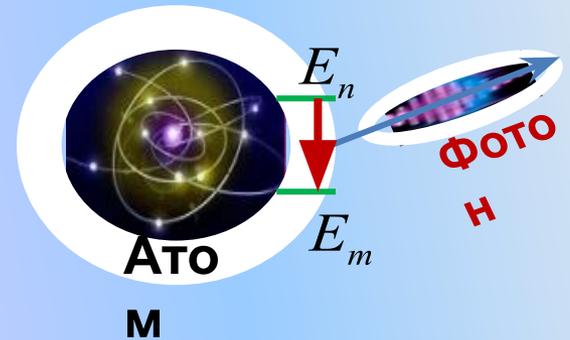


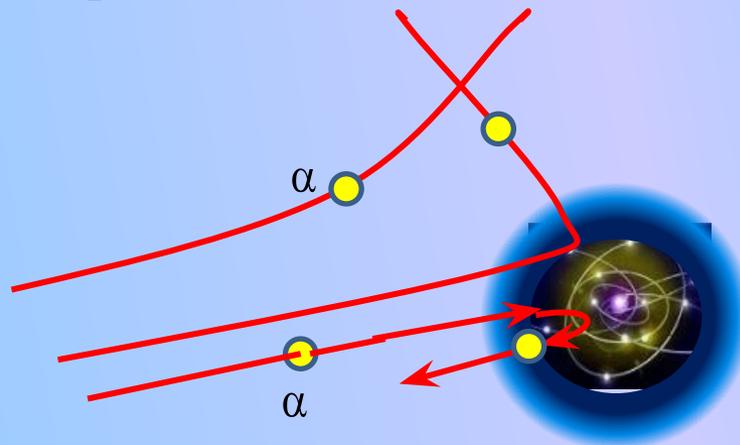


# Физик а атома



## Атом водорода и

## водородоподобные ионы



# Излучение атомарного водорода

- Оптические спектры
- и строение атомов

Спектральные серии

формула Бальмера

строение атома

по постулатам Н. Резерфорда и Н. Бора.

$$\hbar \omega$$

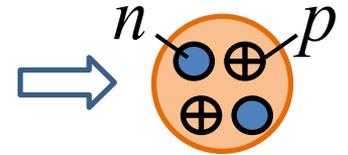
Теория атома Н. Бора с квантованием момента импульса электрона в стационарных



# Радиоактивность. Альфа-частицы

**Открытие радиоактивности:** в 1896г. (Франция А.Беккерель).  
 Некоторые радиоактивные элементы (**уран, радий**, и др.) обладают способностью испускать быстрые заряженные альфа-частицы, которые при столкновениях могут проникать внутрь атомов и давать сведения об их внутреннем устройстве.

**Альфа-частицы** – ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}^{++}$ , состоящие из двух **протонов** и двух **нейтронов**.



Заряд частицы  $q_\alpha = 3,2 \cdot 10^{-19}$

Частицы имеют скорость  $v_\alpha \approx 10^7$  м/с

и кинетическую энергию  $T_\alpha \approx (4 \text{ эВ})$

Элементарный заряд и

массы:  
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$

$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ ,  $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ ,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$

# ОПЫТЫ

## Резерфорда

Альфа-частицы проходили через фольгу, отклоняясь на разные углы  $\theta$  (происходило их рассеяние).

Толщина фольги составляла  $\approx 0,1 \text{ мкм}$ .

Рассеянные частицы попадали на экран, покрытый сульфидом цинка  $ZnS$ , и вызывали вспышки света, которые фиксировались визуально с помощью микроскопа

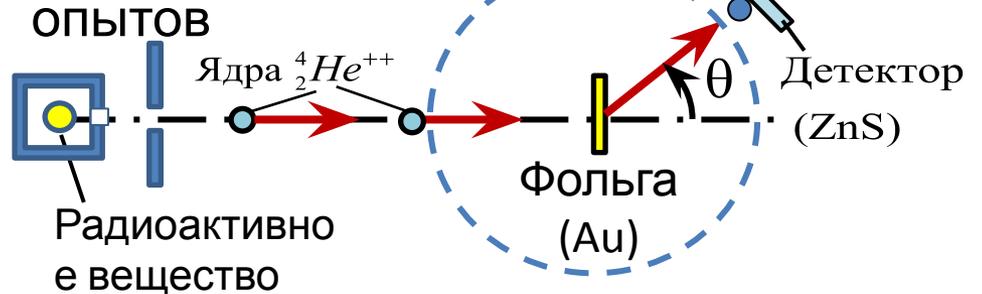
Чтобы узнать, как устроен атом, надо прозондировать его быстрыми заряженными альфа-частицами и по распределению рассеянных частиц

