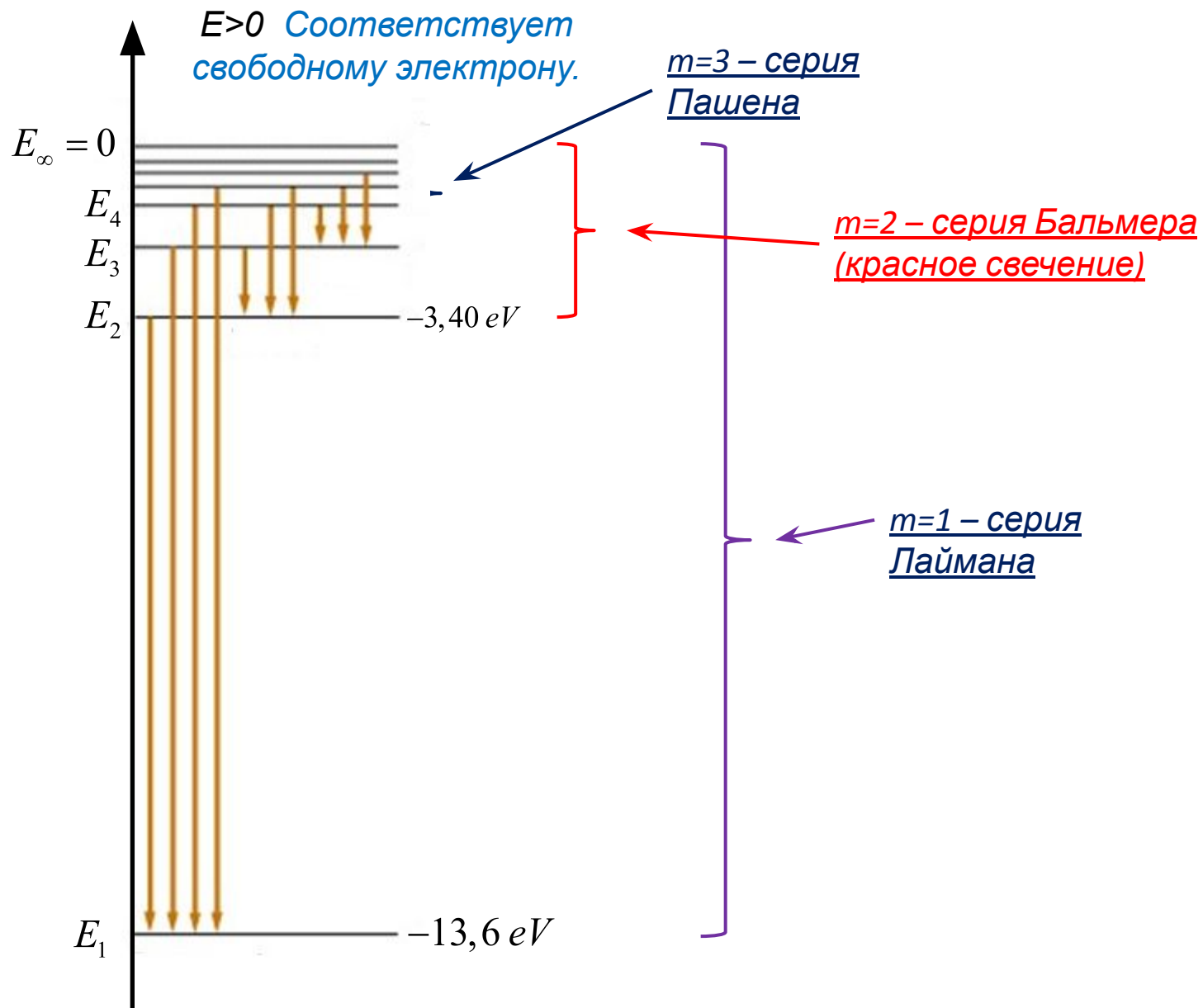
$$n = 3, 4, 5, \dots$$

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

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.



