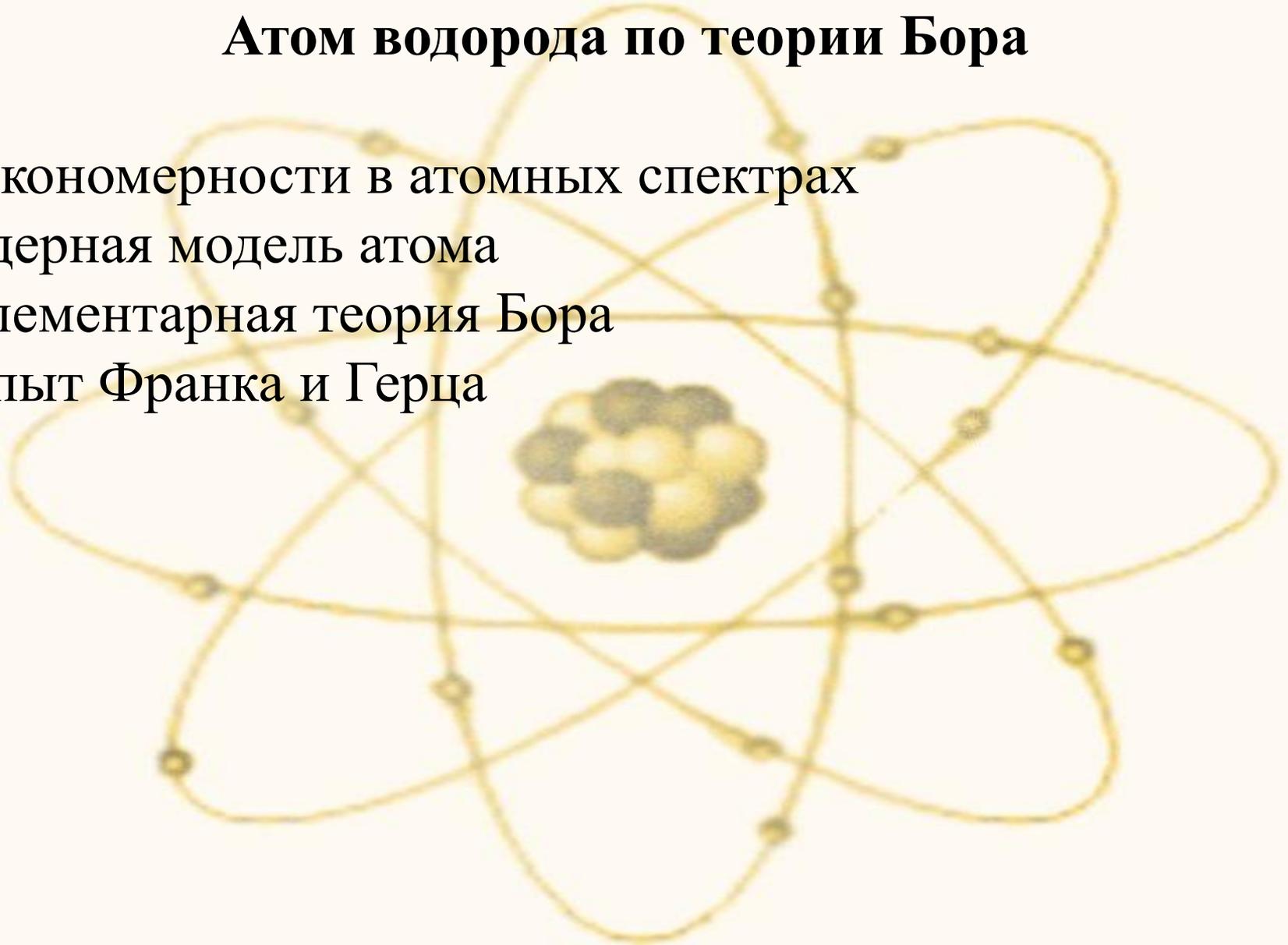


# **Модели атомов.**

## **Атом водорода по теории Бора**

1. Закономерности в атомных спектрах
2. Ядерная модель атома
3. Элементарная теория Бора
4. Опыт Франка и Герца

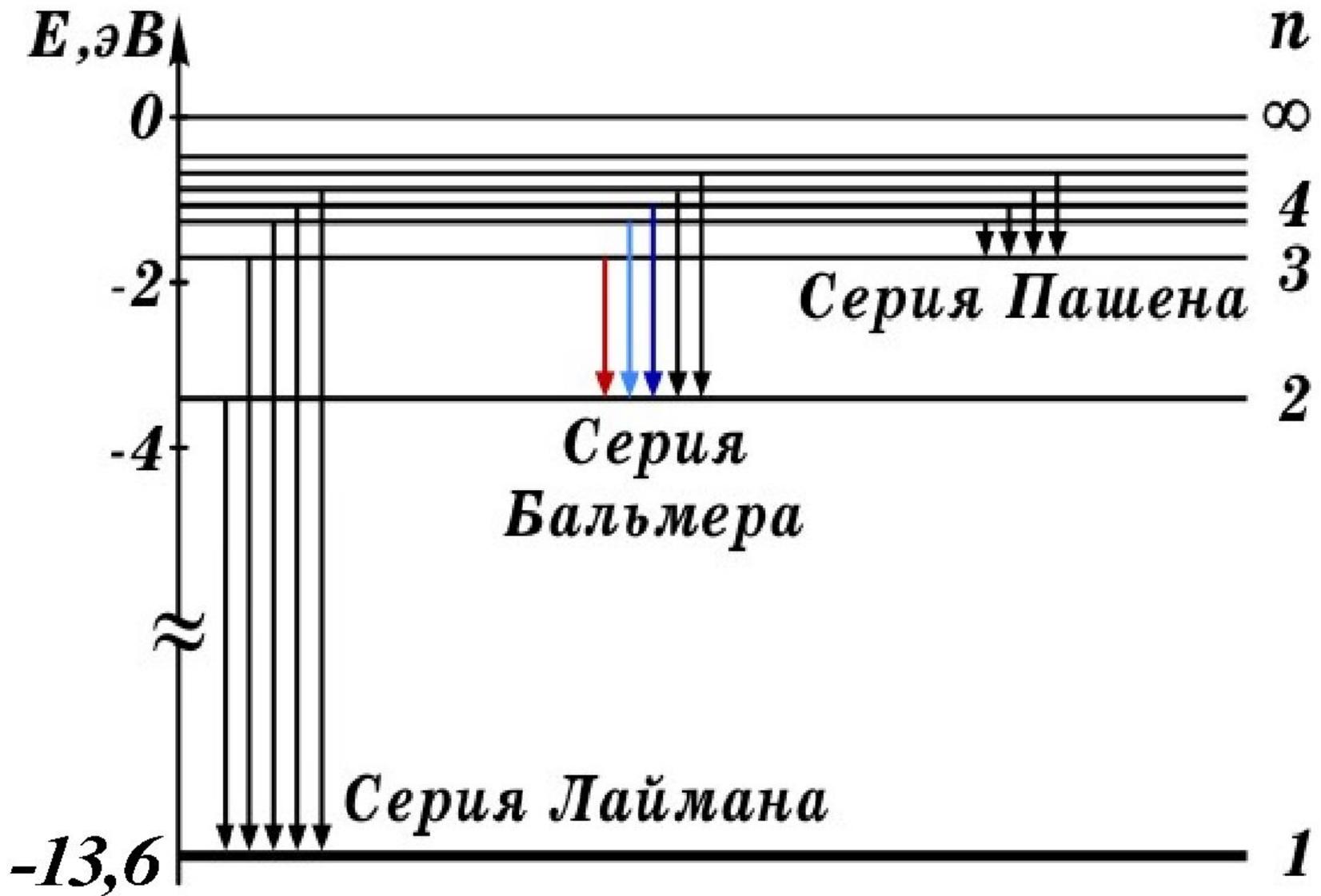


# 1. Закономерности в атомных спектрах.

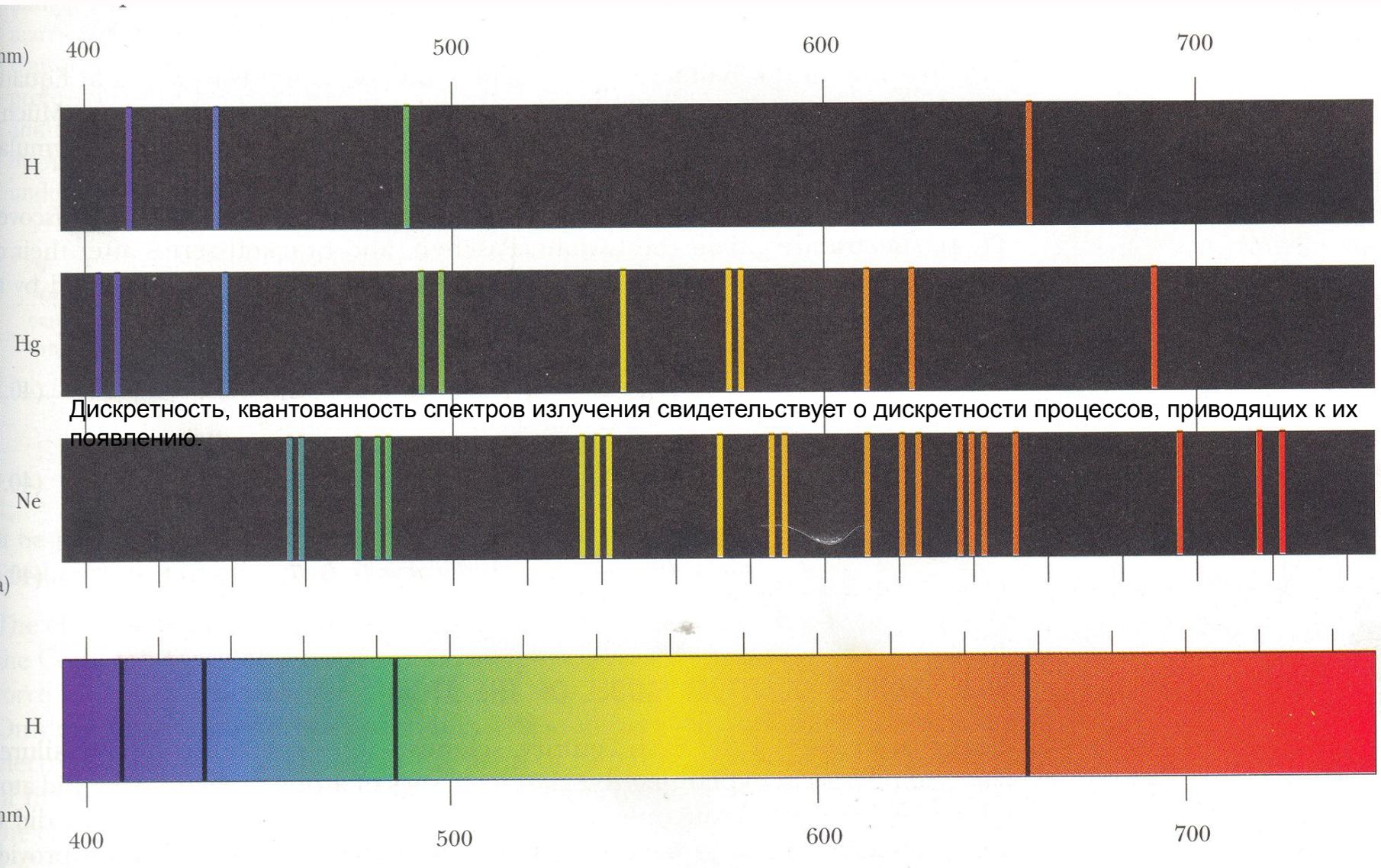
Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных **спектральных линий** (линейчатый спектр).

Изучение атомных спектров послужило **ключом к познанию строения атомов.**

Линии в спектрах расположены не беспорядочно, а **сериями**. Расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.



**H**



Дискретность, квантованность спектров излучения свидетельствует о дискретности процессов, приводящих к их появлению.

Линейчатые спектры излучения в видимой области:  
водород, ртуть, неон. Спектр поглощения водорода.

