

# **ВОДОРОДОПОДОБ НЫЕ АТОМЫ**

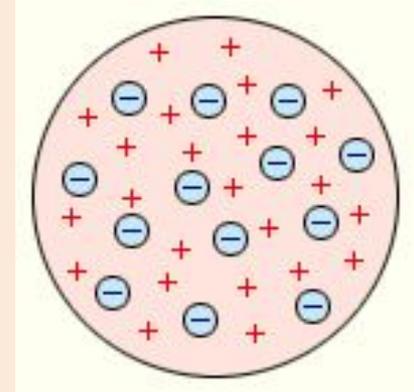
**Гипотеза о том, что  
вещества состоят из  
атомов, впервые была  
высказана Левкиппом и  
Демокритом примерно  
в IV веке до н. э.**

# МОДЕЛИ АТОМА

## Ранние модели:

### 1) Модель Томсона – “булочка с изюмом”

Томсон предложил рассматривать атом как положительно заряженное тело с заключёнными внутри него электронами. Впоследствии модель была опровергнута опытами Резерфорда.



### 2) Планетарная модель Нагаоки

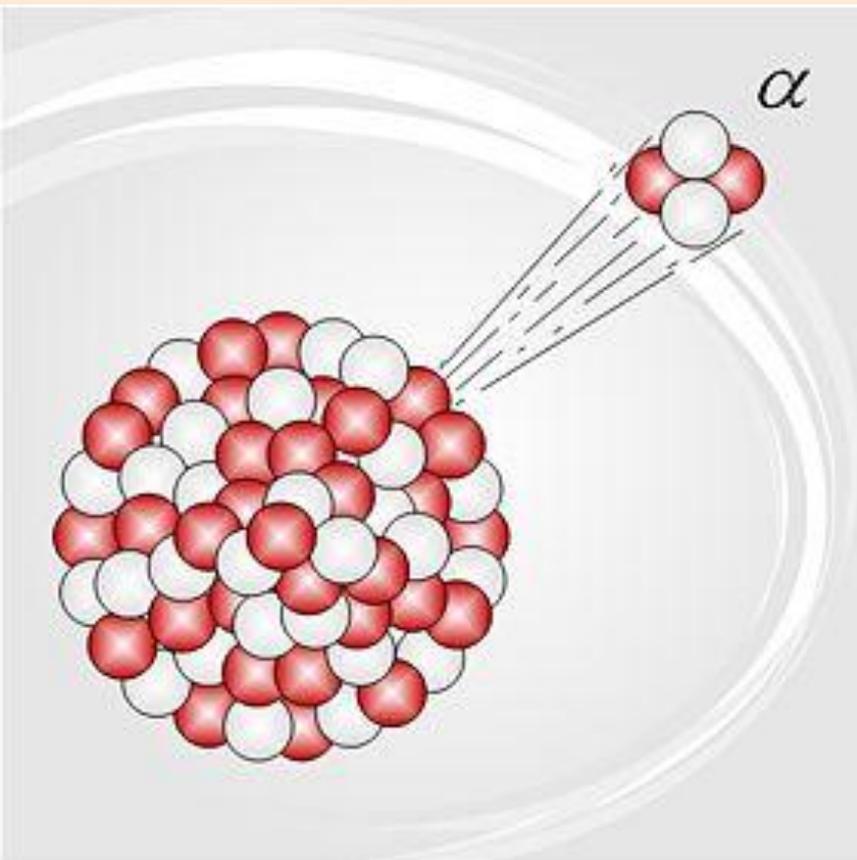
В 1904 году Хантаро Нагаока предложил модель атома, построенную по аналогии с планетой Сатурн: вокруг маленького положительного ядра вращались электроны, объединённые в кольца.



# Опыт Резерфорда по рассеянию $\alpha$ -частиц



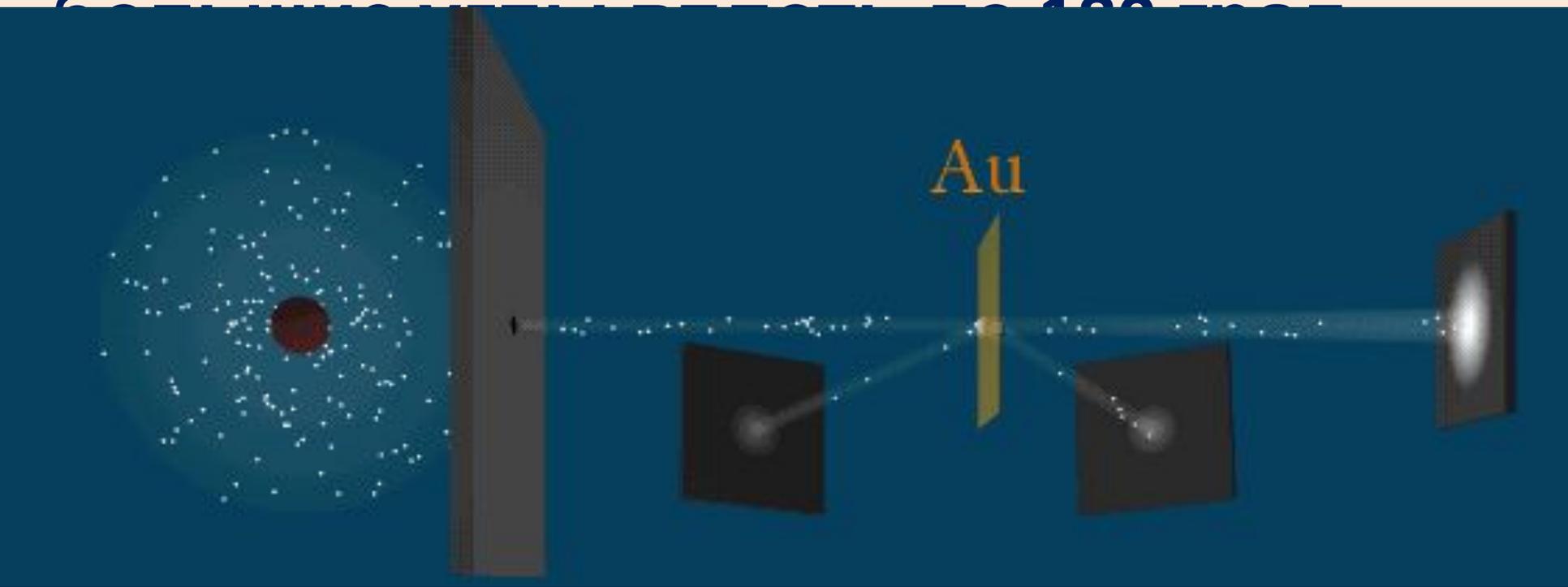
Эрнст  
Резерфорд



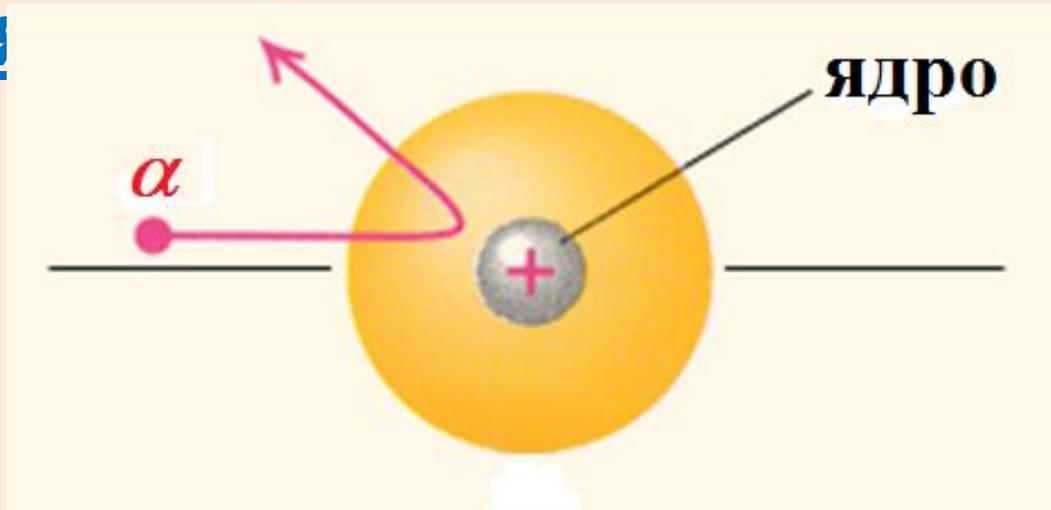
Альфа-частица  
образована 2-мя  
протонами и 2-мя  
нейтронами, заряжена  
**положительно.**  
Идентична ядру атома  
гелия ( ${}_{2}\text{He}^{2+}$ ).