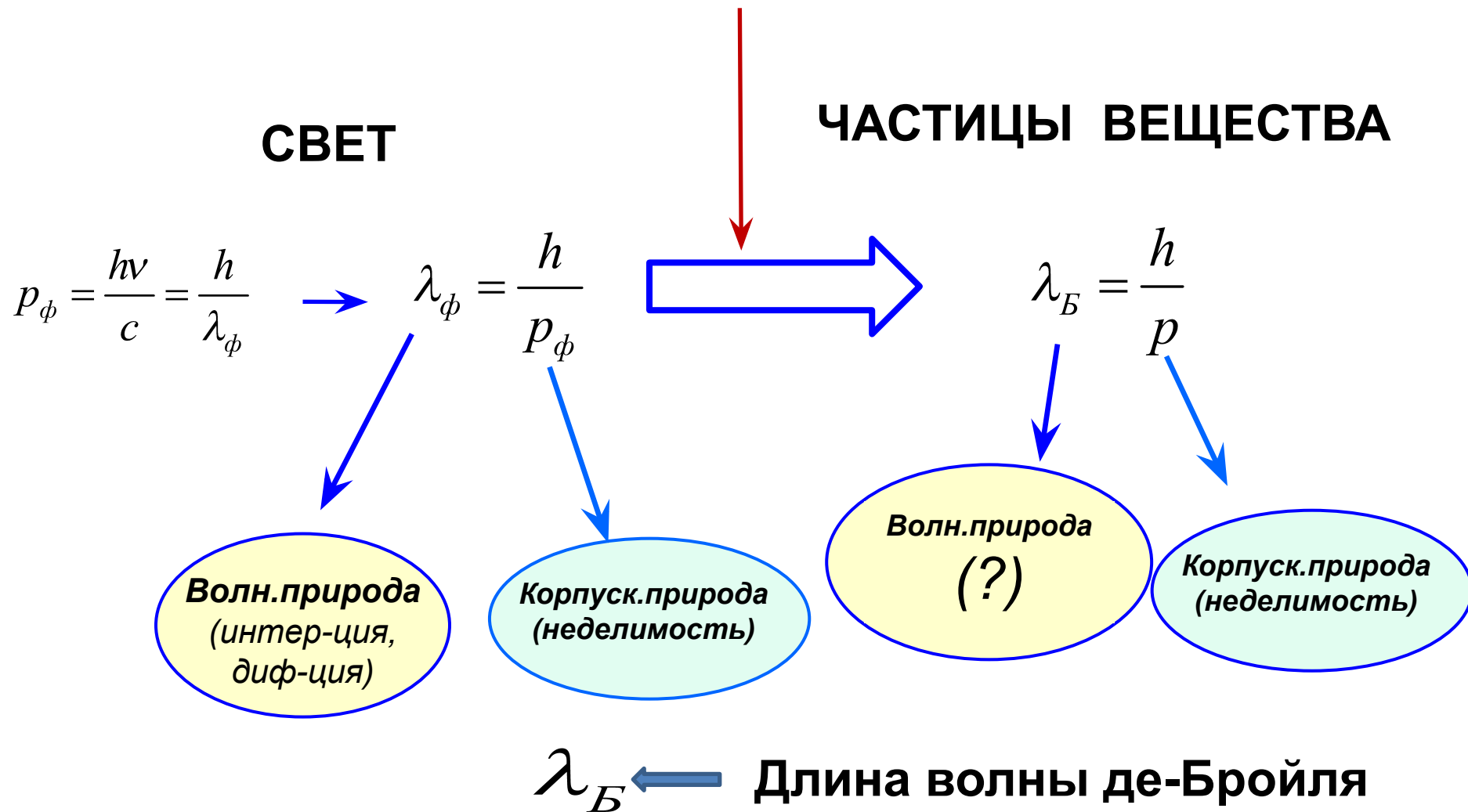
1924 г.  
Де-Бройль



1927 г.  
Дэвиссон и  
Джермер