Швейцарский физик Й. Бальмер в 1885 году установил, что длины волн серии в видимой части спектра водорода могут быть представлены формулой (**формула Бальмера**):

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \lambda_0 = \text{const}, n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{или} \quad \nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R' = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $n = 3, 4, 5, \dots$

В физике **постоянной Ридберга** называют и другую величину равную  $R = R' \cdot c$ .

$$\mathbf{R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}}$$

Дальнейшие исследования показали, что **в спектре водорода имеется еще несколько серий:**

Серия Лаймона	$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Серия Пашена	$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Серия Брэкета	$\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Серия Пфунда	$\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$

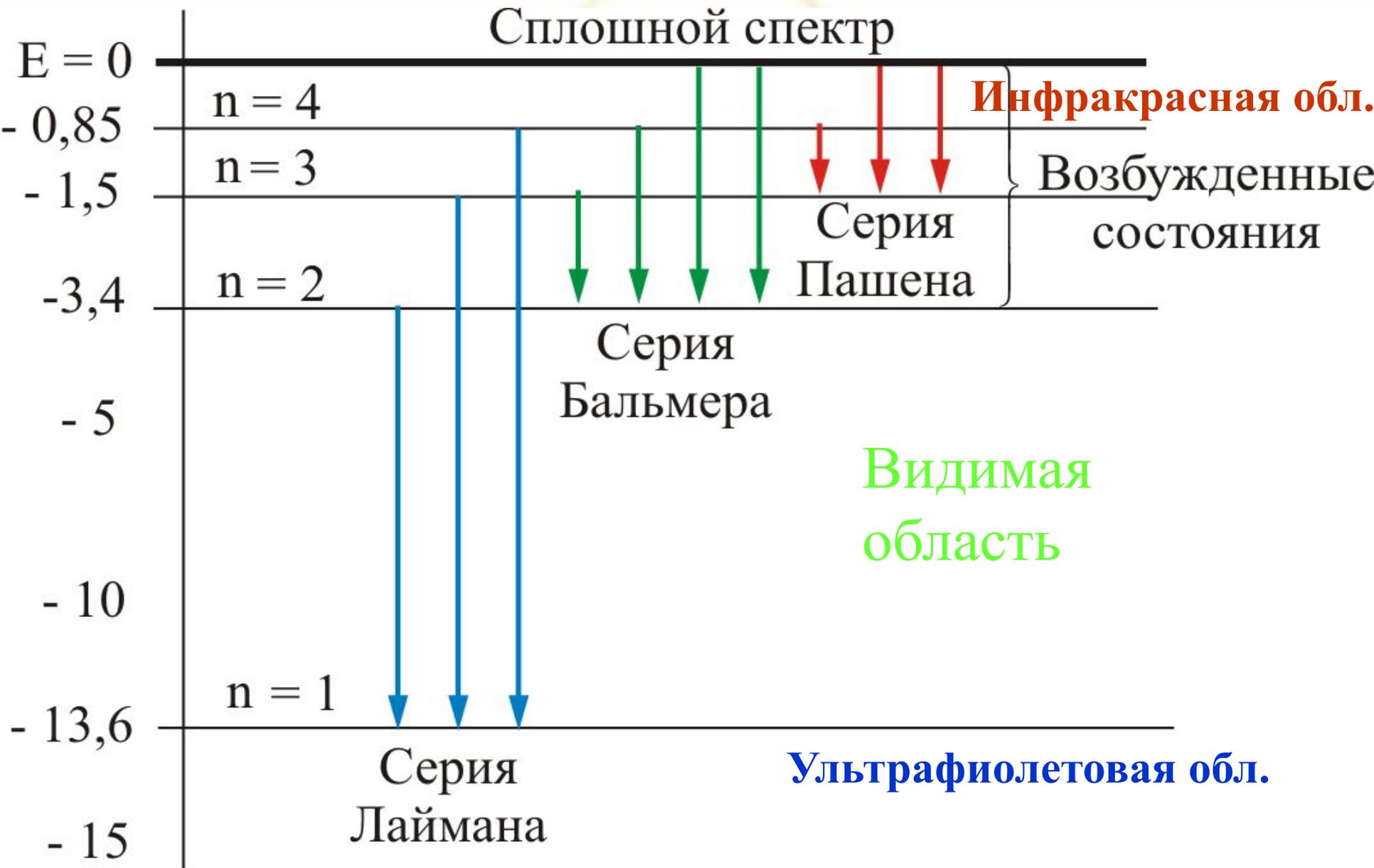
# Обобщенная формула Й. Бальмера

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

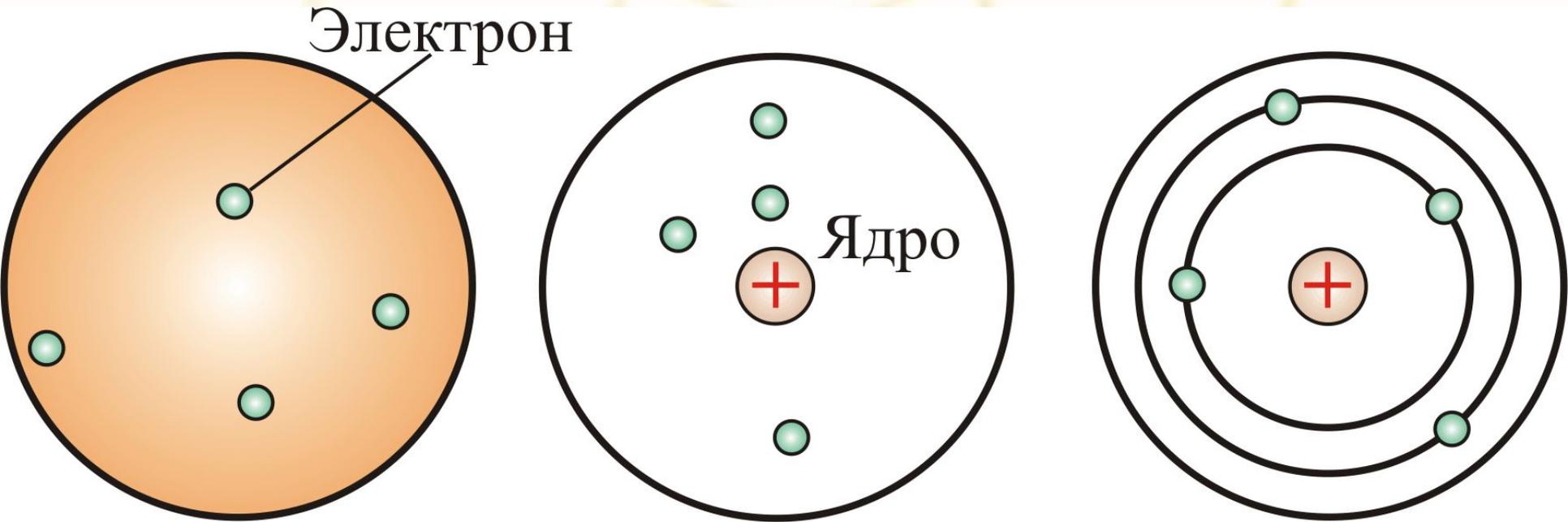
или

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

где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $n = k + 1, k + 2, \dots$