Образуется при  $\alpha$ -  
распаде ядер. При этом  
ее скорость достигает  
 $1.6 \cdot 10^7$  м/с .

Резерфорд направил поток  $\alpha$ -частиц на золотую фольгу толщиной около 0,1 мкм. Большинство частиц пролетели сквозь фольгу, но некоторые отклонились на очень большие углы, даже до  $180^\circ$ .

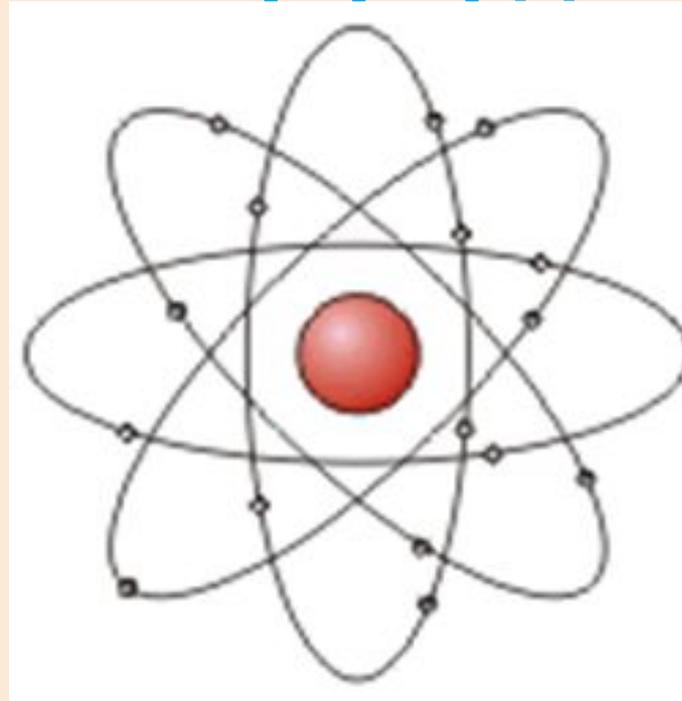


**Резерфорд сделал вывод:  
Причиной рассеяния  $\alpha$ -частицы  
является ее электрическое  
взаимодействие с малой по размеру  
положительно заряженной частью  
атома -**



**В ядре сосредоточена почти вся  
масса атома и весь его  
положительный заряд**

# Планетарная модель атома Резерфорда



**Атом представляет собой подобие планетной системы, в которой электроны движутся по орбитам вокруг тяжёлого положительно заряженного ядра**

# Размер

ядра  $\approx 10^{-15}$  м, атома  $10^{-10}$  м.

# Неустойчивость атома

Согласно классической

электродинамике электрон при движении с центростремительным ускорением должен излучать электромагнитные волны и терять энергию. В итоге он упадёт на ядро.

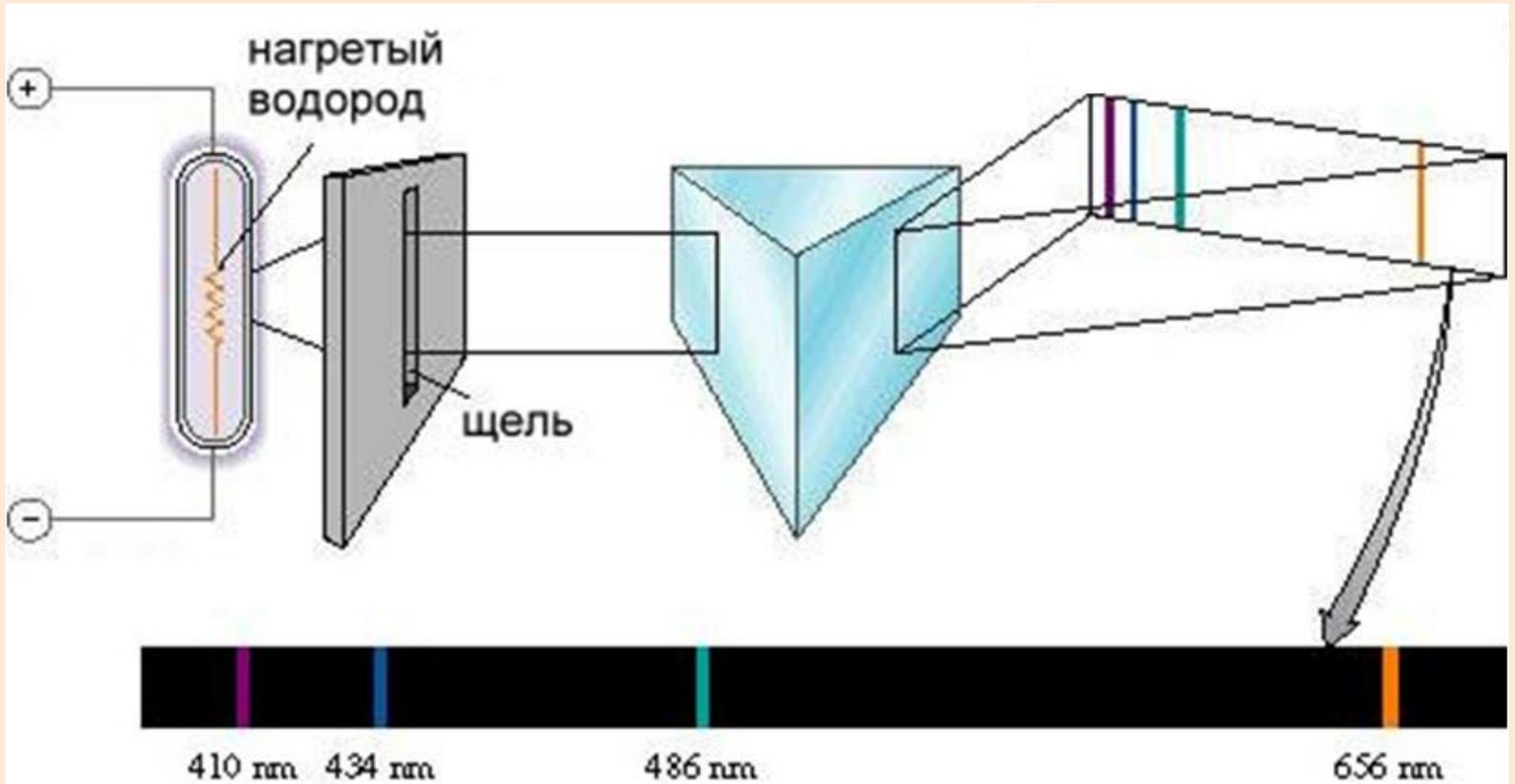
Для объяснения стабильности атомов Нильсу Бору пришлось ввести особые предположения – постулаты. Постулаты Бора показали, что для атома классическая

# **Теория водородоподобного атома по Бору**

**При построении теории Бор  
опирался на опыт Резерфорда  
и данные по спектрам  
атомарных газов. Согласно  
опыту эти спектры  
линейчатые.**

- Водородоподобный атом – это атом с одним внешним электроном: Na, K, Rb, Cs.
- Спектр атома – это набор излучаемых или поглощаемых частот.