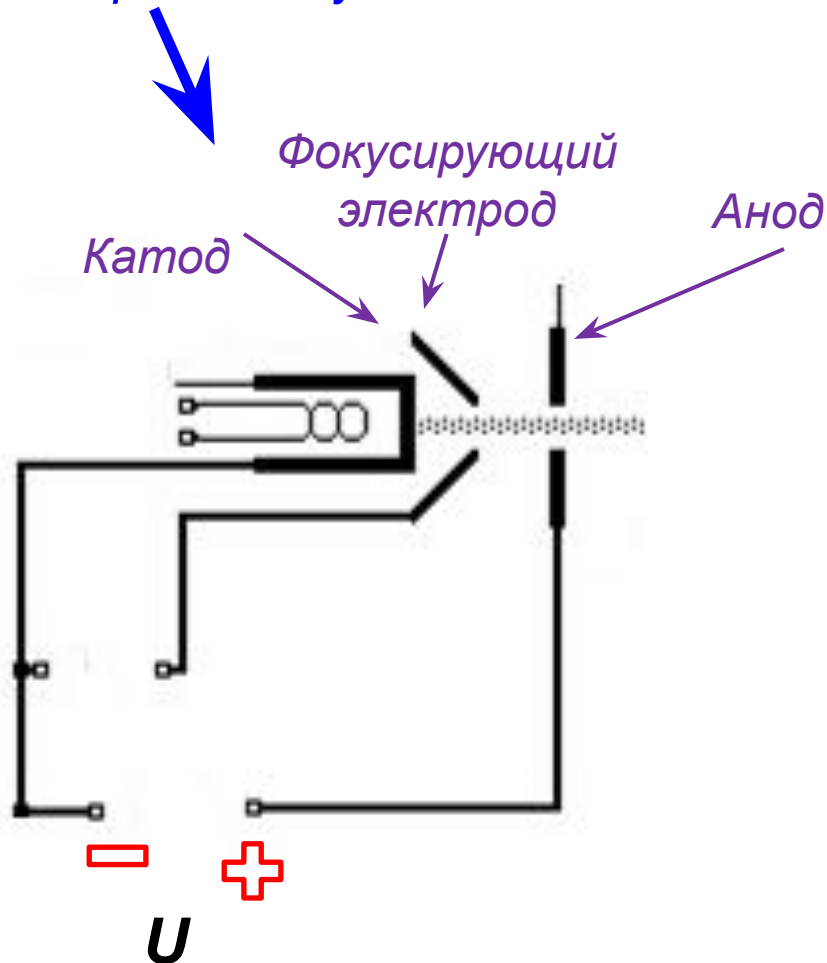
# Гипотеза де-Бройля (1924):

«Корпускулярно-волновой дуализм - универсален»