# Модели атомов

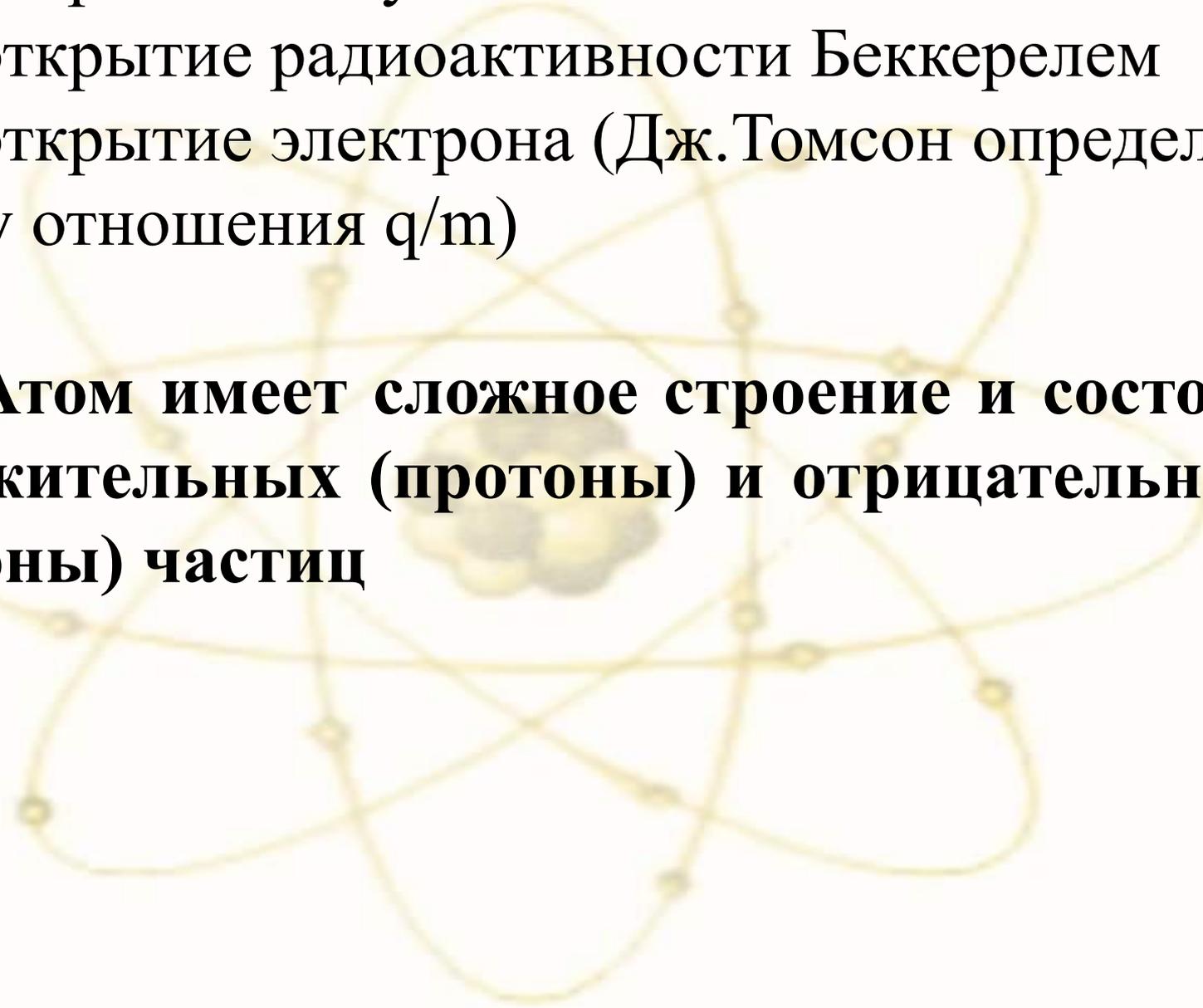


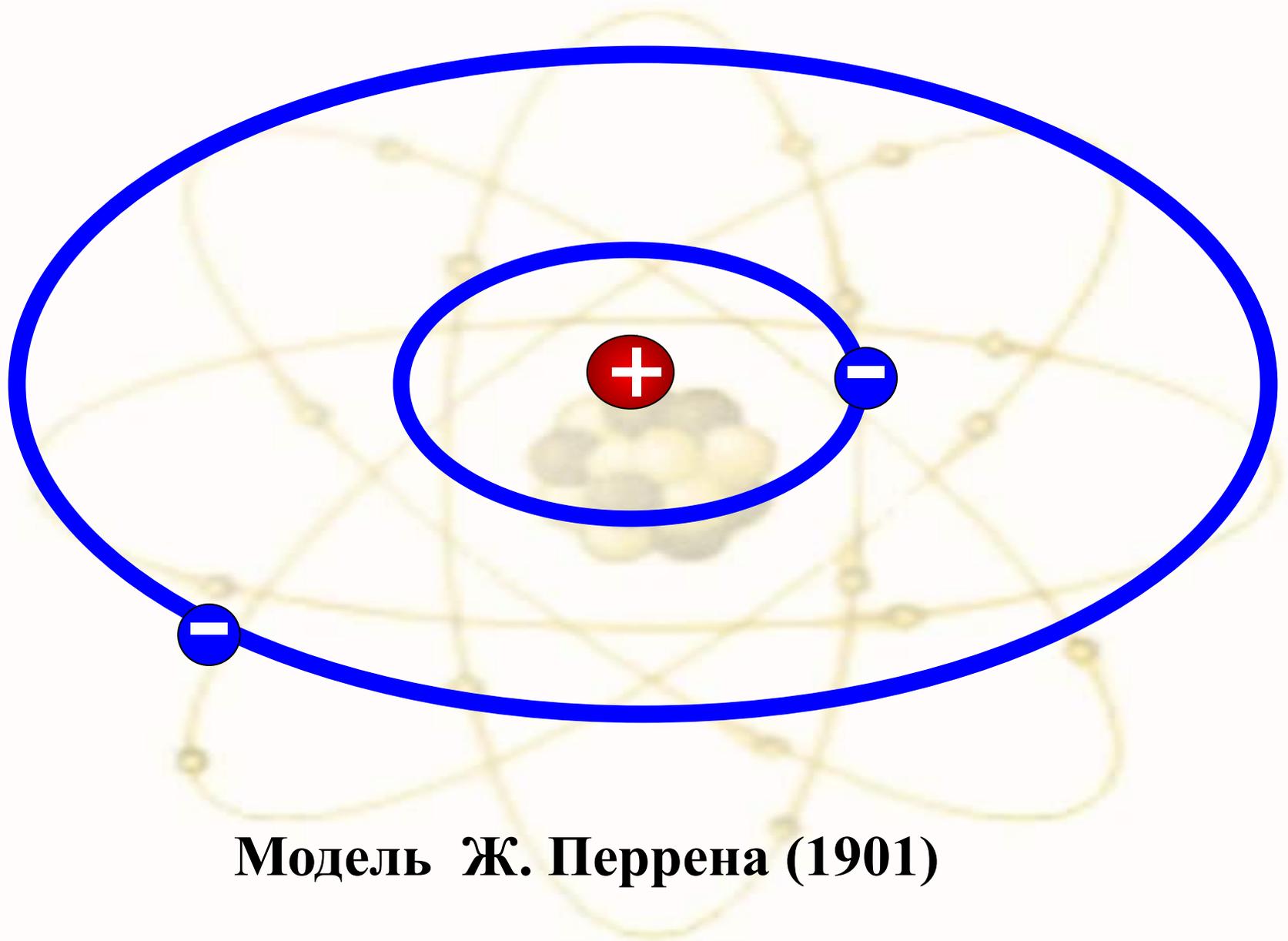
1895г. - открытие X-лучей Рентгеном

1896г. - открытие радиоактивности Беккерелем

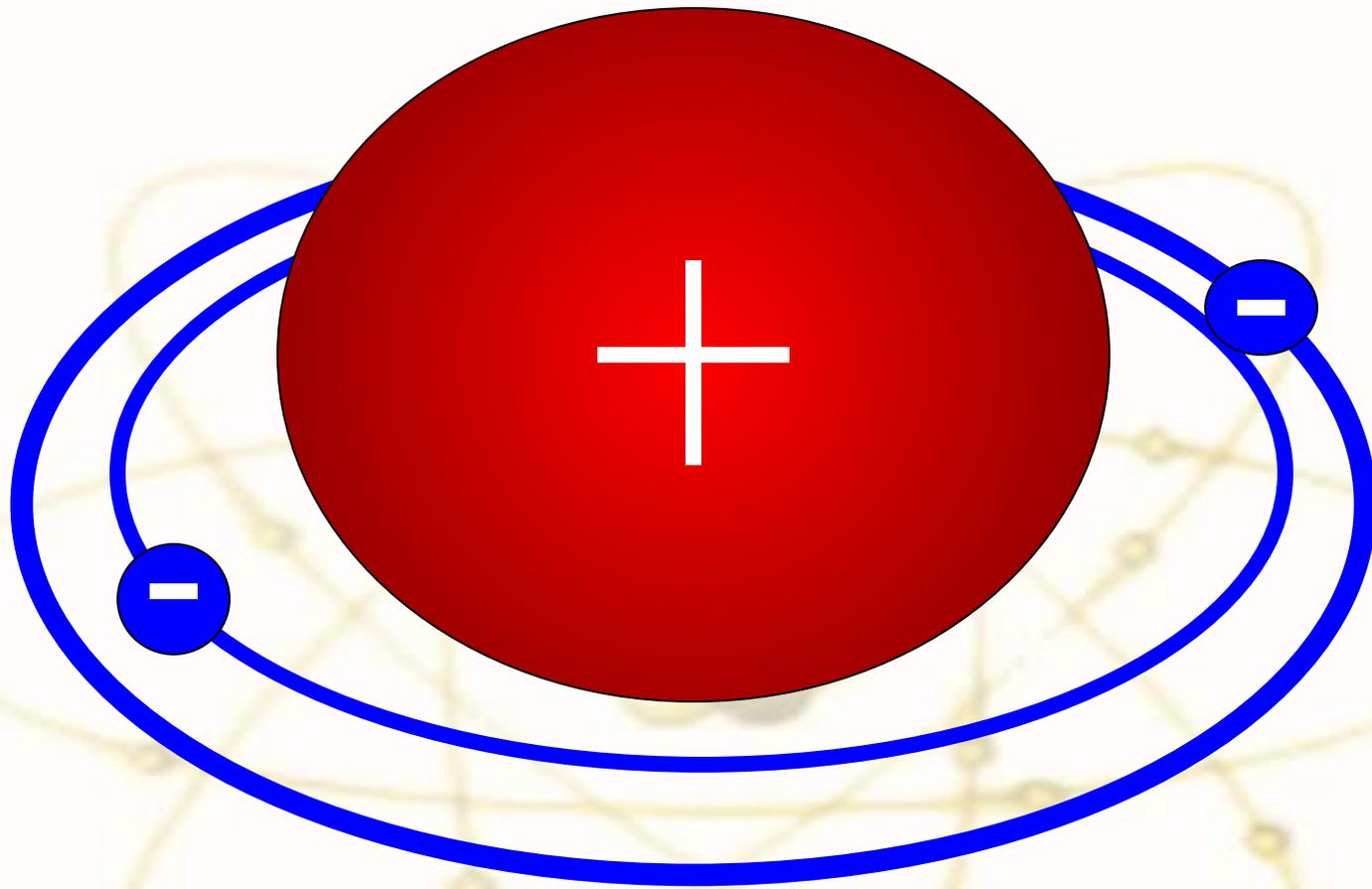
1897г. - открытие электрона (Дж.Томсон определил величину отношения  $q/m$ )

**Вывод: Атом имеет сложное строение и состоит из положительных (протоны) и отрицательных (электроны) частиц**

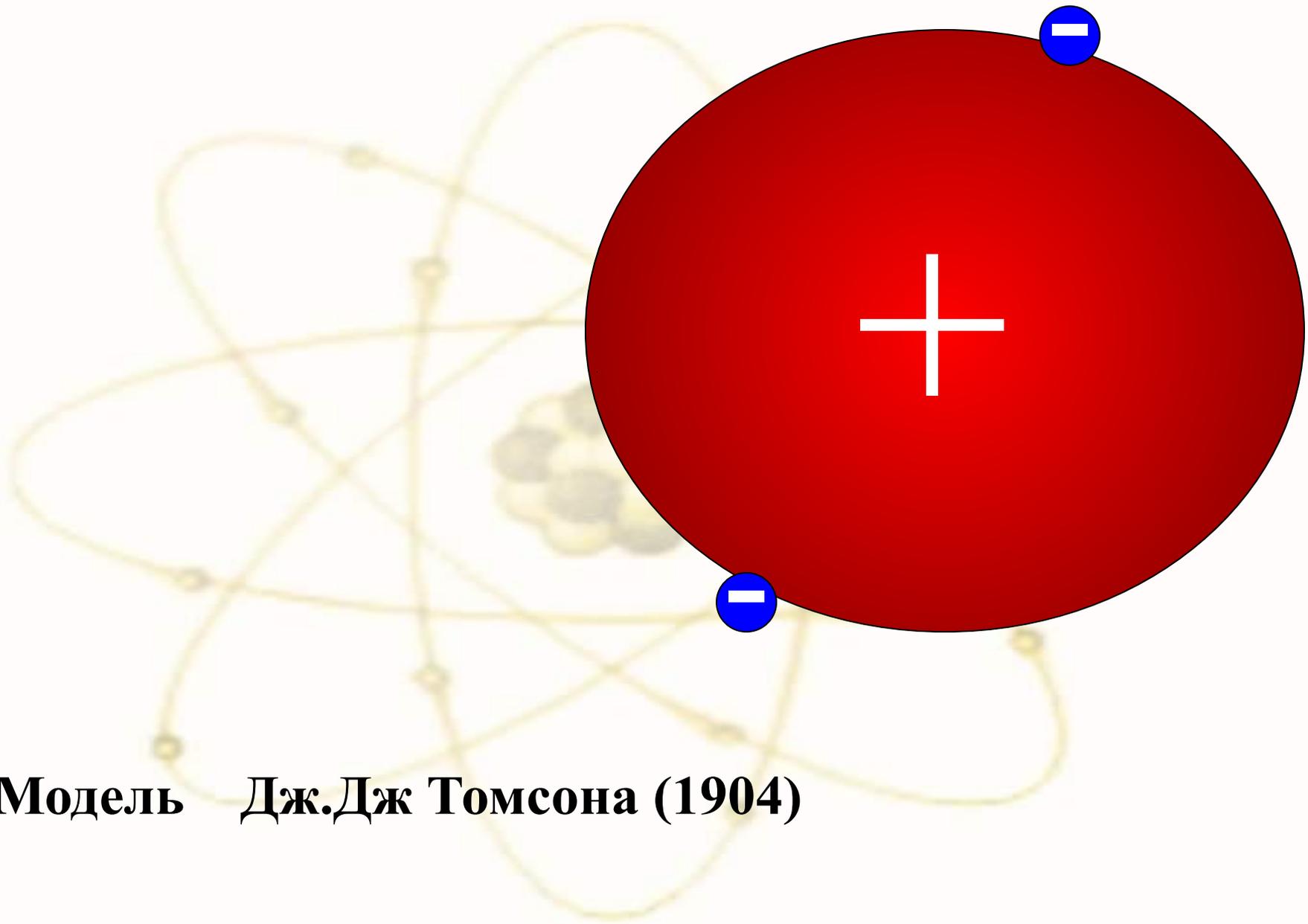




**Модель Ж. Перрена (1901)**



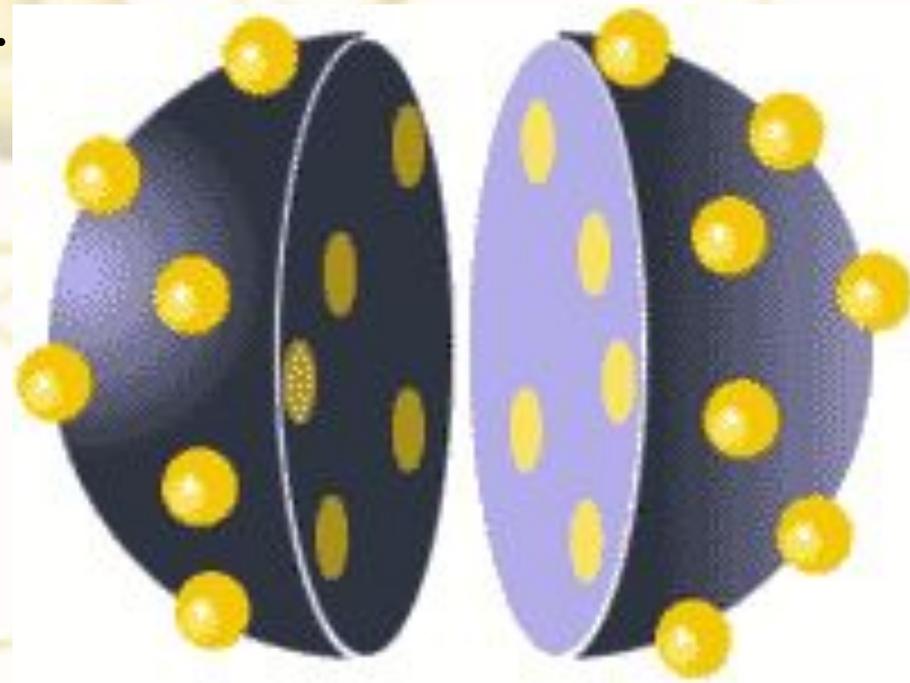
**Модель Х. Нагаока (1904)**



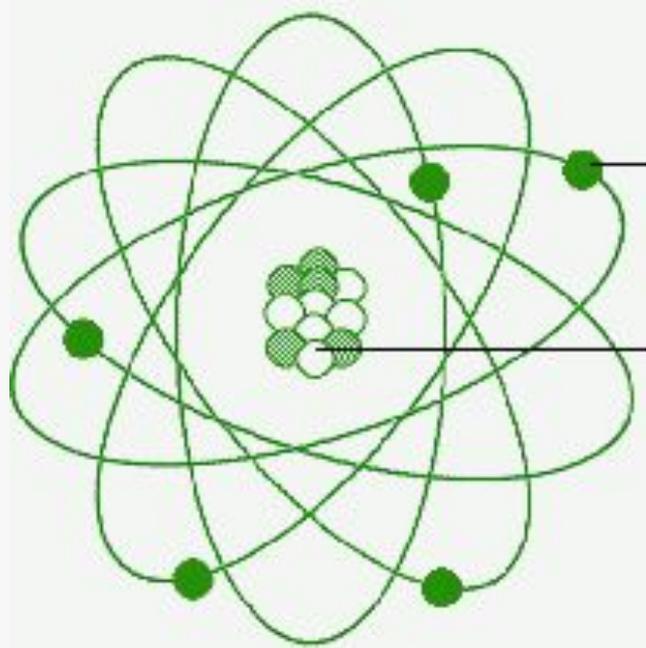
**Модель Дж.Дж Томсона (1904)**

В 1903 году Дж. Дж. Томсон, предложил модель атома: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны. Суммарный заряд сферы равен заряду электронов. Атом в целом нейтрален.

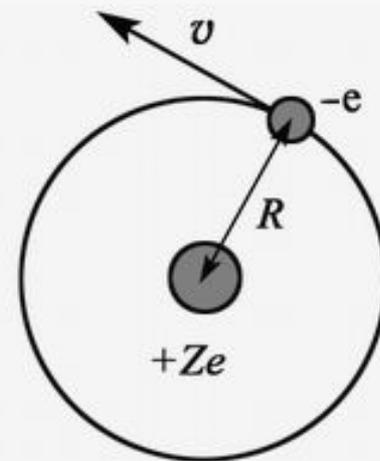
Теория такого атома давала, что спектр должен быть сложным, но никоим образом не линейчатым, что противоречило экспериментам.