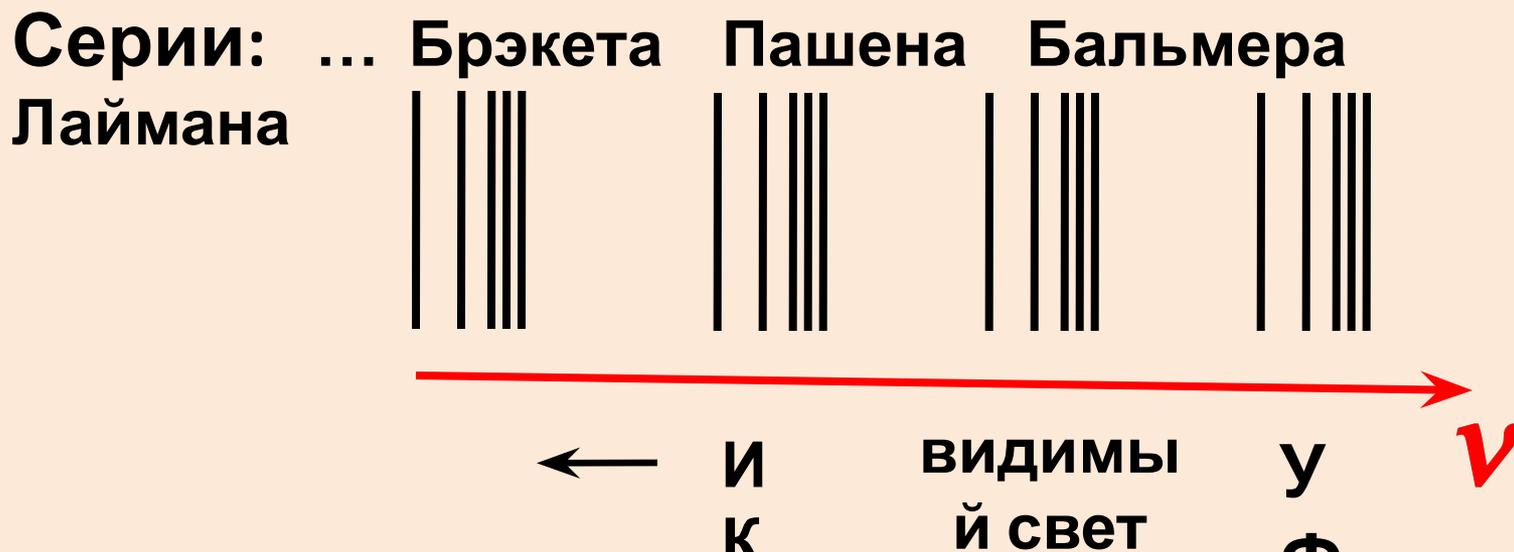




# Спектр испускания атомарного водорода.

Спектр атома водорода образован сериями линий. Линии сгущаются к высокочастотной границе серии. В видимой области наблюдается серия Бальмера.

Еще одна серия есть в УФ области. А в ИК диапазоне – много серий.



**Бальмер подобрал формулу для частот спектральных линий:**

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

**Для серии Бальмера  $m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$ .**

**Для серии Лаймана  $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$ .**

**$R$  - постоянная Ридберга**

$$R = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

# Постулаты Бора

## Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

Атом может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $W_n$ .

В стационарных состояниях атом не излучает.

# Второй постулат Бора (правило частот)

При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией

$W_n$  в другое с энергией  $W_m$

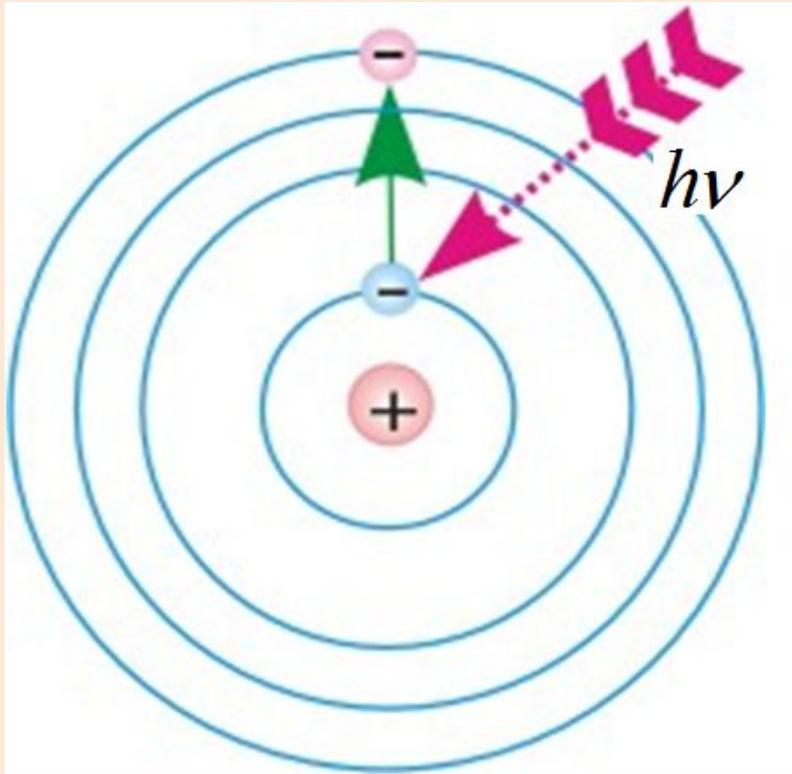
излучается или поглощается квант,

энергия которого равна разности

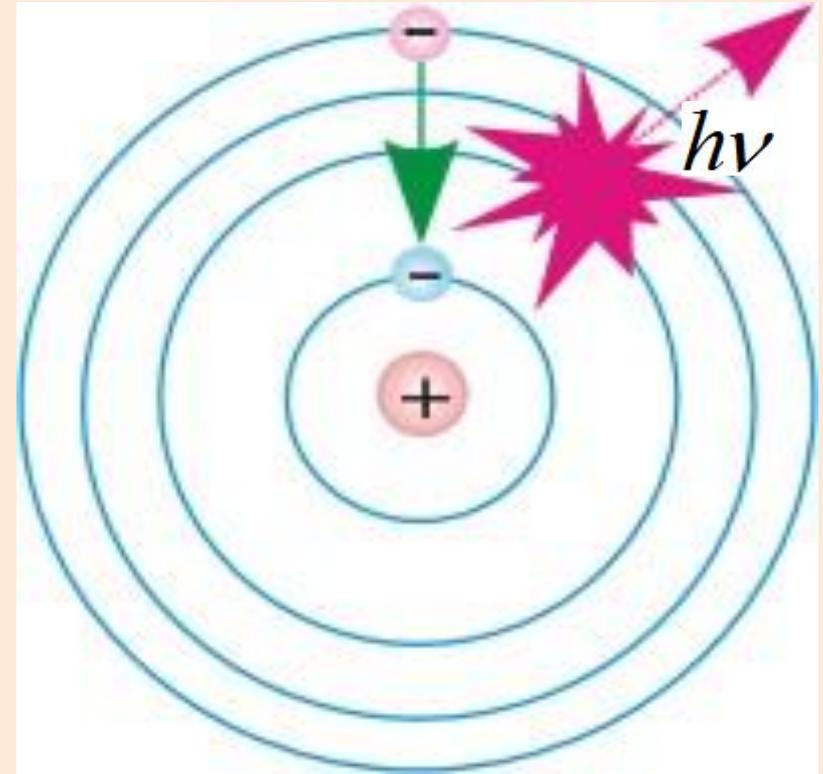
энергий этих состояний.