по углам определить его внутреннюю структуру. Резерфорд на основе результатов опытов разработал теорию рассеяния альфа-частиц и получил формулу для распределения рассеянных частиц по углам  $\alpha$ ,

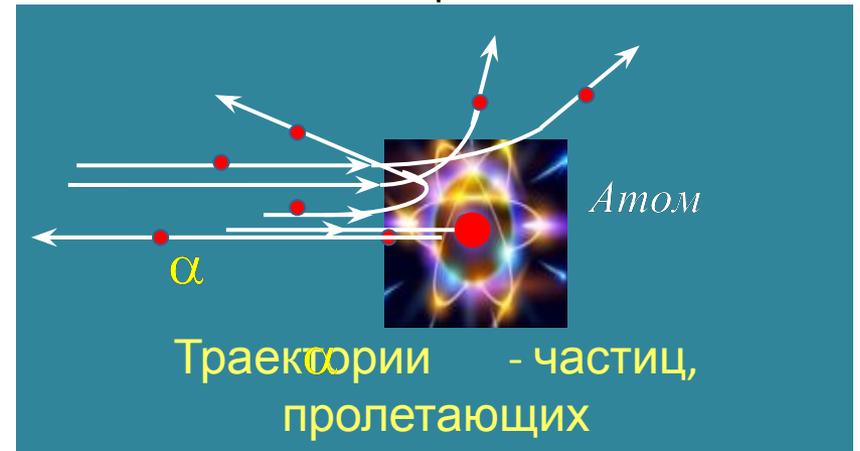
которая подтвердилась при измерениях в экспериментах.

$$dN_{\theta} / N \propto d\Omega / \sin^4 (\theta/2)$$

### Схема



Зондирование фольги альфа-частицами.

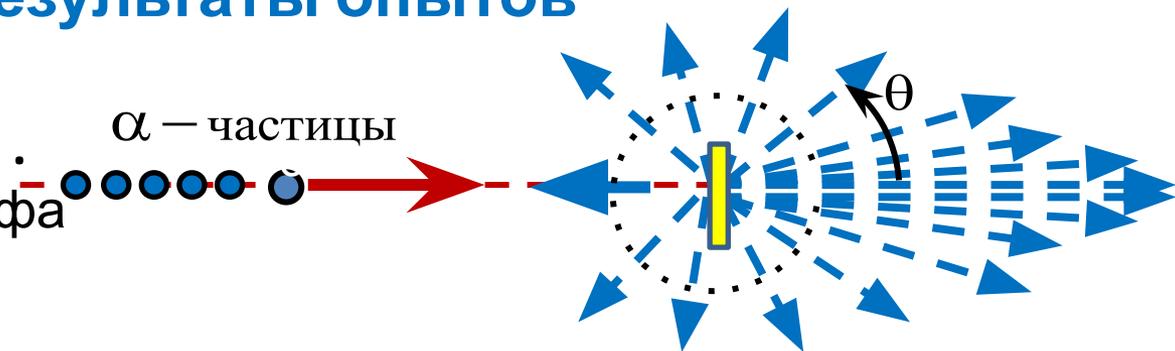


Траектории  $\alpha$ -частиц, пролетающих на разных расстояниях от ядра

(Формула Резерфорда)

# Результаты опытов

1). Большинство  $\alpha$  – частиц проходило через фольгу, отклоняясь на малые углы  $\theta$ .  
 Оказалось, что из  $10^4$  альфа-частиц лишь одна отклоняется на  $180^\circ$ .



**Вывод**  $\Rightarrow$  . Большая часть объема занята легкими частицами – электронами.

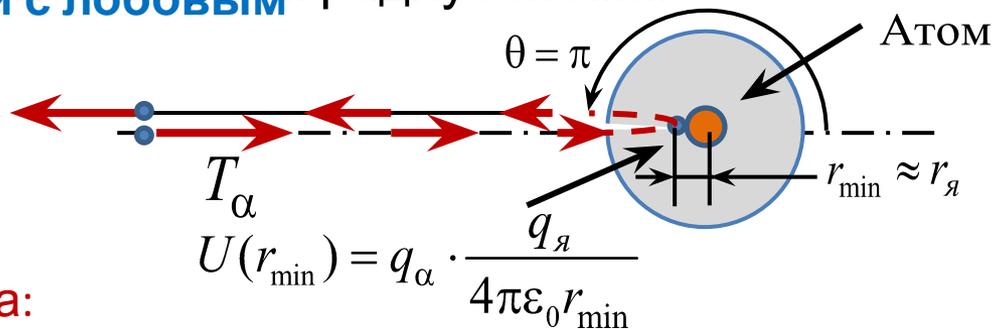
2). Изредка встречаются и альфа-частицы, отклоняющиеся на тупые углы вплоть до  $180^\circ$ .