Пудинговая модель



*a*



*б*

*a* – традиционный символ атома;

*б* – боровская модель водородоподобного атома



## Резерфорд Эрнест

(1871–1937)

английский физик,  
основоположник ядерной  
физики.

Исследования посвящены  
атомной и ядерной физике,  
радиоактивности.

В 1899 г. открыл альфа - и бета-лучи.

Вместе с Ф. Содди в 1903 г. разработал теорию радиоактивного распада и установил закон радиоактивных превращений.

В 1903 году доказал, что альфа-лучи состоят из положительно заряженных частиц.

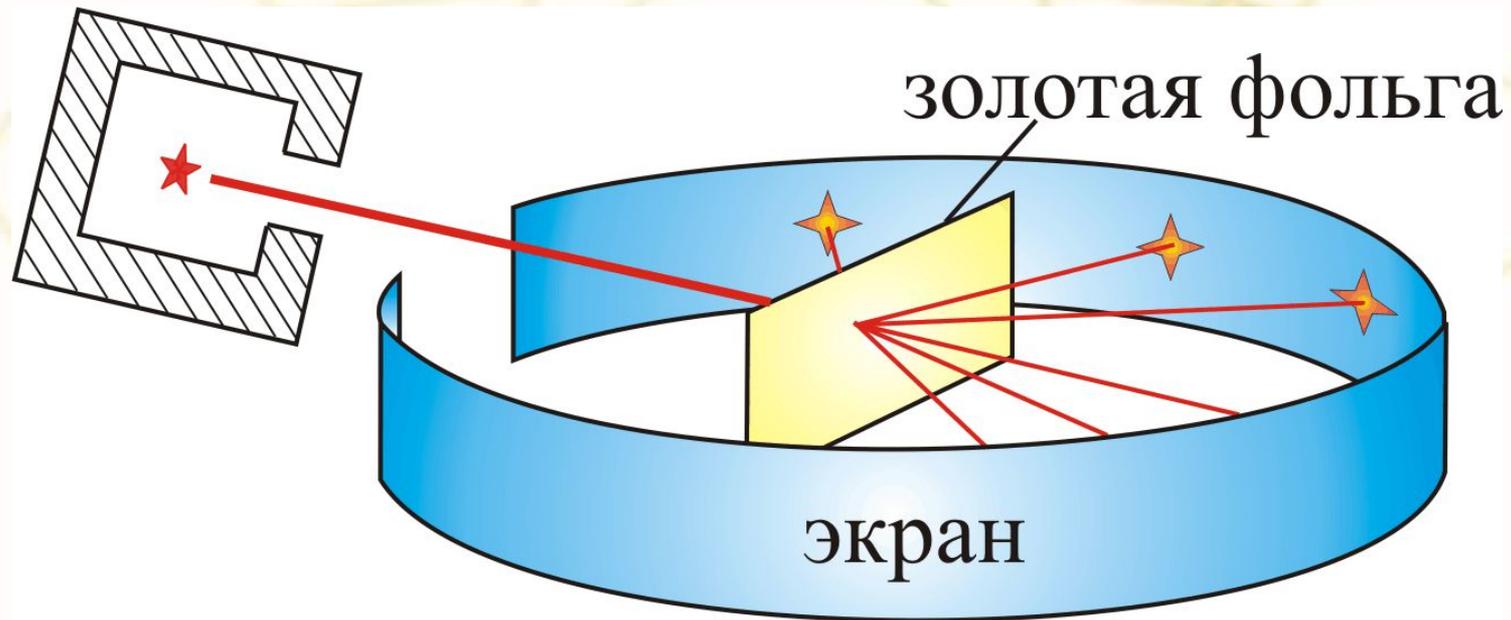
В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

## 2. Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

Скорость  $\alpha$  – частиц =  $10^7$  м/с =  $10^4$  км/сек.

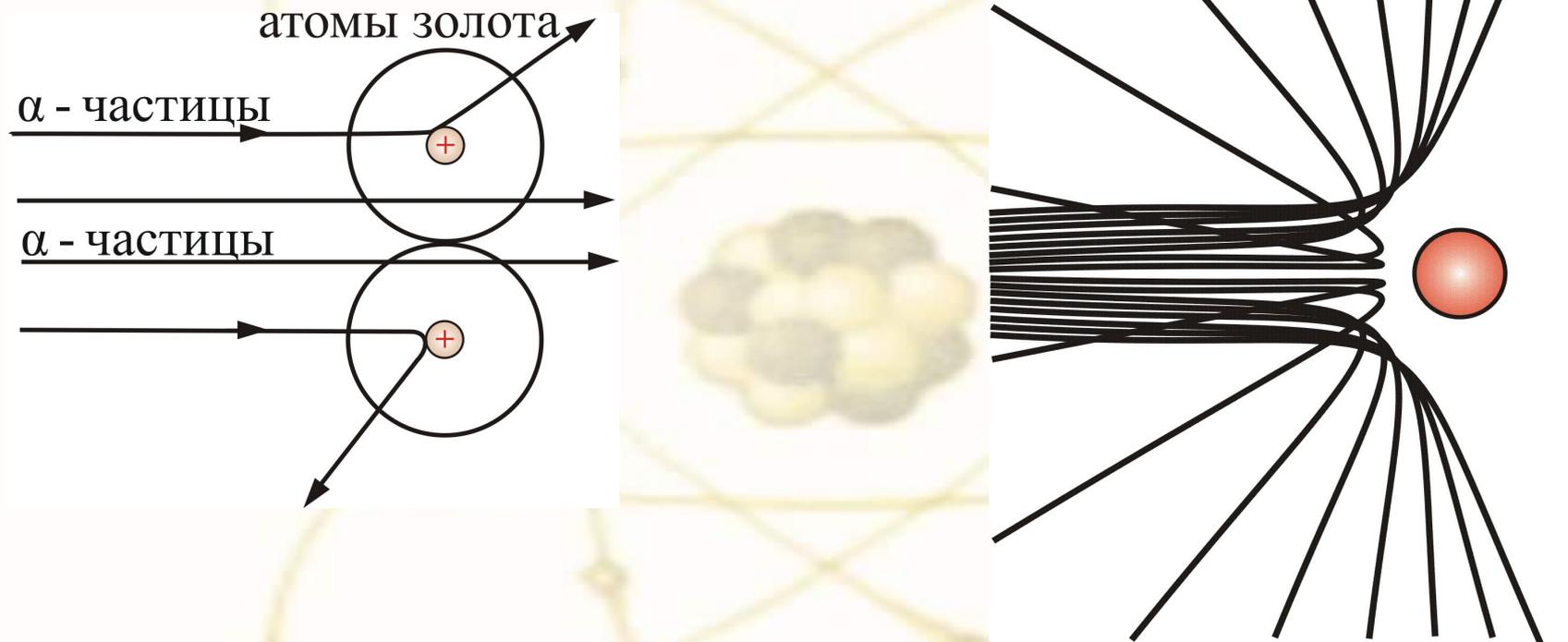
$\alpha$  – частица имеет положительный заряд равный  $+2e$ .

### Схема опыта Резерфорда



Рассеянные частицы ударялись об экран из сернистого цинка, вызывая **сцинтилляции** – вспышки света.

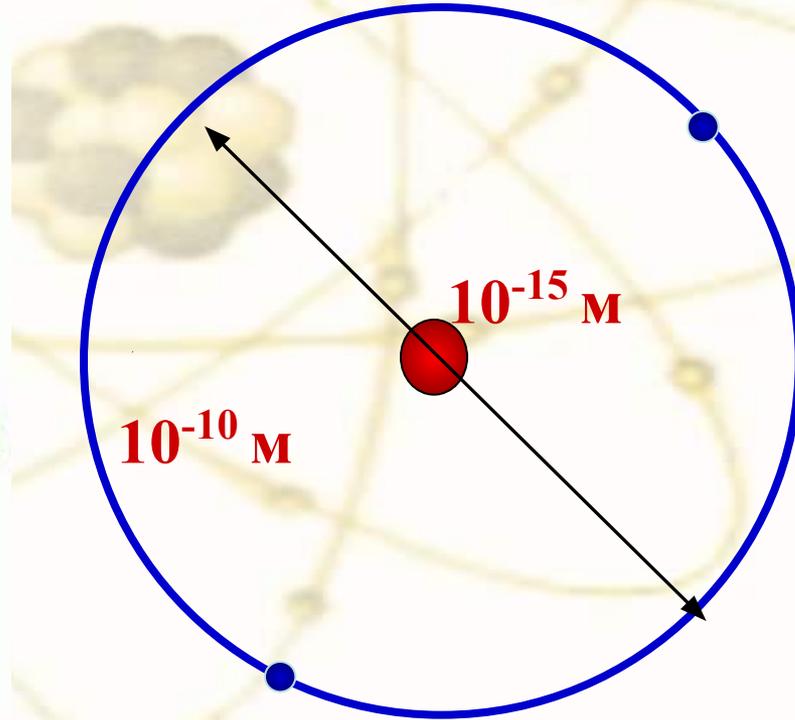
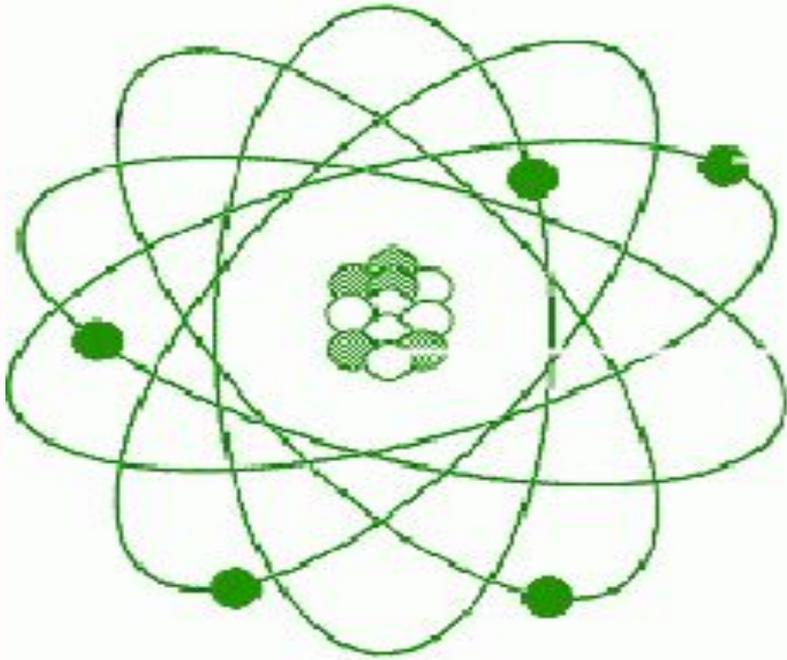
**Большинство**  $\alpha$ -частиц рассеивалось на углы порядка  $3^\circ$   
**Отдельные**  $\alpha$ -частицы отклонялись на большие углы, до  $150^\circ$  (одна из нескольких тысяч)



Такое отклонение возможно лишь при взаимодействии практически точечного положительного заряда – **ядра атома** – с близко пролетающей  **$\alpha$ -частицей**.

Малая вероятность отклонения на большие углы свидетельствует о малых размерах ядра:

**99,95% массы атома сосредоточено в ядре.**



Движение  $\alpha$ -частицы происходит **по гиперболе**:



Угол рассеяния равен углу между асимптотами гиперболы

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{mbv^2}{2Ze^2}$$

$m$  – масса  $\alpha$ -частицы,

$v$  – ее скорость вдали от ядра;

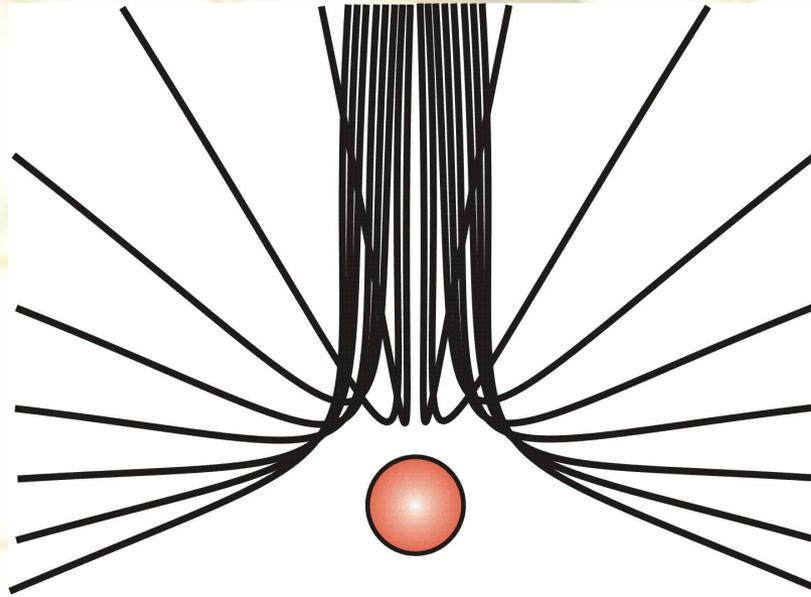
$Ze$  – заряд ядра;

$b$  – **прицельный параметр**.