$$h\nu_{nm} = W_n - W_m$$

# Квант света поглощается



# Квант света излучается



# Третий постулат (квантование орбит)

Момент импульса электрона в атоме принимает только дискретные значения, кратные постоянной Планка:

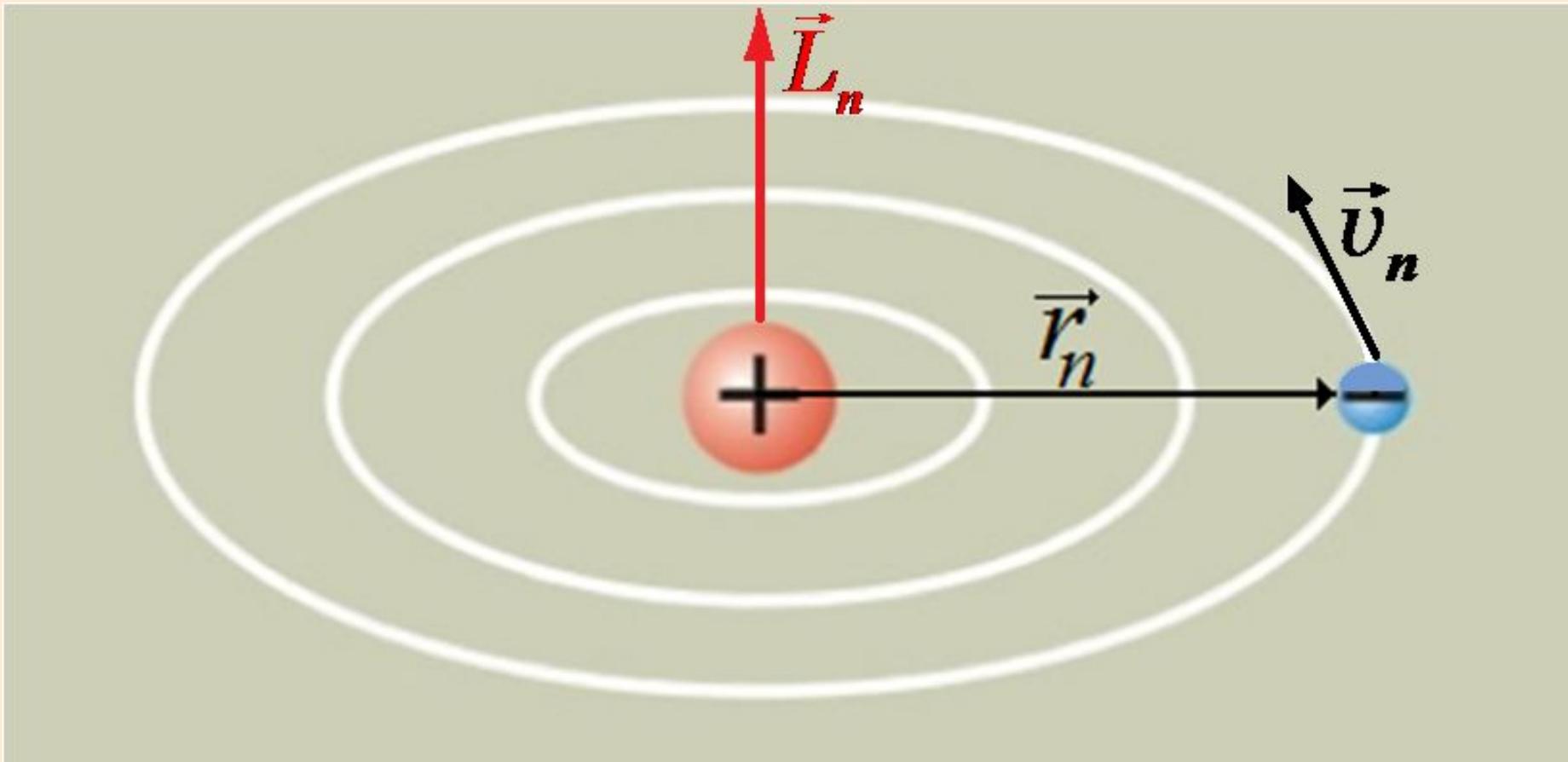
$$m v_n r_n = n \hbar$$

$m$  – масса электрона,

$v_n$  – его скорость на орбите радиуса

$$r_n, n = 1, 2, 3 \dots$$

Момент импульса  $\vec{L}_n = m \vec{v}_n r_n$



На электрон действует  
кулоновская сила. По 2-му закону

Ньютона  
 $ma = F_k$

$$m \frac{v^2}{r} = k \frac{Ze \cdot e}{r^2}$$

$$r_n = \frac{\hbar^2}{kZe^2 m} n^2$$

Радиус ближайшей к ядру орбиты называют первым боровским радиусом.

$$a_B = r_1 = \frac{\hbar^2}{kZe^2 m} = 52,8 \text{ пм}$$

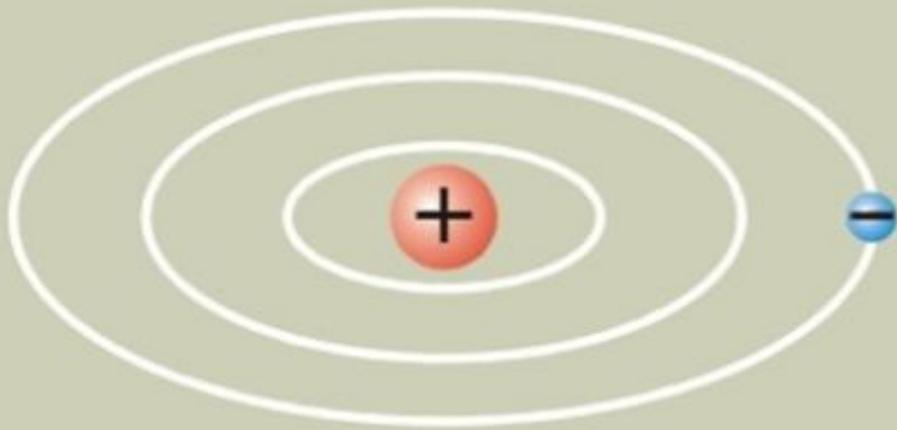
$Z$  — заряд ядра,  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

**Полная энергия электрона в атоме:**

$$W_n = -\frac{k^2 e^4 m}{2\hbar^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2}$$

**Энергия электрона на первой  
боровской орбите в атоме  
водорода:**

$$W_1 = -13,55$$



**Энергия  
электрона в  
атоме  
отрицатель  
на. При  
удалении от  
ядра она  
стремится к  
нулю.**

**Частота излучения при переходе с  $n$ -го на  $m$ -й уровень энергии:**

$$\nu_{nm} = \frac{W_m - W_n}{h} = \frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