**Вывод**  $\Rightarrow$  Атомы имеют массивное положительно заряженное ядро,

радиус которого значительно меньше, чем радиус атома.  
**Оценка радиуса ядра из ситуации с лобовым столкновением.**

$\alpha$  – частица, приближаясь к ядру, попадает в тормозящее электрическое поле ядра. Её кинетическая энергия уменьшается и в точке поворота  $r_{\min}$

В точке поворота:



$$U(r_{\min}) = q_{\alpha} \cdot \frac{q_{\text{я}}}{4\pi\epsilon_0 r_{\min}}$$

когда **Из закона сохранения энергии** обращается в нуль.

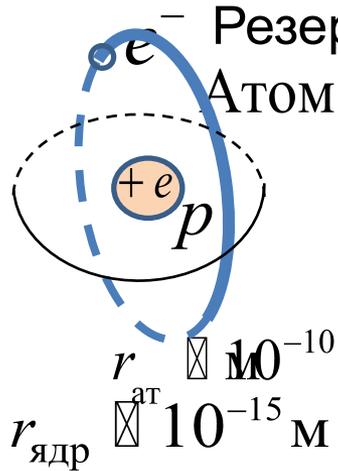
$$T_{\alpha} = U(r_{\min})$$

**следует**  $\Rightarrow$

$$r_{\text{я}} \approx 1 \cdot 10^{-14}$$

# Ядерная (планетарная) модель атома по Резерфорду

## Проблемы:



Атом – **нестабильное (устойчивое)** образование.  $E, r, v$

Величины не должны изменяться. Но **электрон – заряженная частица, которая движется в атоме с ускорением**. По законам электродинамики **электрон должен излучать** электромагнитные волны и тем самым **терять свою энергию**.

$$1) -\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{3c^3} a_{ц.стр.}^2$$

Излучение по законам электродинамики

$$a_{ц.стр.} = \frac{1}{m_e} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2}$$

Центростремительное ускорение электрона

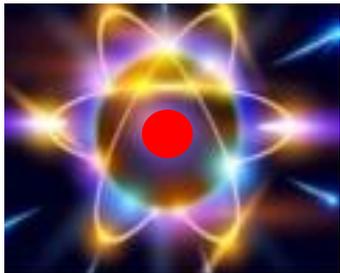
$$2) E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2r}$$

Энергия электрона в атоме Резерфорда

**Атом Резерфорда не может быть устойчивым!**

Электрон, находясь на круговой орбите с радиусом  $r \approx 10^{-10}$  м, падает на ядро через время  $t = \frac{r^3 m_e c}{(4\pi\epsilon_0)^2 e^4} \approx 10^{-10}$  с

Другое важное возражение против планетарной модели заключается в том, что она допускает **непрерывный спектр излучения** атомами. А из опытов следует, что **спектр излучения, характерный для каждого атома, состоит из отдельных**



# Оптические спектры и строение атомов

Свет, испускаемый атомами в газообразном состоянии, имеет **линейчатый спектр**, в котором спектральные линии

## Спектральные серии в излучении атомарного водорода

объединены в **серии излучения**.

Обобщенная формула Бальмера: 
$$\lambda = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$$

Постоянная  
Ридберга

В сериях сохраняется одна и та же закономерность в спектре, что иллюстрируется на приведенных спектрограммах



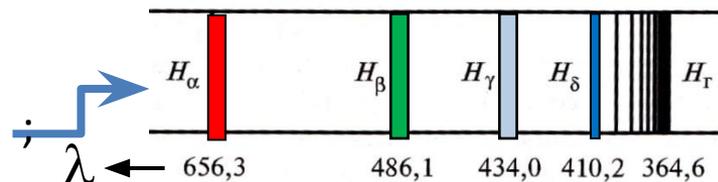
Для каждой серии число  $m$  фиксируется, число  $n$  принимает значения:

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

Серия Т. Лаймана (1906г)  $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$  ;

Серия И. Бальмера (1885г)  $m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$  ;

Серия Ф. Пашена (1908г)  $m = 3, n = 4, 5, 6, \dots$  .