**Дифференциальное сечение рассеяния** — отношение числа частиц, рассеянных атомом в единицу времени в телесный угол  $d\Omega$ , к интенсивности падающих частиц.

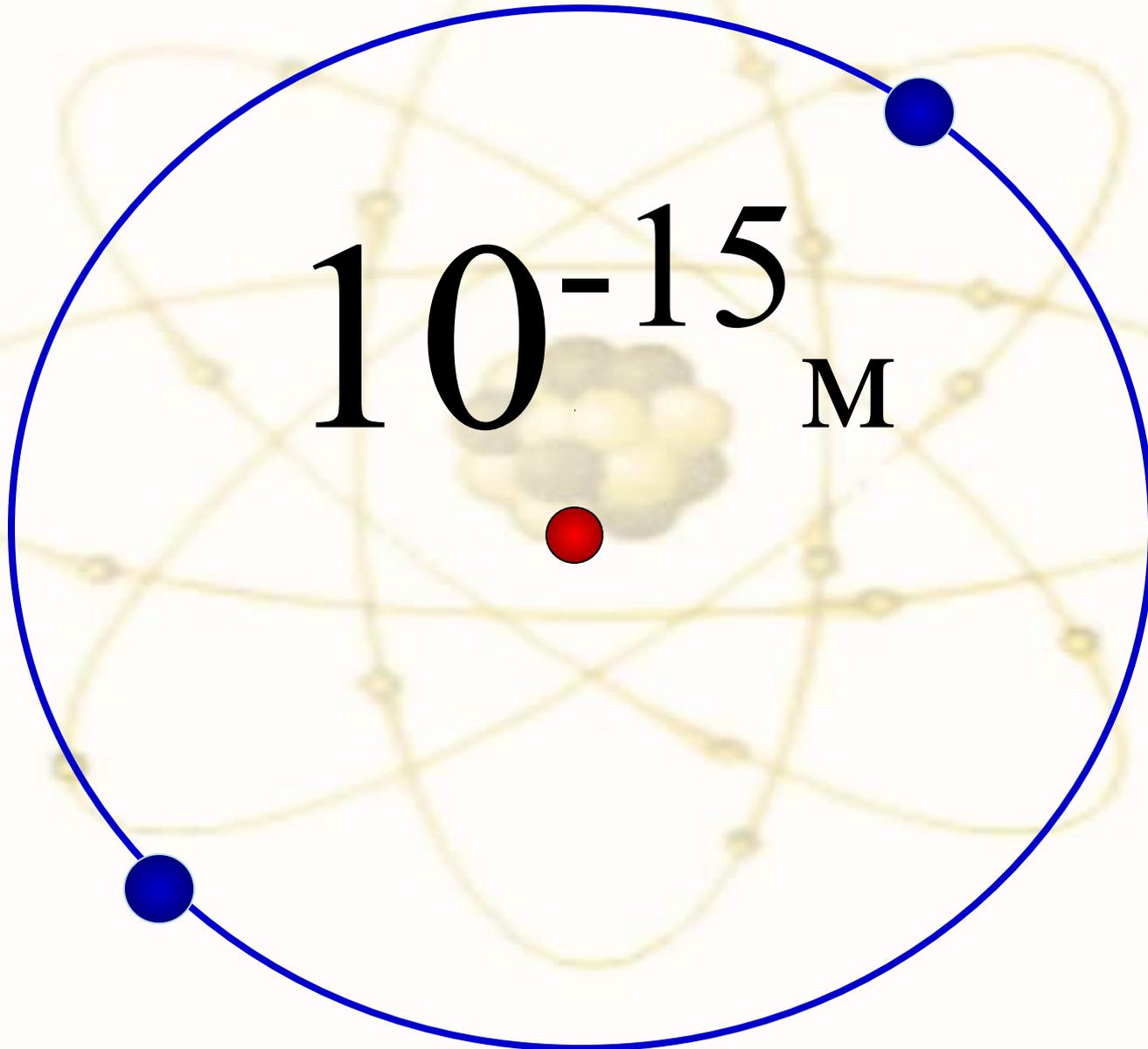
$$d\sigma = \left( \frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}$$

**- формула Резерфорда**

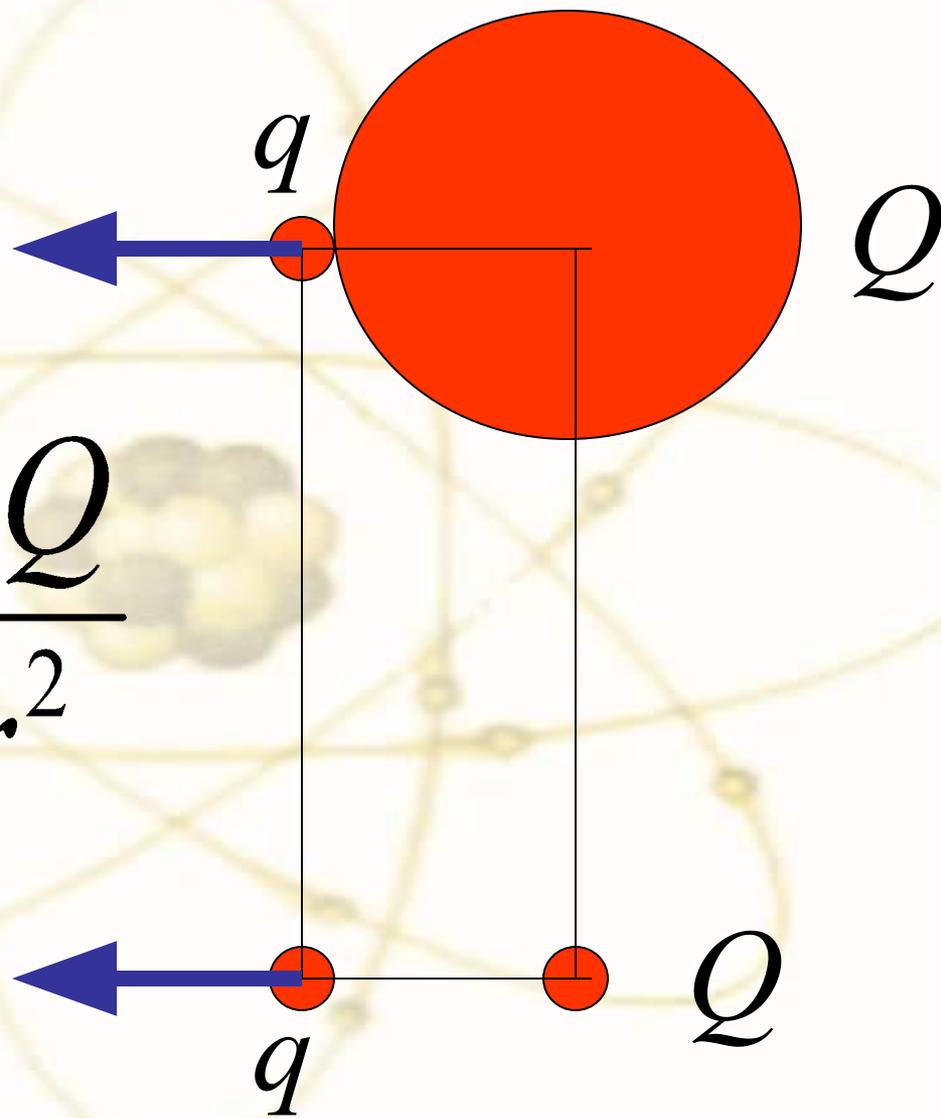


Частицы с разными прицельными параметрами отклоняются на разные углы.

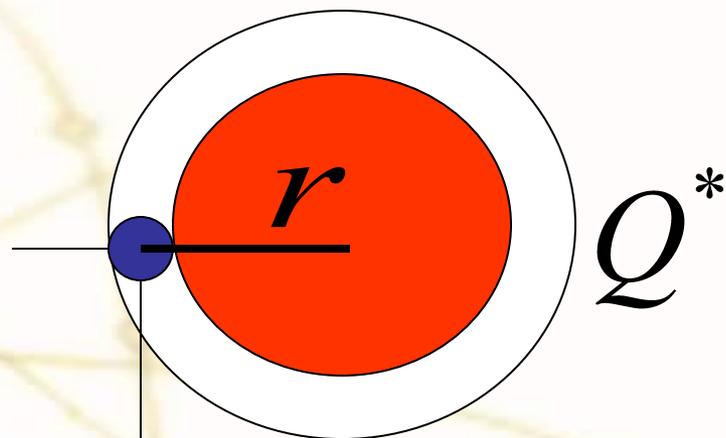
Радиус ядра  $R \approx (10^{-14} \div 10^{-15})$  м и зависит от числа нуклонов в ядре.



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$

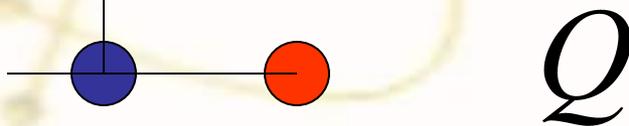


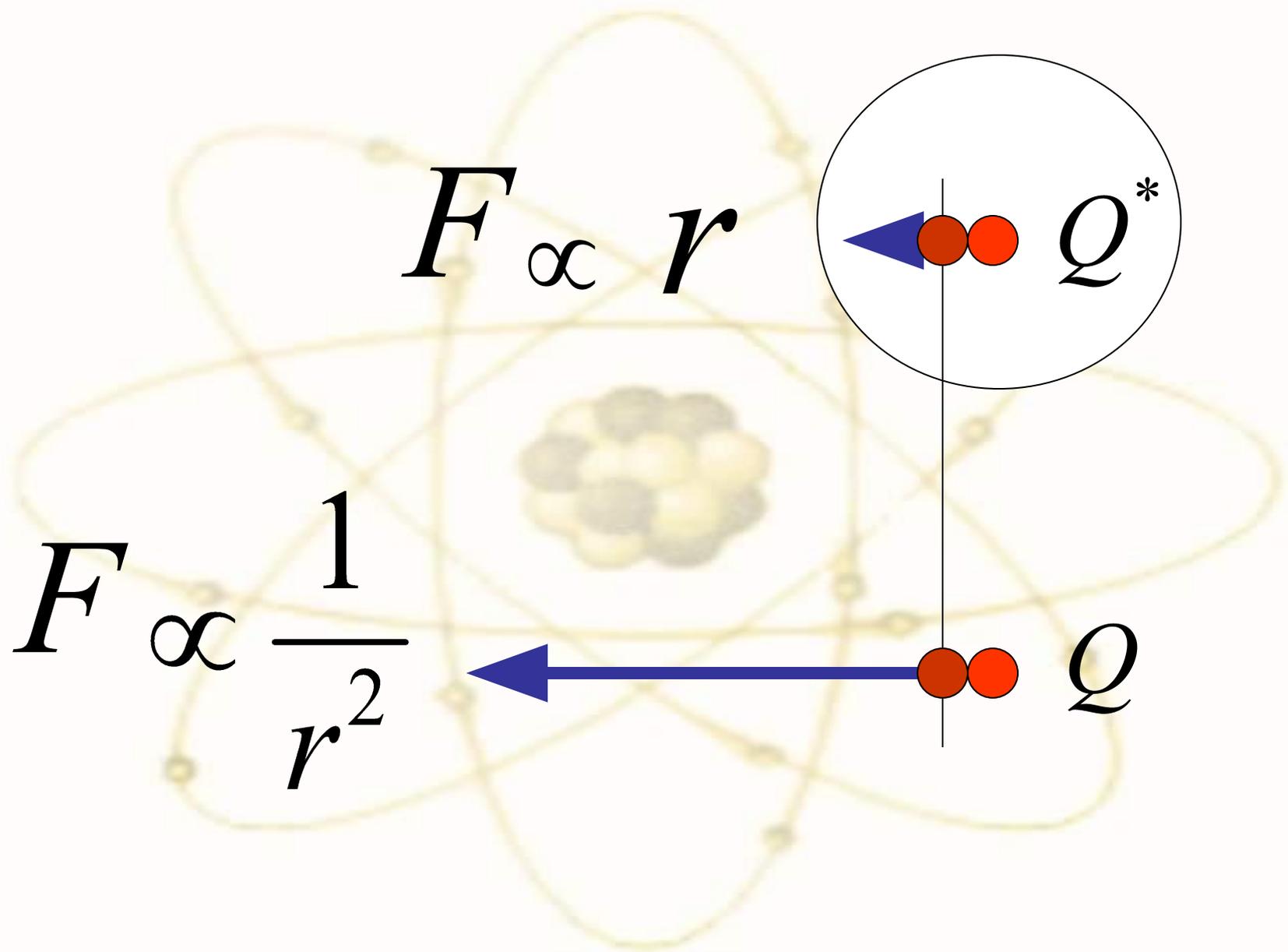
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ^*}{r^2} \propto r$$