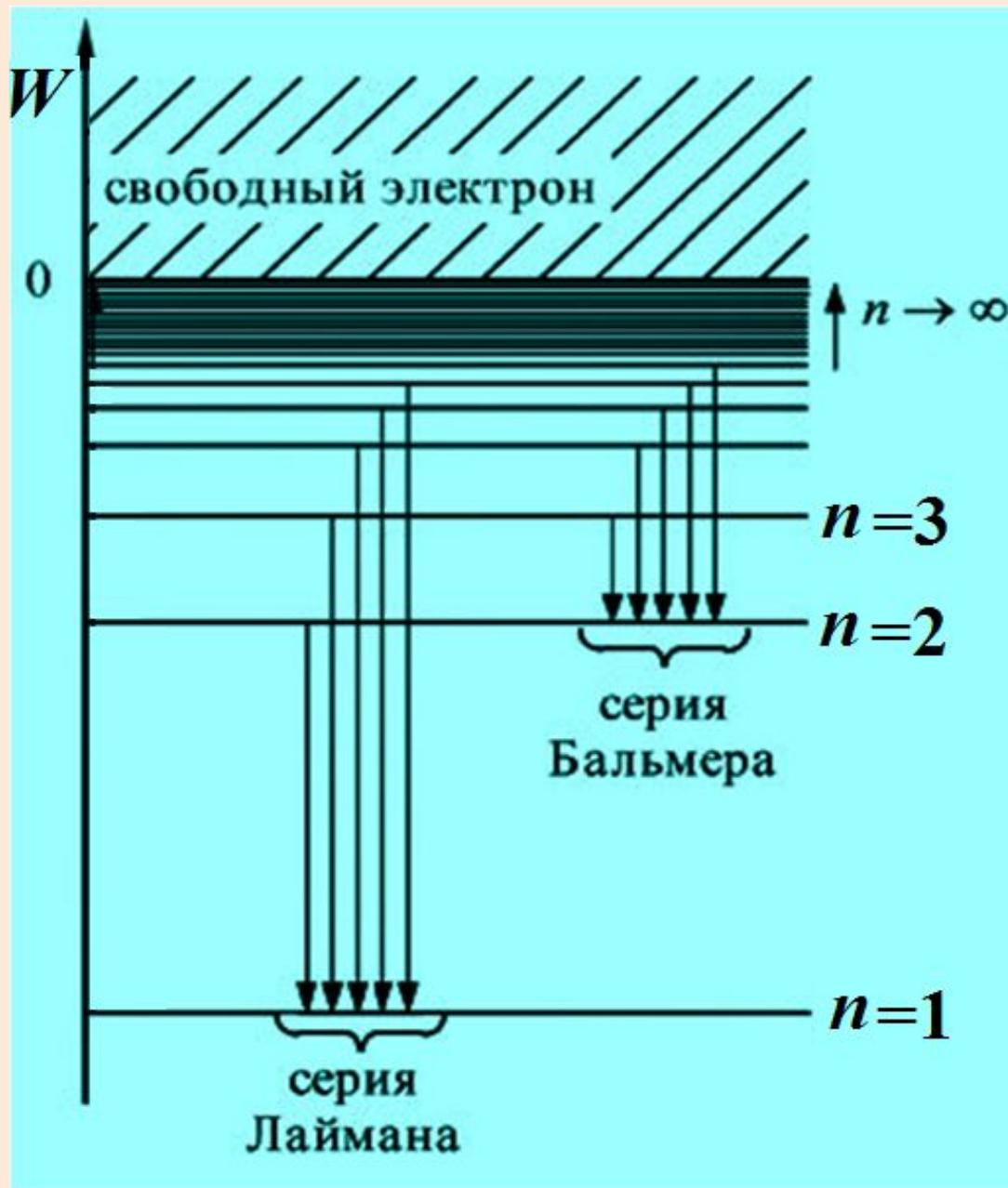
$R = 3,3 \cdot 10^{15}$  Гц - частотная константа Ридберга, ее значение совпало с угаданным Бальмером

**Длина волны:**

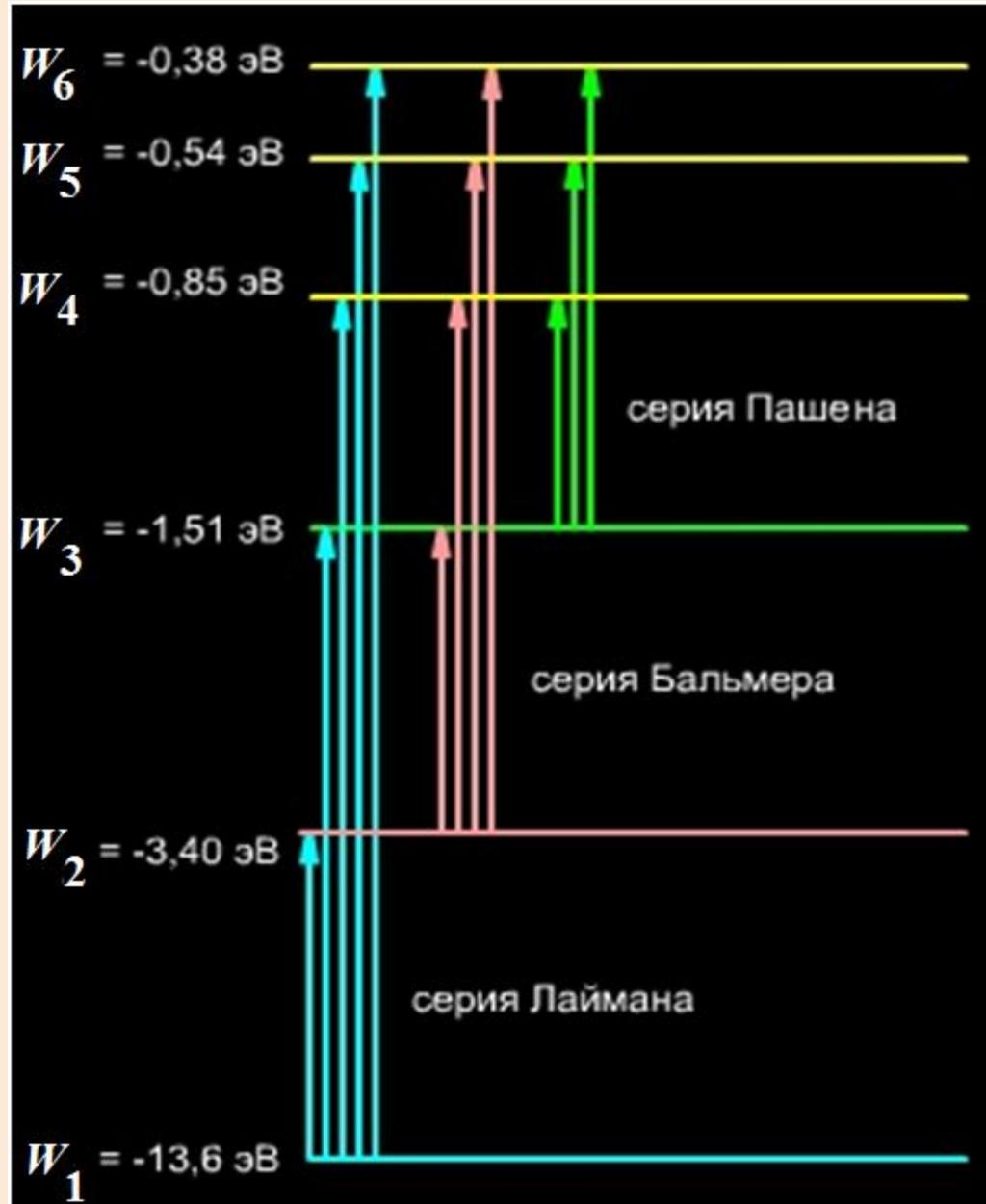
$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R' \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  - волновая константа Ридберга