# Оценка длины волны де-Бройля для электронов.

Электронная пушка



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

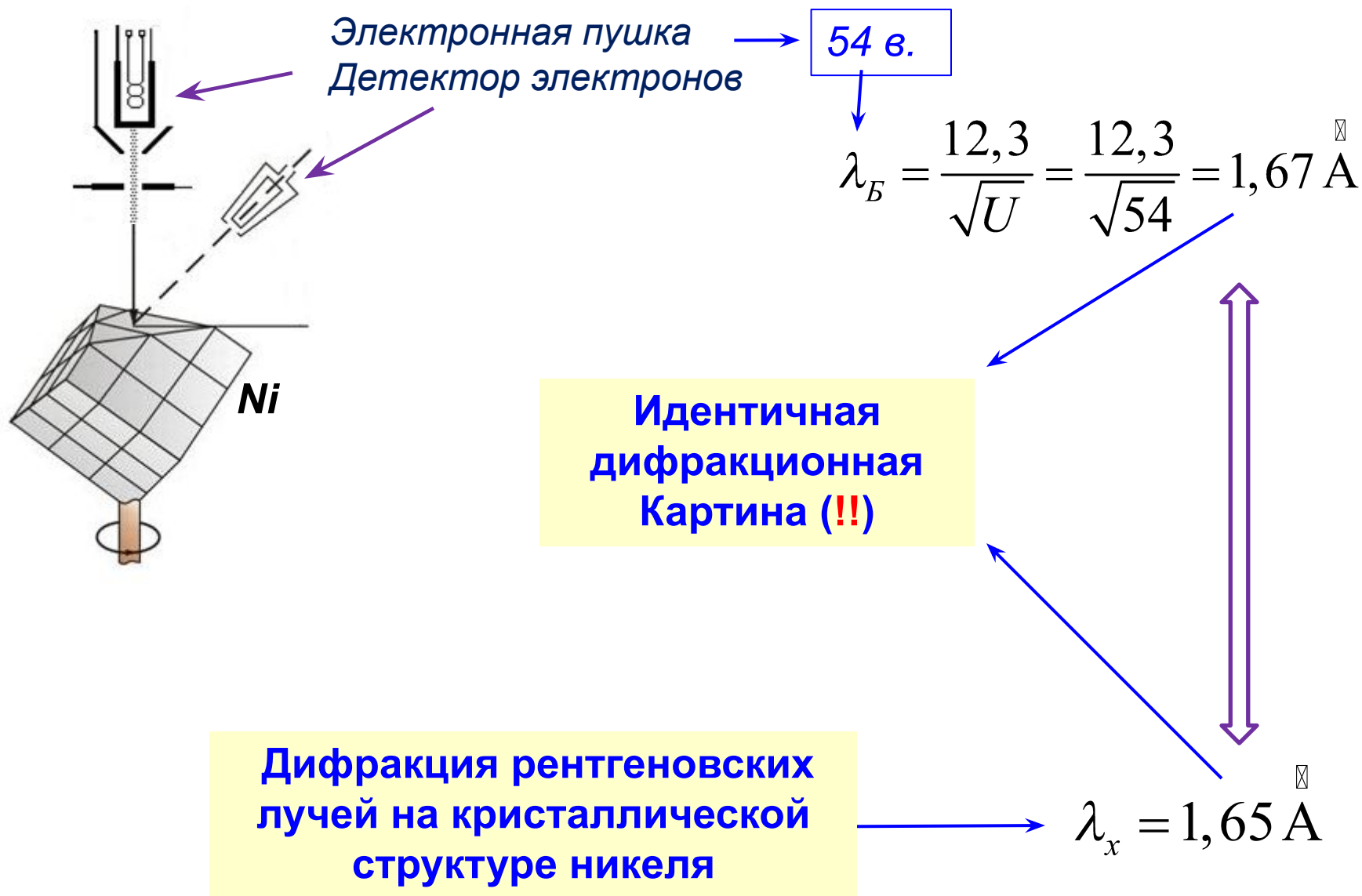
$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}$$

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

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

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

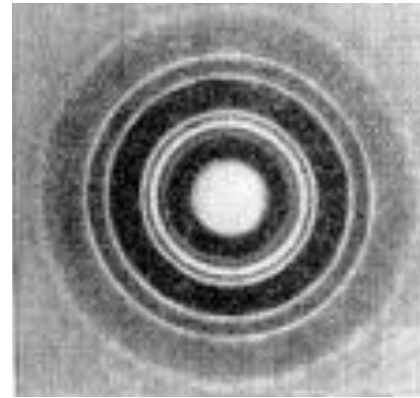
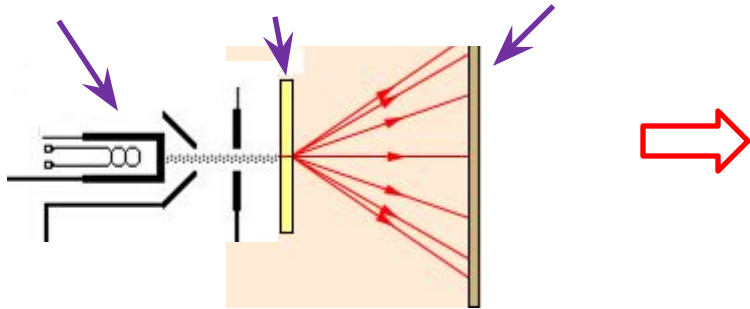
# Опыты Дэвиссона и Джермера: первое подтверждение идеи де-Бройля



## Дальнейшие опыты по дифракции микрочастиц.

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

Эл.пучка фольга фотопластинка



Электроннограмма

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



**одно целое**

«КОРПУСКУЛЯРНОСТЬ»