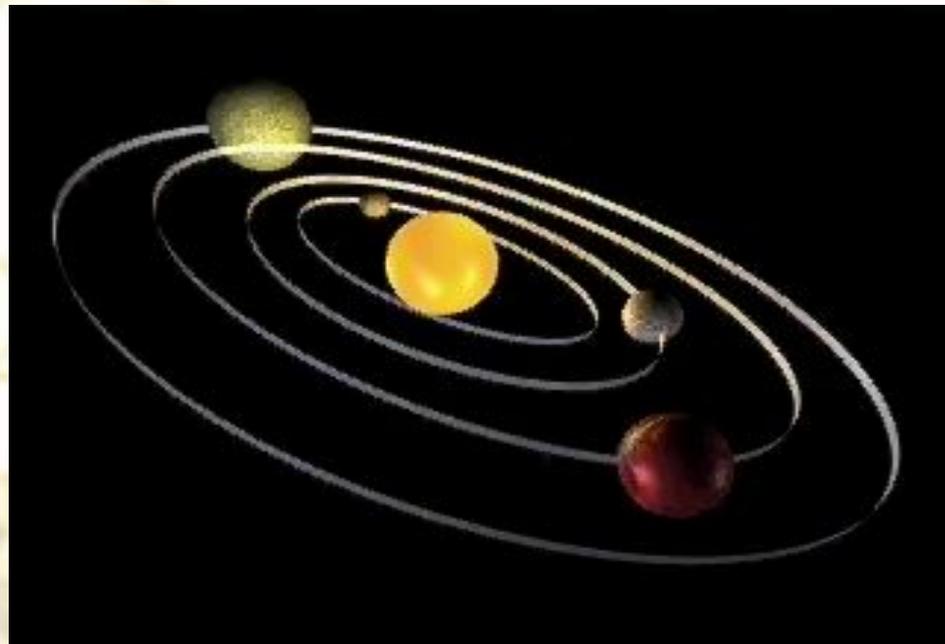
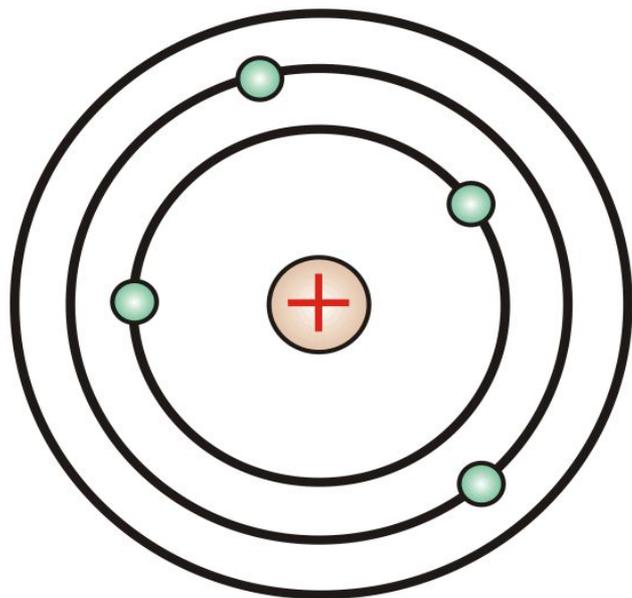
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \propto \frac{1}{r^2}$$





# Планетарная модель атома



Однако, **планетарная модель была в явном противоречии с классической электродинамикой: электрон, двигаясь по окружности, т.е. с нормальным ускорением, должен был излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и упасть на ядро.** Модель Резерфорда не могла объяснить, почему атом устойчив



### 3. Элементарная теория Бора

*БОР Нильс Хендрик Давид*

(1885–1962)

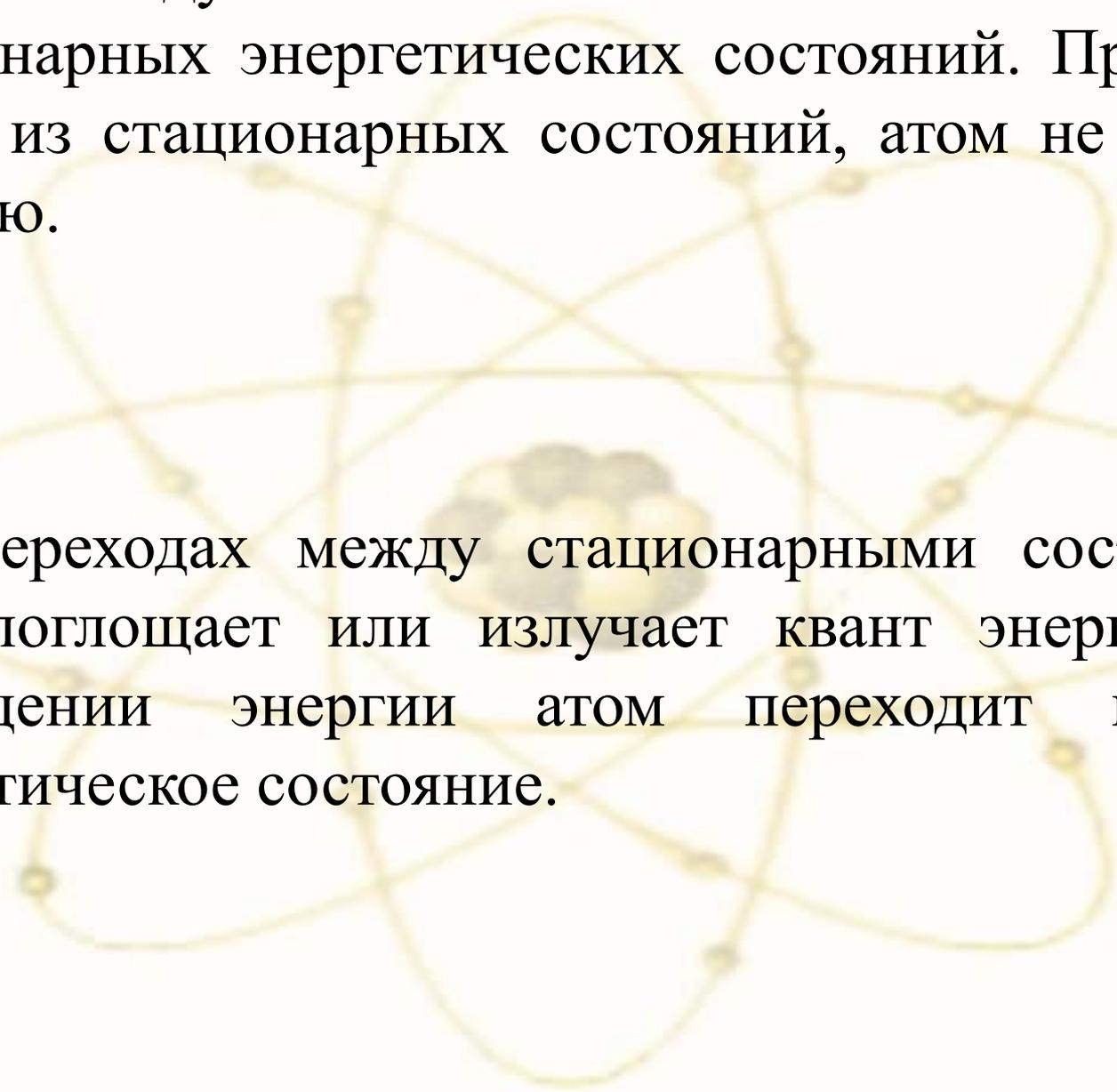
датский физик-теоретик, один из создателей современной физики.

Сформулировал идею о дискретности энергетических состояний атомов, построил атомную модель, открыв условия устойчивости атомов.

Создал первую квантовую модель атома, основанную на двух постулатах, которые прямо противоречили классическим представлениям и законам.

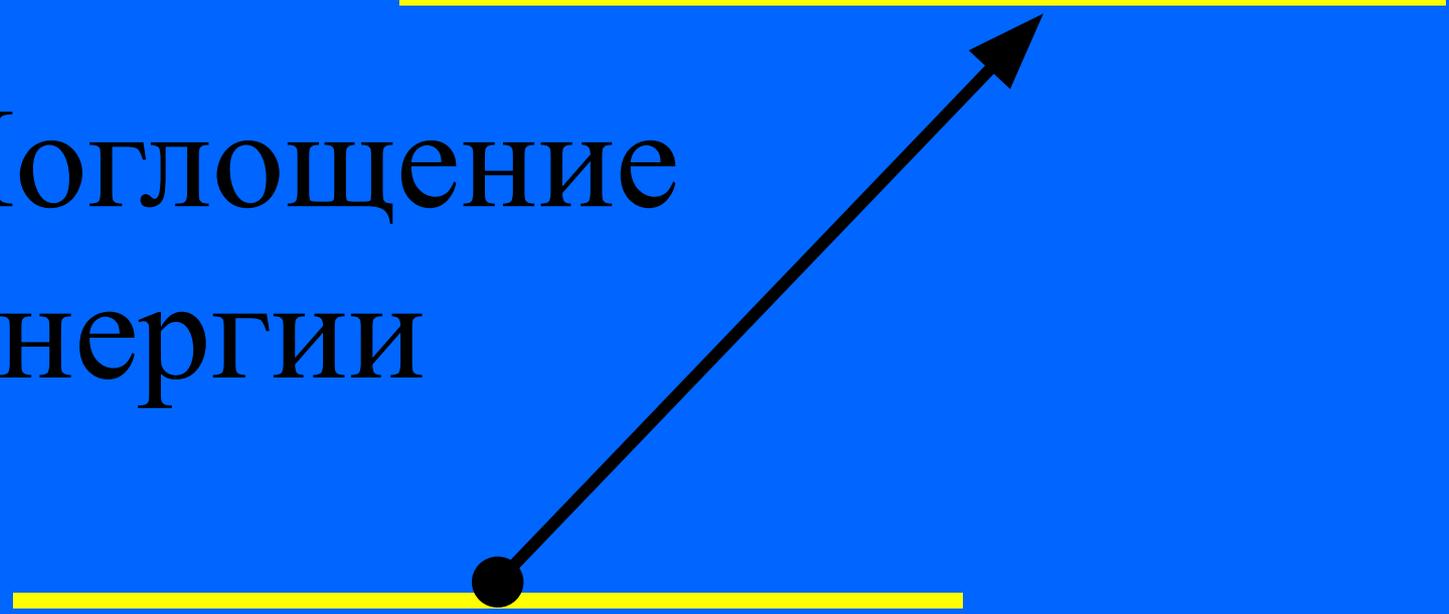
1. Атом следует описывать как «пирамиду» стационарных энергетических состояний. Пребывая в одном из стационарных состояний, атом не излучает энергию.

2. При переходах между стационарными состояниями атом поглощает или излучает квант энергии. При поглощении энергии атом переходит в более энергетическое состояние.



$$E_m > E_n$$

Поглощение  
энергии

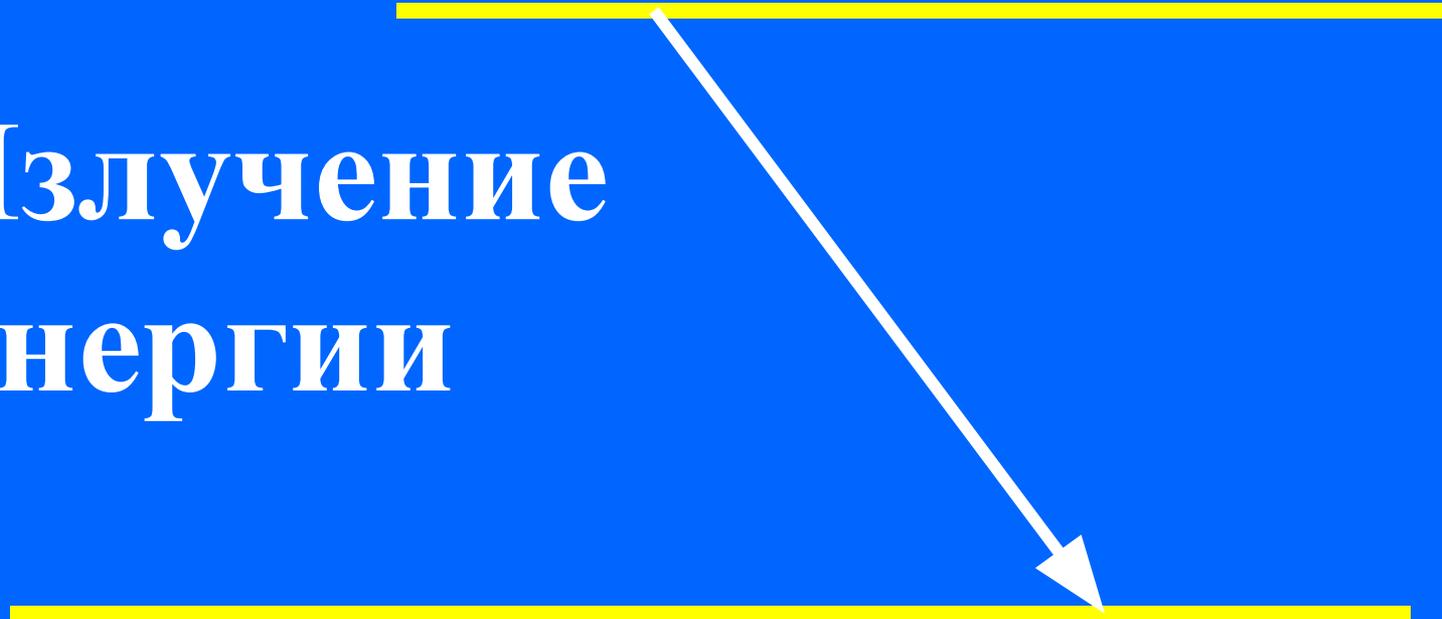


$$E_n$$

$$E_m > E_n$$

Излучение  
энергии

$$E_n$$

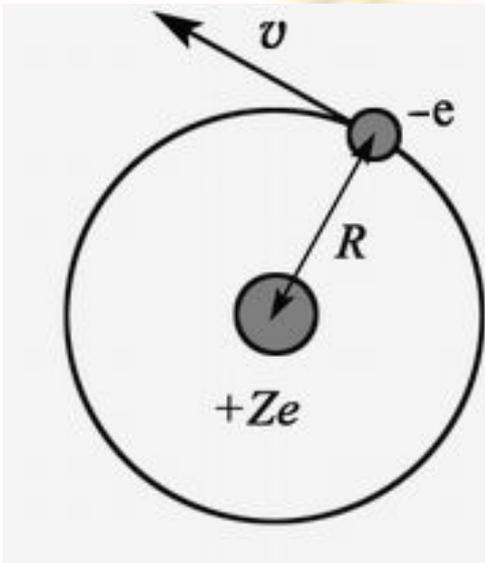


# Постулаты Бора

Электронны движутся только по определенным (стационарным) орбитам. При этом не происходит излучения энергии.