# Атом Нильса Бора

Датский физик-теоретик в 1913 г. разработал **первую квантовую теорию атома**, которая опиралась на **модель атома Резерфорда**, **закономерности в атомных спектрах** и гипотезу Планка о квантовании энергии осциллятора и введении постоянной Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  в теорию теплового излучения.

К тому времени сложилась ситуация, в которой законы классической

**Линейчатые спектры свидетельствовали о дискретности энергетических состояний атома.**

**Планетарная модель атома Резерфорда оказалась неустойчивой.**

Кроме того, комбинируя константы  $e$ ,  $m_e$ ,  $1/4\pi\epsilon_0$ , относящиеся к электрону в атоме, **нельзя получить величину, имеющую размерность длины**. Это означает, что в классической механике атом невозможен – электрон не может двигаться стационарно.

Положение изменилось с появлением постоянной Планка, имеющей размерность момента импульса. Величина, имеющая размерность длины, равна  $\frac{h^2}{4\pi^2 m_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10}$  (характерный размер атома)

Самым простым атомом является атом водорода, имеющий единственный электрон. Масса протона в 1840 раз больше массы электрона. **В первом приближении** можно считать орбиты электрона **круговыми орбитами**, **скорость мала по сравнению со скоростью света**, а **ядро неподвижным**.



# Постулаты Н. Бора

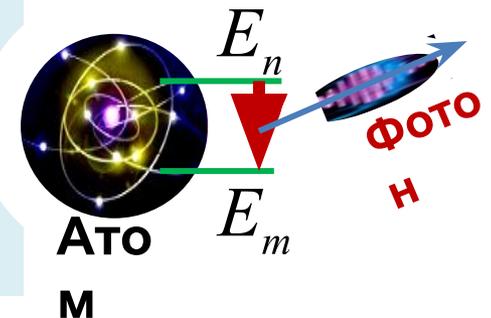
**1). О существовании стационарных состояний и квантовании момента импульса.** В атоме существует дискретный набор **стационарных** (разрешенных) орбит радиусов  $r_n$  и **момента импульса электрона**  $p$

в этих состояниях принимает целочисленные значения, кратные  $\hbar$  :  
 $r_n \cdot p_n = n \hbar$ , где  $n=1, 2, 3, \dots$  (для круговых орбит)

**Находясь на стационарной орбите, электрон имеет неизменное значение энергии и, вопреки законам классической электродинамики, не излучает энергию.**

**2). О поглощении и испускании квантов излучения.**

Излучение или поглощение кванта излучения (фотона) происходит при переходе из одного стационарного состояния в другое путем **квантового скачка** при соблюдении закона сохранения энергии:





## Энергия электрона в атоме

○ **Потенциальная энергия** принимает отрицательные значения, равные произведению заряда электрона ( - e ) на потенциал положительного заряженного ядра на расстоянии  $r$  от него до электрона:

$$U(r) = (-e) \cdot \varphi(r) = (-e) \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze}{r}$$

○ **Полная энергия электрона в атоме**

тоже отрицательна. Это означает, что он

$$E = \frac{p^2}{2m_e} + U = \frac{p^2}{2m_e} + \left( -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \right)$$

находится в электрическом поле притяжения к ядру.

**Теория Н.Бора атома водорода**

**и иона гелия**

${}_1H$

${}_2He$

$$E_{кин} = E + U = \frac{m_e V_n^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (1)$$

$$m_e \frac{V_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze \cdot e}{r_n^2} \quad (2)$$

$$r_n \cdot m_e V_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$E_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{2r_n} \quad (4)$$

$$r_B = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e Ze^2} n^2 = r \frac{n^2}{Z} \quad (5)$$

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{Z^2 e^4}{2r_B} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (6)$$

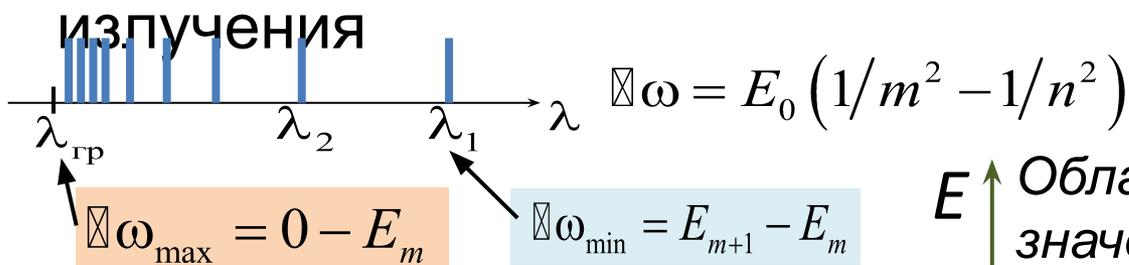
# Атом водорода,

$$Z=1: \quad m=1, \quad r_1 = n_B \approx 53 \text{ пм}, \quad E_1 = -13,6 \text{ эВ}$$