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



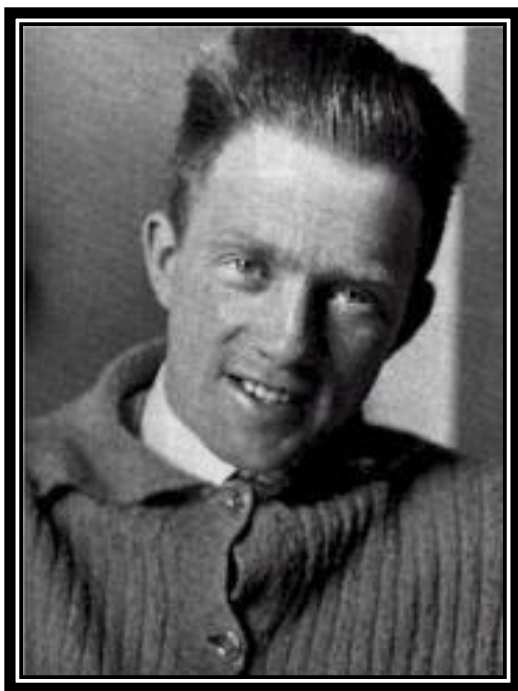
«ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА»

**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.

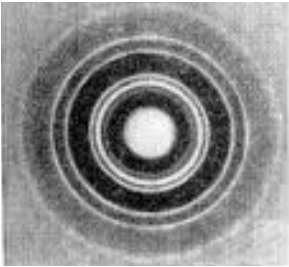
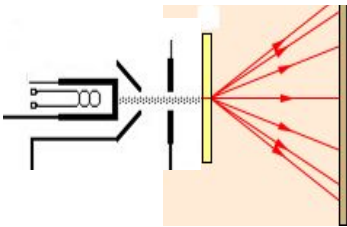
При других условиях наблюдается дифракция, т.е. существенно непрямолинейное распространение света, которое описывается, исходя из волновых представлений.



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  $x$ .



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

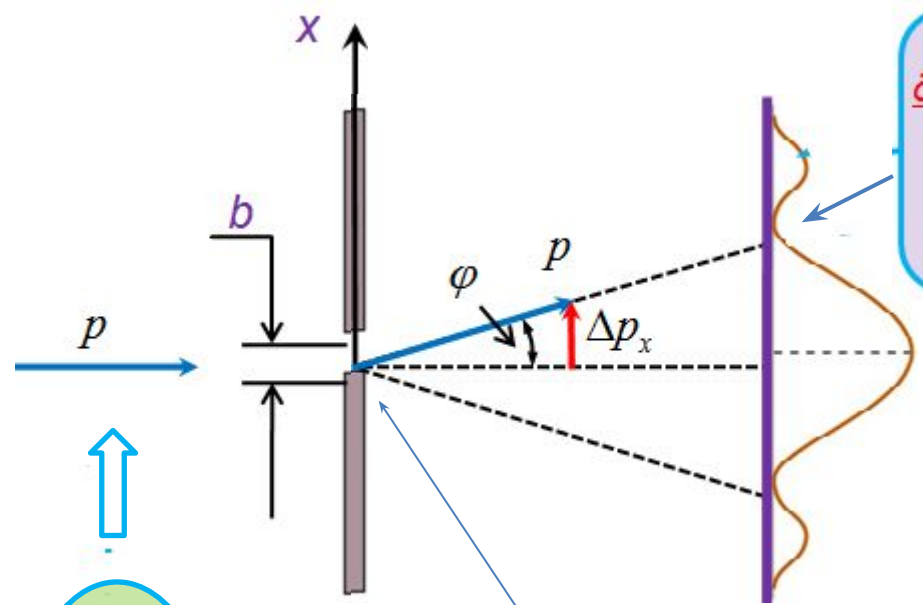


степень неточности

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  $b$ .



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

«Локализация» частицы путем сужения щели

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

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

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

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

$$\Delta x \rightarrow 0$$

$$\Delta p_x \rightarrow \infty$$

«Расползание» дифракционной картины

$$\Delta p_x \rightarrow 0$$

$$\Delta x \rightarrow \infty$$

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

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