**Условие для стационарных орбит:**

из всех орбит электрона **возможны только те, для которых момент импульса электрона, равен целому кратному постоянной Планка:**



$$m_e v r = n \hbar$$

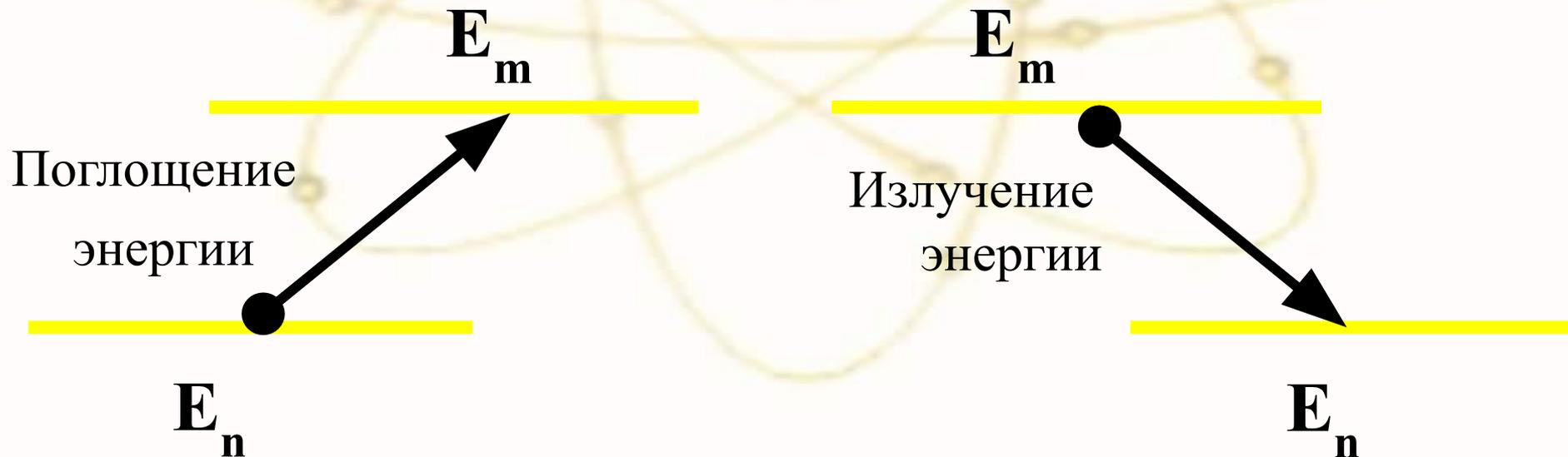
$n = 1, 2, 3, \dots$  главное квантовое число.

**Излучение или поглощение энергии в виде кванта энергии  $h\nu$  происходит лишь при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.**

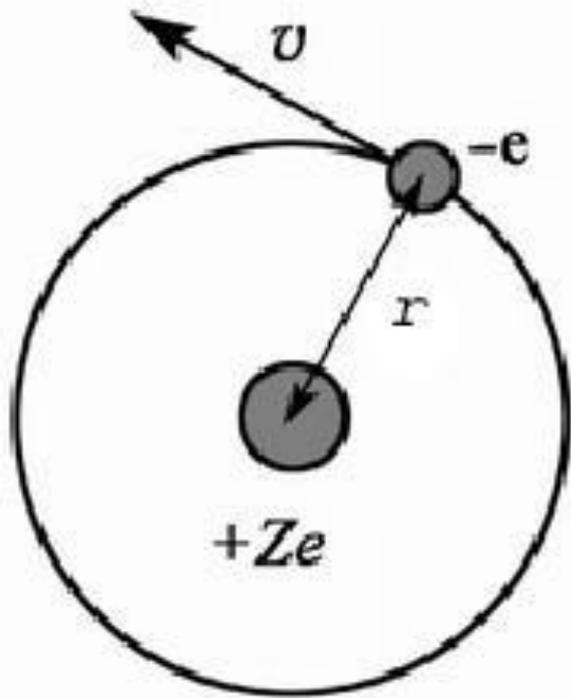
Энергия светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

$$h\nu = E_m - E_n - \text{Правило частот Бора}$$

$m, n$  – номера состояний.



# Уравнение движения электрона



$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

$$m_e v r = n\hbar$$

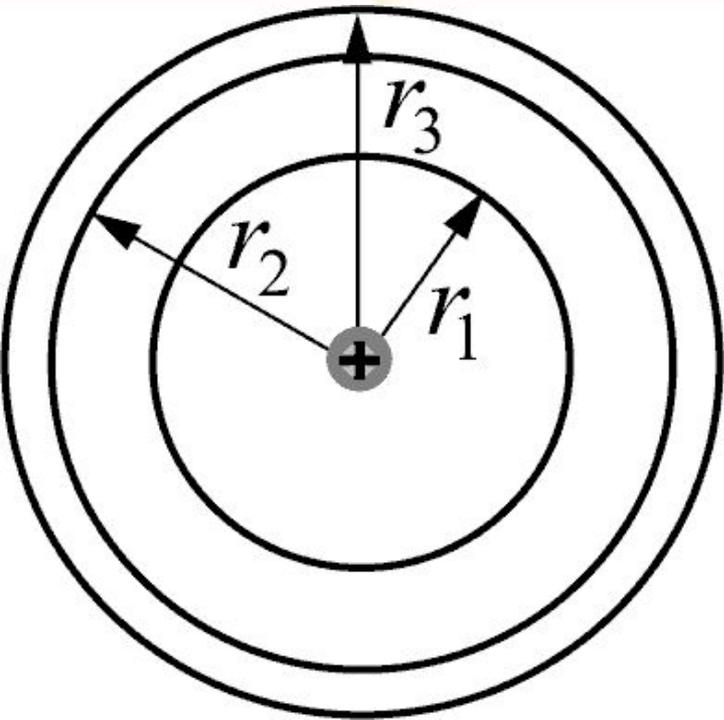
**Радиус стационарных орбит:**

$\Rightarrow$

$$r_n = \frac{h^2 n^2 4\pi\epsilon_0}{m_e Ze^2}$$

Радиус первой орбиты водородного атома называют **Боровским радиусом:**

При  $n = 1$ ,  $Z = 1$  для водорода имеем:

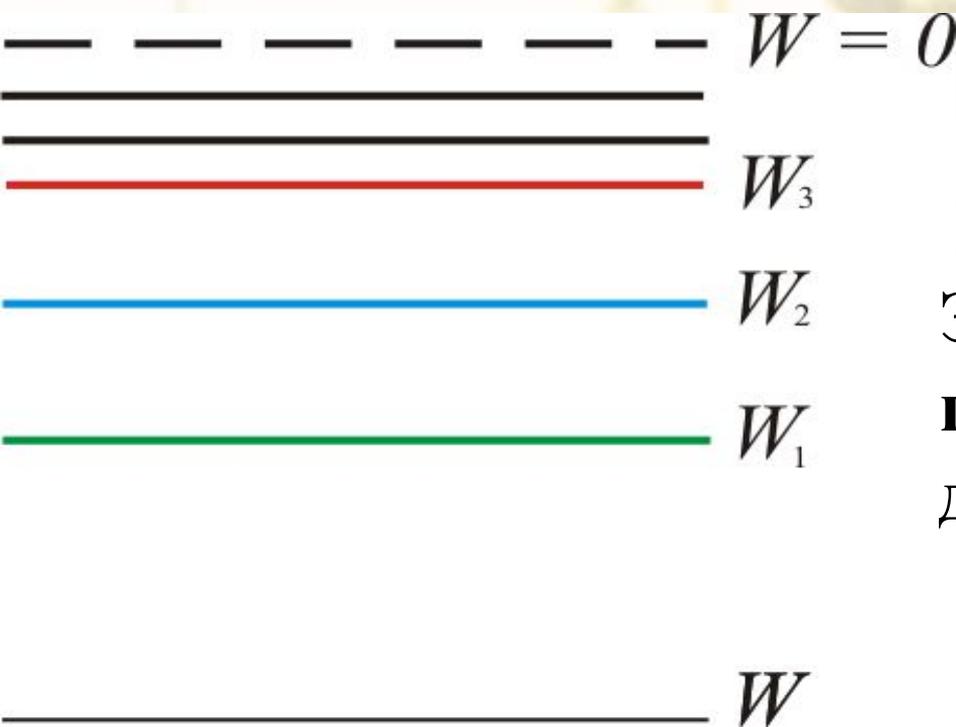


$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} = \\ = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Внутренняя энергия атома складывается из кинетической энергии электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

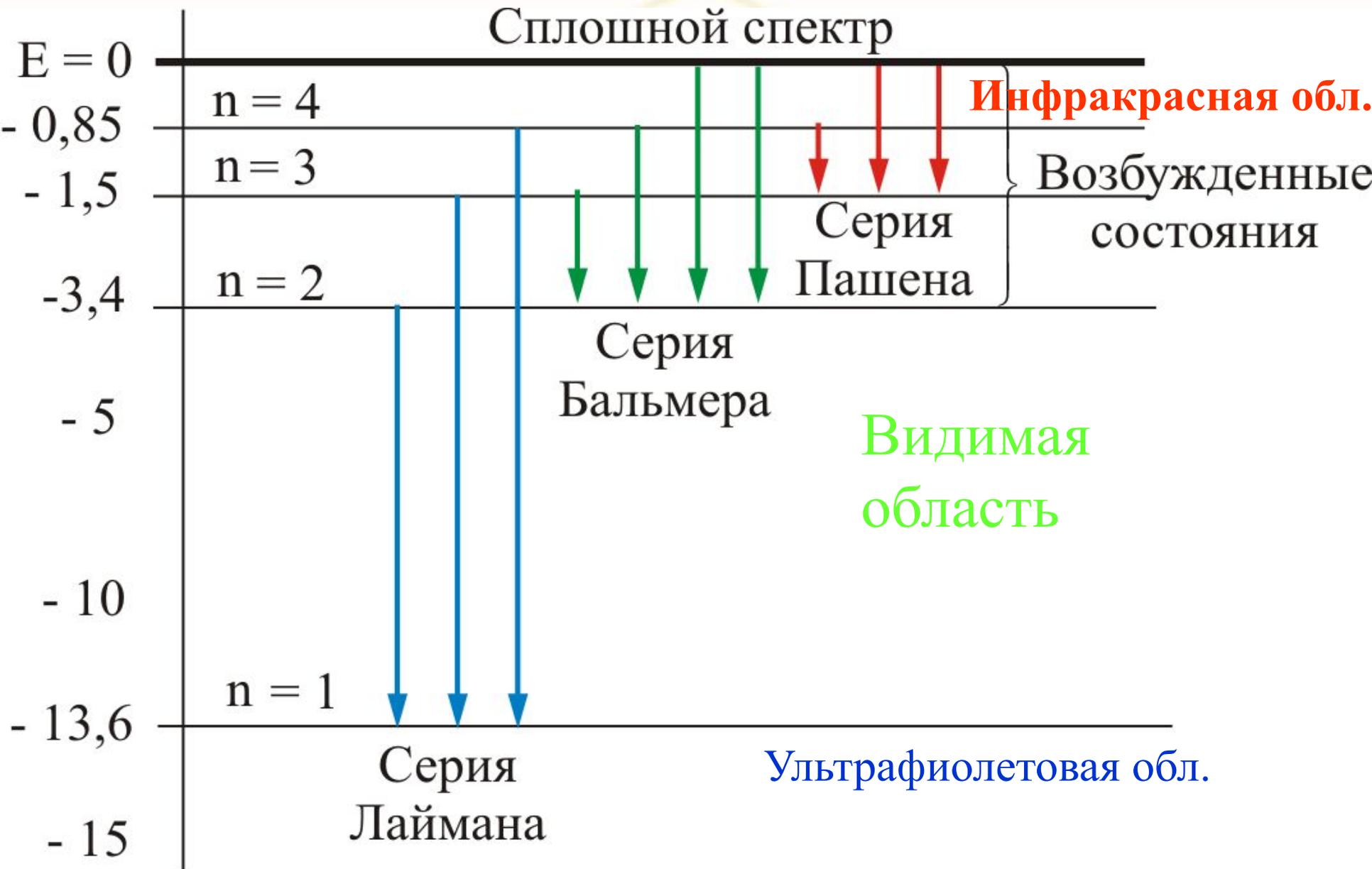
$$\frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Отсюда