# Спектры излучения водорода



# Спектры поглощения водорода



**Для серии**

**Лаймана  $m=1, n=2, 3, 4, \dots$**

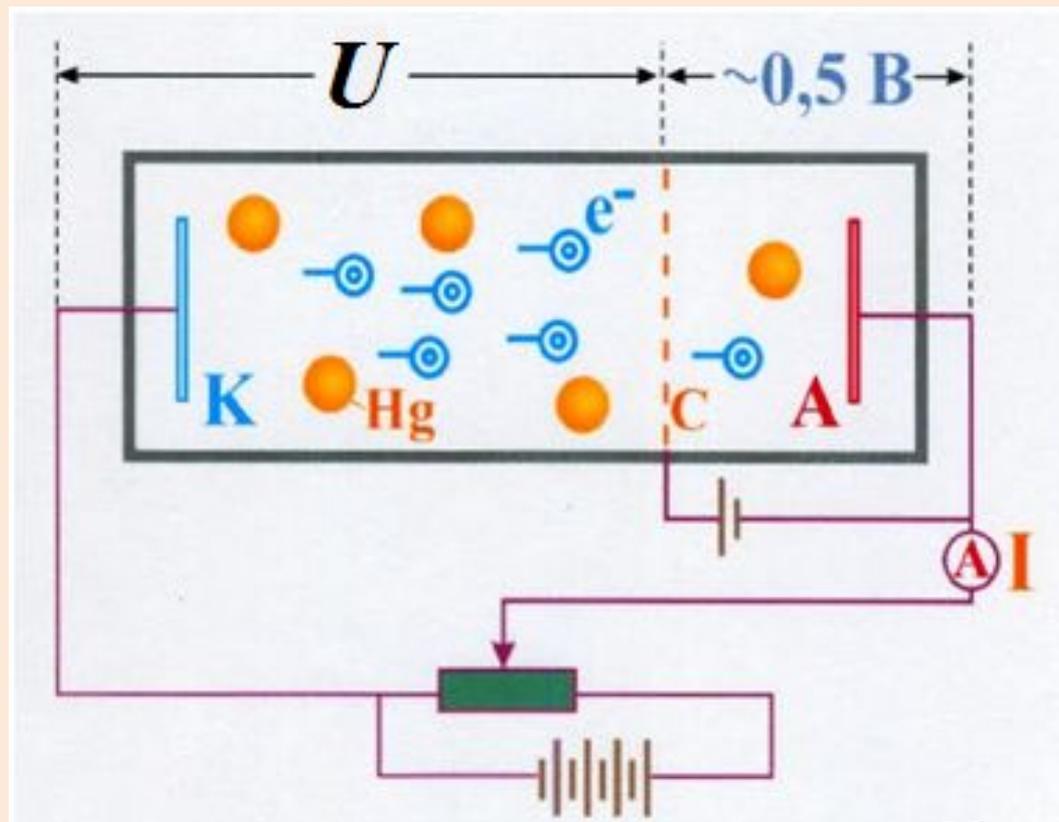
**Бальмера  $m=2, n=3, 4, 5, \dots$**

**Пашена  $m=3, n=4, 5, 6, \dots$**

# Опыт Франка и Герца

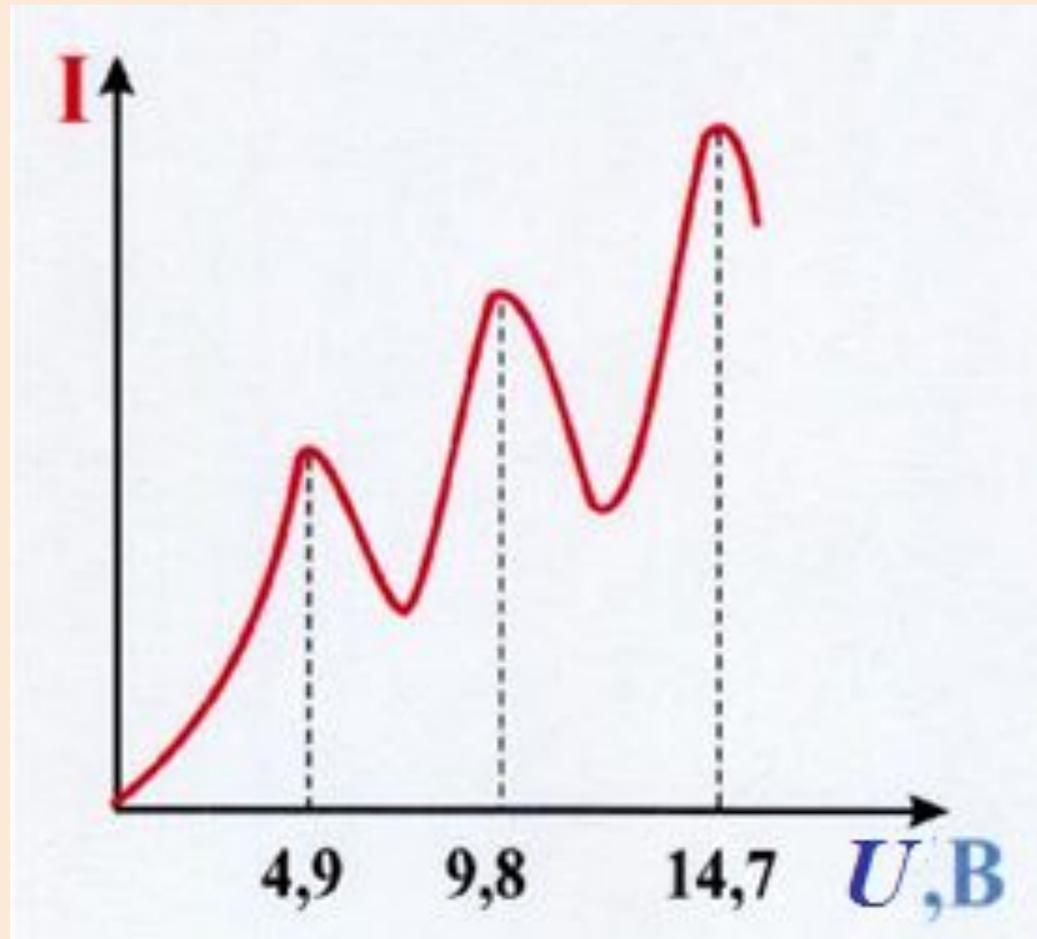
Квантовые постулаты Бора  
нашли экспериментальное  
подтверждение в опыте Дж.  
Франка и Г. Герца.

Опыт заключался в пропускании  
электронного пучка через пары  
ртути.



**Электроны, испускаемые катодом К, ускорятся в электрическом поле, созданном между катодом и анодом А. Между катодом и сеткой С поддерживается небольшое ( $\sim 1 \text{ В}$ ) задерживающее напряжение, которое не пропускает «ослабевшие» электроны к аноду.**

# BAX



Через пары ртути пропускался поток электронов, энергия которых постепенно увеличивалась. Сначала электроны, сталкиваясь с атомами ртути, не теряют своей энергии, то есть удары упругие. И электрический ток растет. Когда же энергия электронов становится равной 4.9 эВ атомы ртути переходят в возбужденное состояние, забирая энергию у электронов, дискрадет. Минимальная порция, которую может поглотить атом ртути Hg, равна 4,9 эВ.

**Теория Бора дала не  
только качественное, но  
и количественное  
описание атомных  
спектров, а также  
опытов Франка и Герца.**

# Достоинства и недостатки теории Бора

## • Достоинства:

- 1. Объяснила линейчатый спектр атомов.
- 2. Предсказала значения частот.
- 3. Правильно определила размеры атома водорода.
- 4. Рассчитала константу Ридберга.

## • Недостатки:

- 1. Для объяснения квантовых явлений использовала не только квантовую, но и классическую физику.
- 2. Не смогла рассчитать интенсивность спектра излучения.
- 3. Не дает объяснений причин перехода между уровнями энергии.