# Ион гелия $He^+$ ,

$$Z=2: \quad m=1, \quad r_1 = 26 \text{ пм}, \quad E_1 = -54,4 \text{ эВ}$$

## Объяснение закономерностей в спектральных сериях излучения



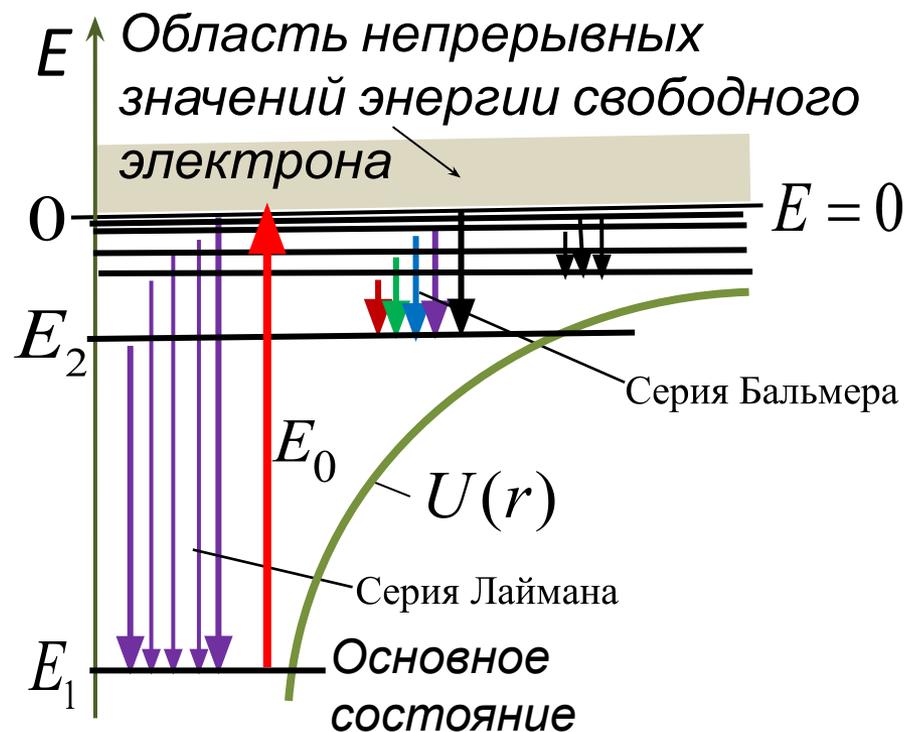
где  $m$  - номер уровня, на котором

заканчиваются переходы.

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

$$E_0 = 13,6 \text{ эВ}$$

**Энергия ионизации атома водорода** – минимальная энергия, требуемая для удаления электрона



# О теории Н. Бора

Нильс Бор поверил результатам экспериментов и видоизменил планетарную модель

атома путем введения постулатов, согласно которым в атоме существуют совершенно

недопустимые с точки зрения законов классической механики и электродинамики

**стационарные орбиты**. Радиусы орбит находится из **условия квантования момента**

из теории Бора следует формула для частот излучения **импульса**, согласно которому имеются строго определённые состояния

$$\omega = \frac{E_n - E_m}{\hbar} = Z^2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^4}{2\hbar r} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = Z^2 E_0 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

**Излучение или поглощение квантов энергии возможно только при переходе** атома водорода и других водородоподобных образований, таких как **одного стационарного состояния в другое.** ( $Z = 2$ ),  $Li^+$  ( $Z = 3$ ),  $Be^{++}$  ( $Z = 4$ ).

Формула для частот при  $Z=1$  совпадает с формулой Бальмера, где

Постоянная Ридберга  $R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^4}{2\hbar r_B} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-1}$

точно соответствует величине, найденной из оптических экспериментов.

Дальнейшее открытие новых квантовых законов физики показало, что планетарная модель атома просто неверна.

Однако это **первая квантовая теория**, которая имела большое значение для дальнейшего развития физических представлений о строении атомов и