# Квантовая теория атома

**Электрон в атоме находится в  
потенциальной яме. Применим к нему  
уравнение Шредингера**

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} (W - U)\psi = 0$$

**Решение уравнения дает дискретные  
значения энергии**

$$W_n = -R \frac{Z^2 h}{n^2},$$

**совпадающие с полученными  
Бором**

**$n=1, 2, \dots$  - главное квантовое  
число.**

**Оно определяет энергию  
электрона, степень его  
удаленности от ядра, размеры  
электронной орбиты.**

# Квантование момента

## импульса

Модуль момента импульса  
электрона  $L$  принимает  
дискретные значения:

$$L = \hbar \sqrt{\ell(\ell + 1)}$$

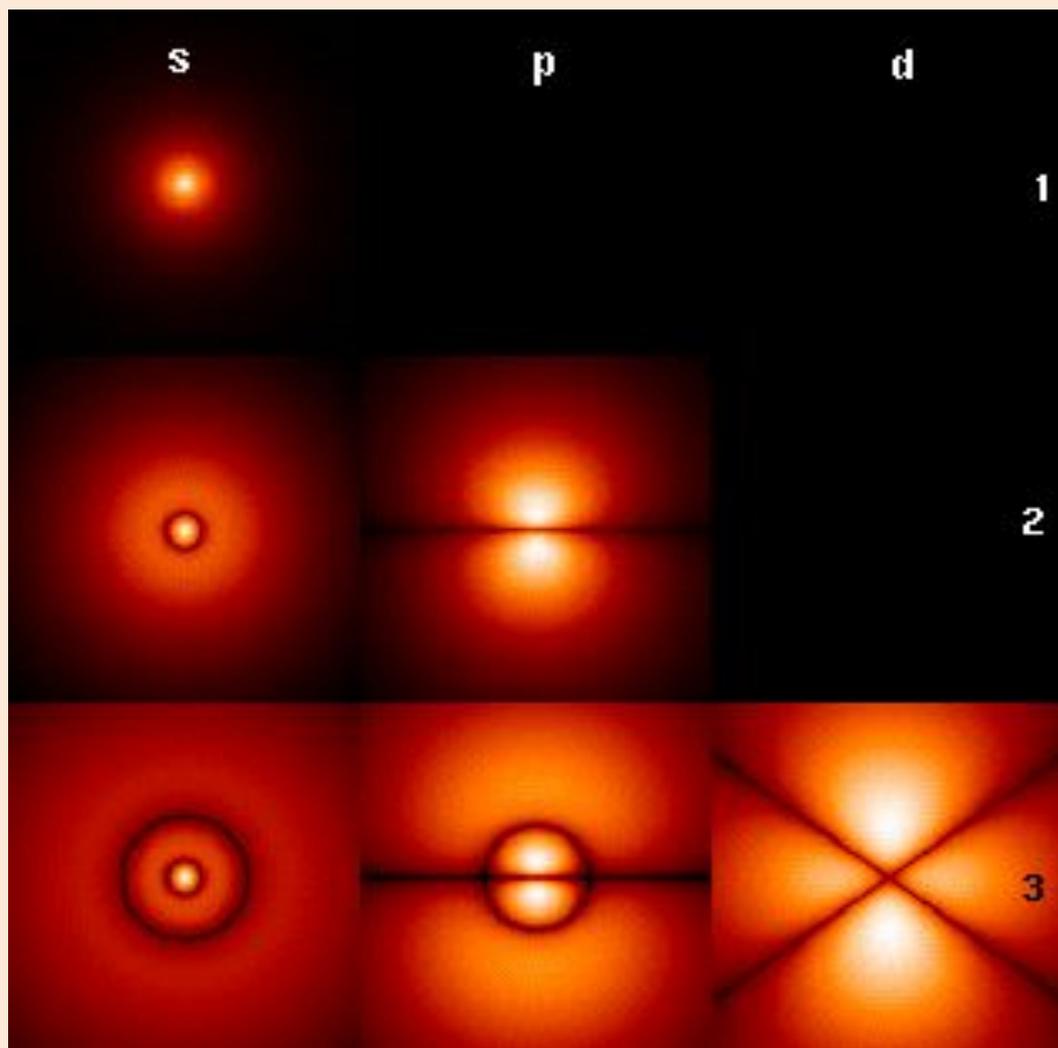
$\ell = 0, 1, 2, \dots, n-1$  - орбитальное квантовое  
число.

Оно определяет размер и  
форму электронной орбиты.

# Состояния с различными $I$ обозначают латинскими

$I$	Обозначение
<b>0</b>	<i>s</i>
<b>1</b>	<i>p</i>
<b>2</b>	<i>d</i>
<b>3</b>	<i>f</i>

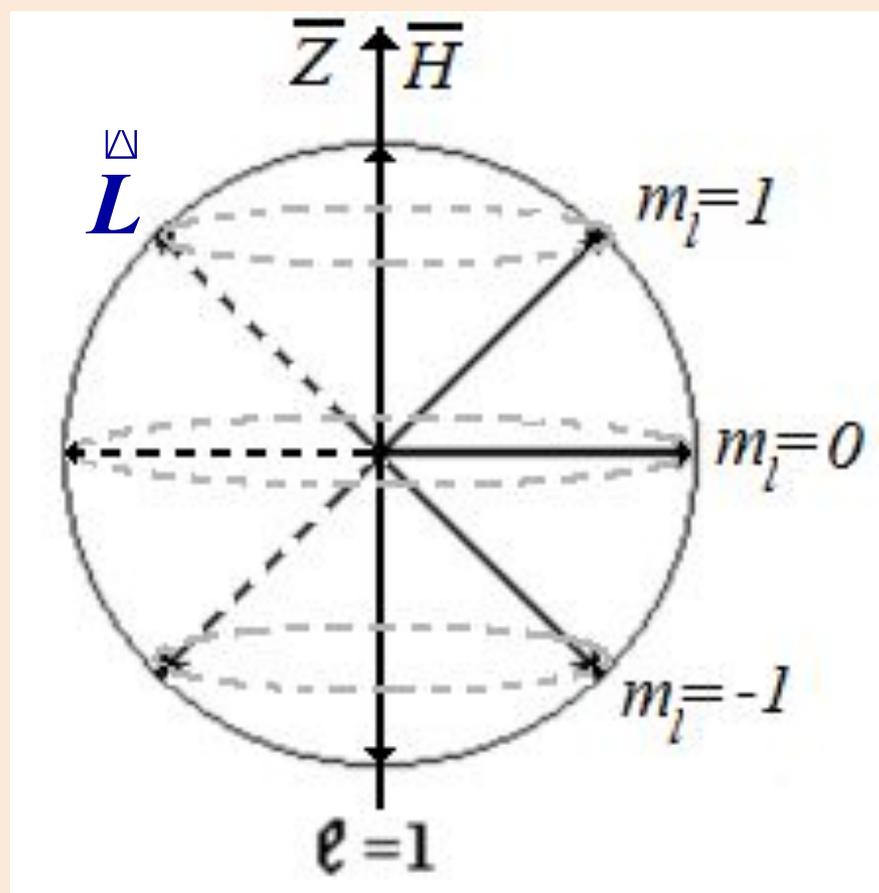
Вид орбитали	Форма орбитали
s	
p	
d	
f	



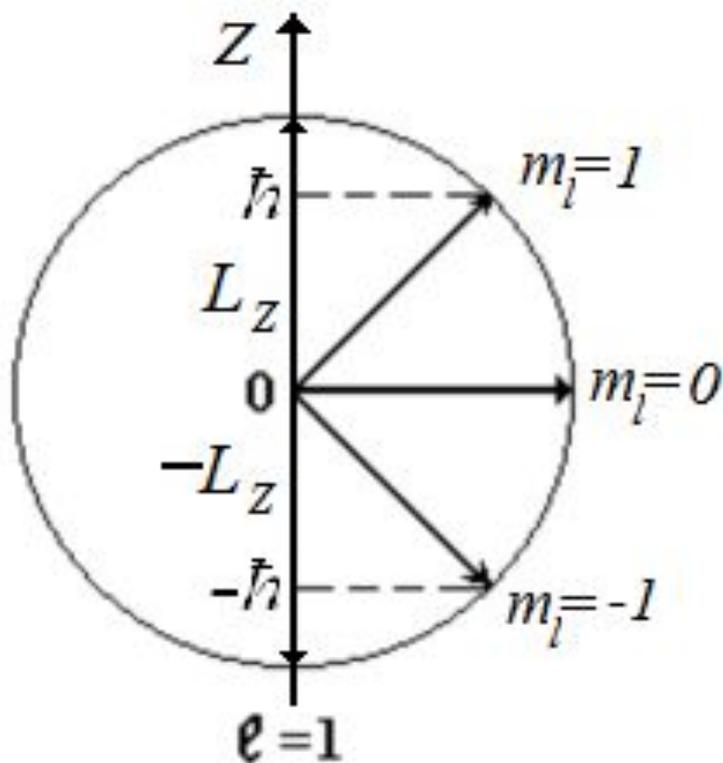
**Выделим в пространстве  
какое-либо направление,  
например, направление  
магнитного поля.**

**Проекция момента  
импульса электрона на это  
направление может иметь  
только дискретные  
значения.**

Вектор момента импульса электрона прецессирует вокруг направления магнитного поля  $\vec{H}$ .



Проекция момента импульса на направление  $z$  имеет дискретные значения  $L_z = m \hbar$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm \ell$ )



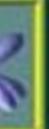
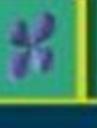
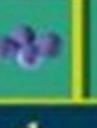
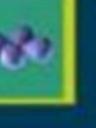
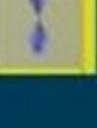
$\ell = 1$  состояние: 3 проекции

$m$  – магнитное квантовое

число

Оно задает ориентацию орбиты в пространстве.

# Пространственная ориентация электронных орбиталей

n		Spatial orientation of electron orbitals																
4	N																	
3	M																	
2	L																	
1	K																	

s
p
d
f

**Аналогично механическому  
моменту импульса квантуется  
орбитальный магнитный момент**

**электрона:**

$$\frac{M_l}{L} = \frac{I \cdot S}{m v \cdot r} = \frac{e}{T} \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{m v \cdot r} = \frac{e}{2m}$$

$$I = \frac{\sum q}{t} = \frac{e}{T} \quad v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

$$\overset{\boxminus}{M}_\ell = g \overset{\boxminus}{L}$$

$g = -\frac{e}{2m}$  – гиромагнитное отношение

$$M_\ell = g \overset{\boxtimes}{\hbar} \sqrt{\ell(\ell+1)} = -\mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)}$$

$\mu_B = \frac{e \overset{\boxtimes}{\hbar}}{2m}$  – магнетон Бора

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\ell(\ell+1)}$$

# Квантование спина

Спин электрона  $L_s$  – это его собственный момент импульса.

Спин квантуется по закону:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$$

$$s = \frac{1}{2}$$

спиновое  
квантовое число

# Собственный магнитный момент электрона:

$$\vec{M}_S = -2g\vec{L}_S = -\frac{e}{m}\vec{L}_S$$

$$\vec{M}_S = -\frac{e}{m}\sqrt{s(s+1)} = 2\mu_B\sqrt{s(s+1)}$$

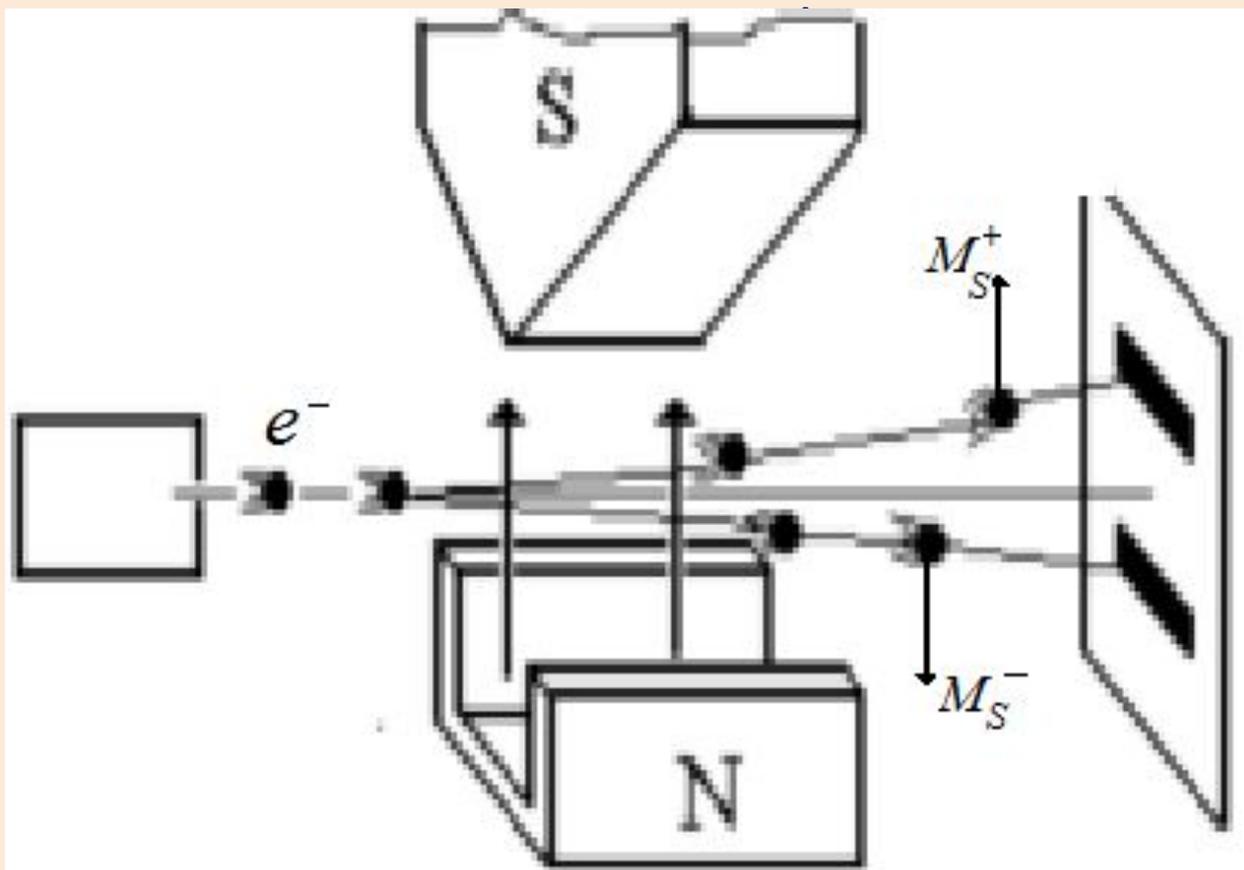
**Проекция спина электрона на направление магнитного поля может принимать только одно из двух значений**

$$L_{s,z} = m_s \hbar$$

$$m_s = \pm \frac{1}{2} - \begin{matrix} \text{магнитное} \\ \text{спиновое} \\ \text{квантовое число} \end{matrix}$$

**Квантование спина  
электрона  
экспериментально  
доказано опытами  
Штерна и Герлаха.**

Опыт заключался в прохождении пучка электронов через сильно неоднородное магнитное поле. Наблюдалось разделение потока электронов на два пучка с противоположными магнитными



## Вывод:

Состояние электрона в атоме определяется набором 4-х квантовых чисел:

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

□ орбитального  $l$ , ( $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ )

□ магнитного  $m$ , ( $m = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$ )

□ спинового магнитного  $m_S$ , ( $m_S = -1/2, +1/2$ )

**Число состояний на  
энергетическом уровне с  
главным квантовым числом**

***n*:**

$$N = 2 \sum_{\ell=0}^{n-1} (2\ell + 1) = 2n^2$$

**с учетом спина**



# Совокупность электронов с одинаковым главным числом $n$ образует

$n$	Оболочка	Число электронов
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32

# Правила отбора:

**ВОЗМОЖНЫ ЛИШЬ ТАКИЕ  
переходы между  
состояниями, при которых**

$$\Delta l = \pm 1; \quad \Delta m_l = 0, \pm 1.$$

**Серия Лаймана:**

$$np \rightarrow 1s$$

$$n = 2, 3, \dots$$

**Серия Бальмера:**

$$np \rightarrow 2s, ns \rightarrow 2p, nd \rightarrow 2p$$

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