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

**Энергия электрона может принимать только дискретные значения, т.к.  $n = 1, 2, 3, \dots$**



При переходе электрона в атоме водорода из состояния  $n$  в состояние  $k$  излучается фотон с энергией :

$$h\nu = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

и частота излучения,

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

Мы получили обобщенную формулу Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом, где постоянная Ридберга

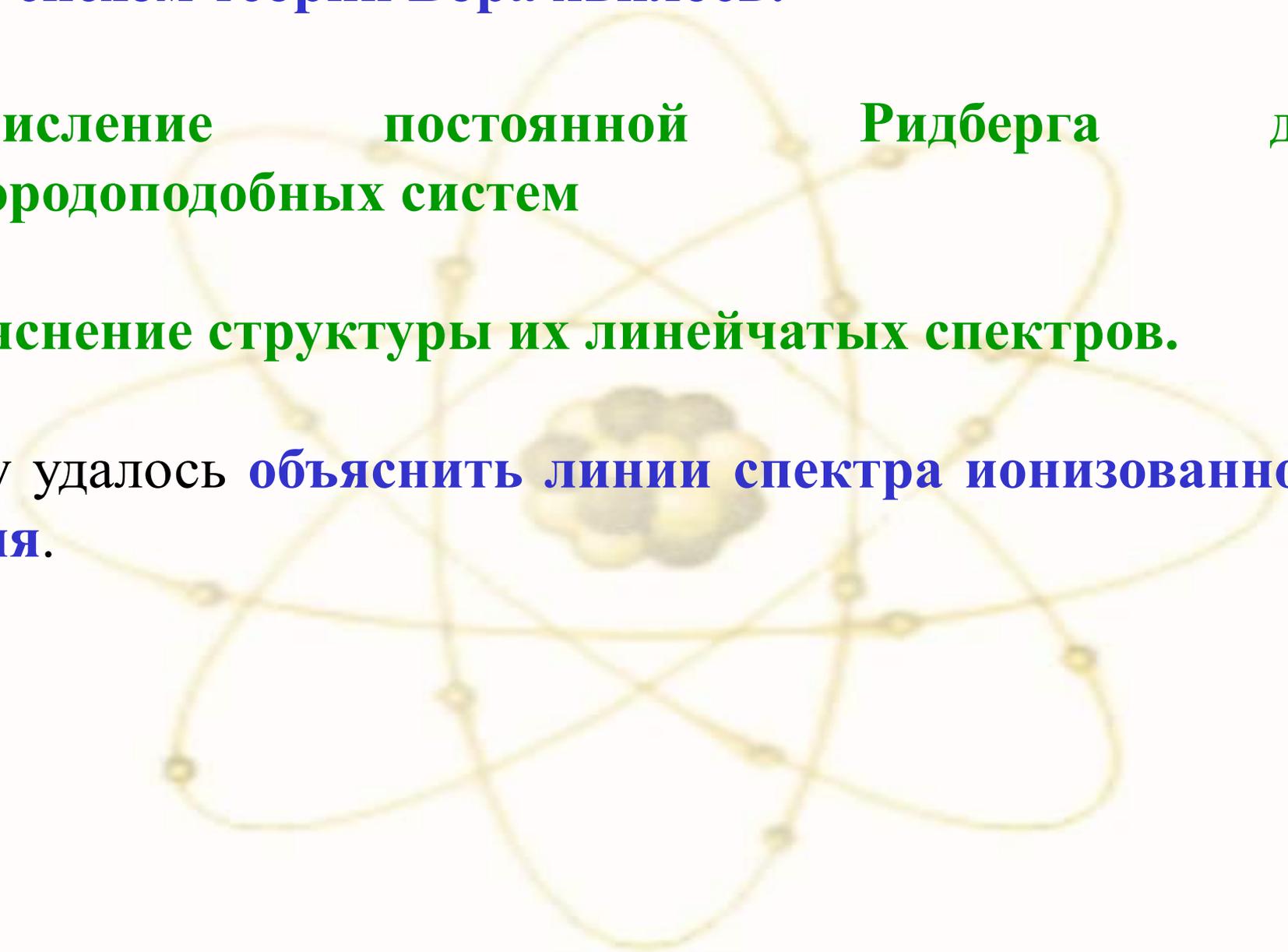
$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$$

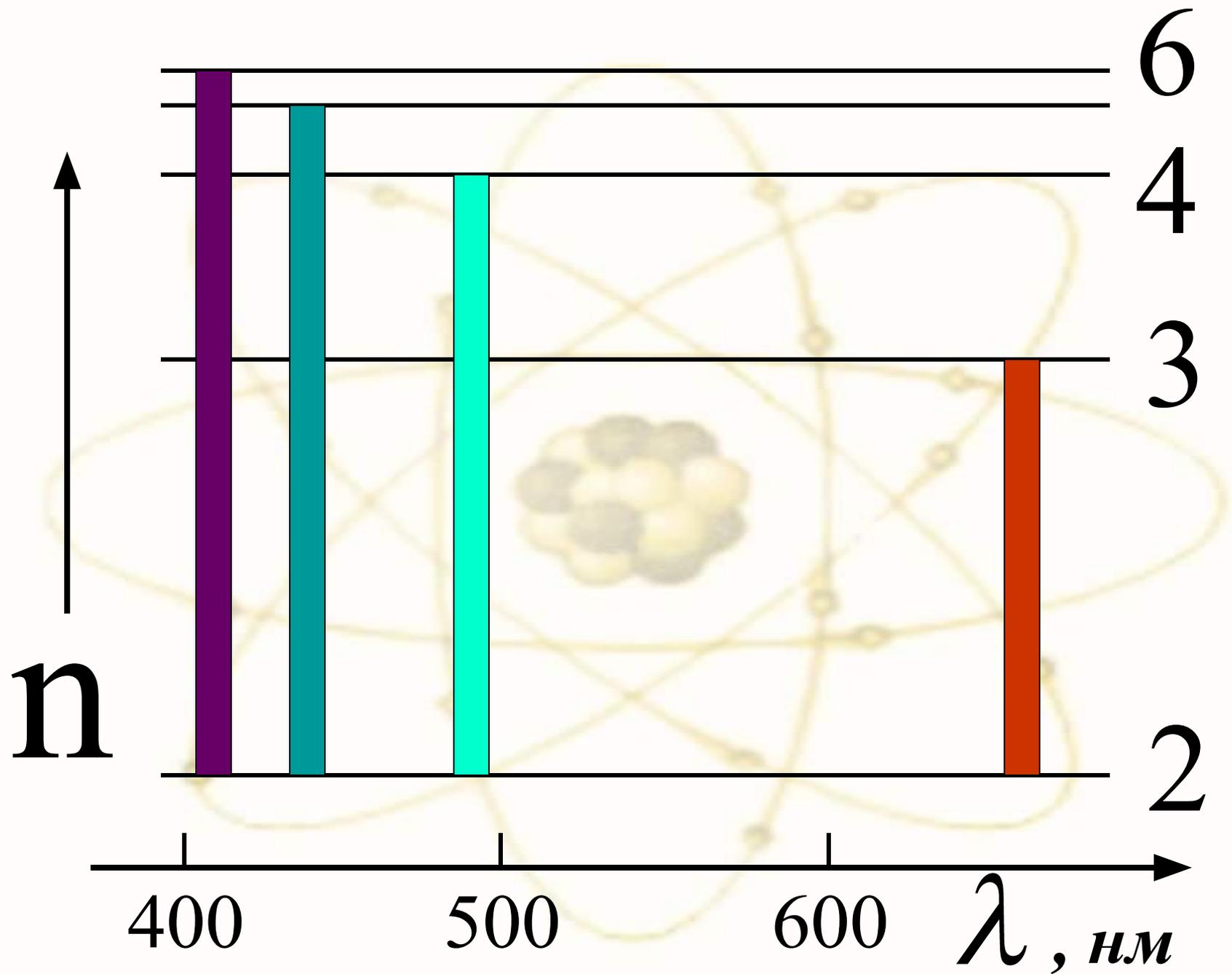
# Успехом теории Бора явилось:

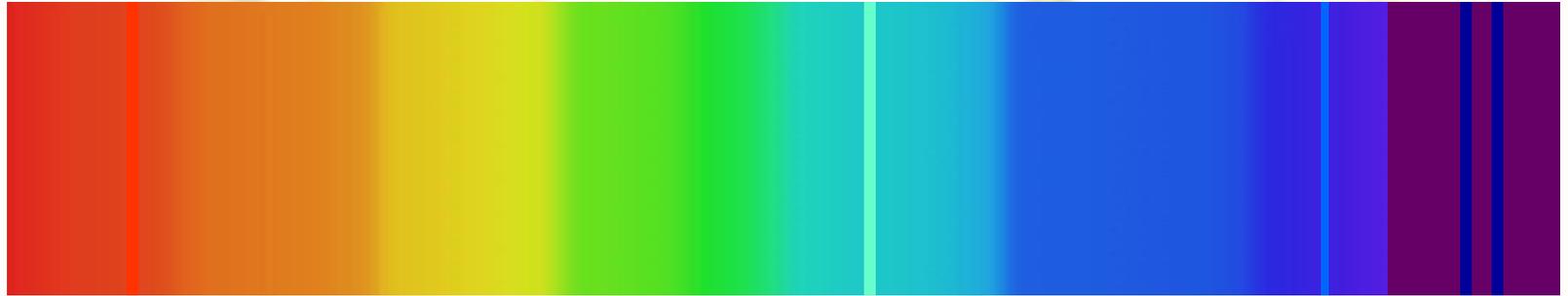
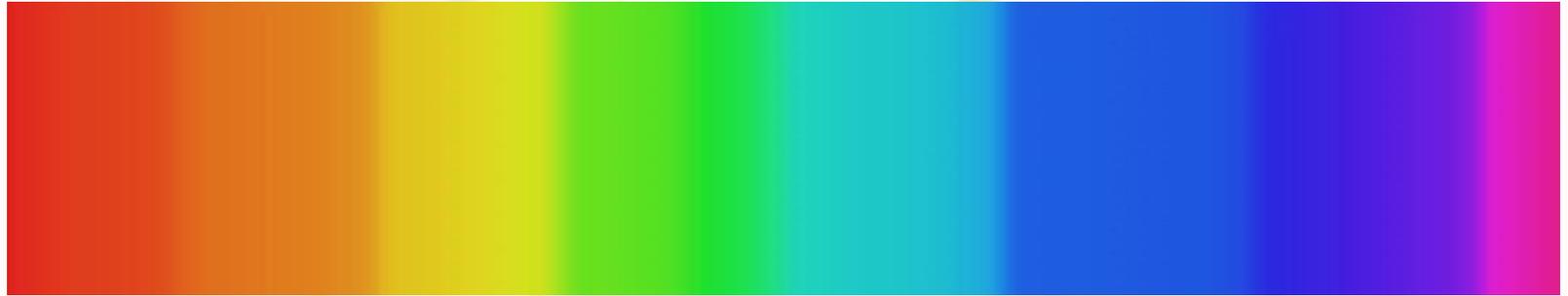
• вычисление постоянной Ридберга для водородоподобных систем

• объяснение структуры их линейчатых спектров.

Бору удалось объяснить линии спектра ионизованного гелия.







$H_{\alpha}$

$H_{\beta}$

$H_{\gamma}$

$H_{\delta}$

**Бор** теоретически вычислил отношение массы протона к массе электрона  $m_p/m_e = 1847$ , это находится в соответствии с экспериментом.

Все это было важным подтверждением основных идей, содержащихся в теории Бора.

Теория Бора сыграла огромную роль в создании атомной физики. В период ее развития (1913 – 1925 г.г.) были сделаны важные открытия, навсегда вошедшие в сокровищницу мировой науки.

Однако наряду с успехами в теории Бора с самого начала обнаружались **существенные недостатки**.

• **Внутренняя противоречивость теории: механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами.**

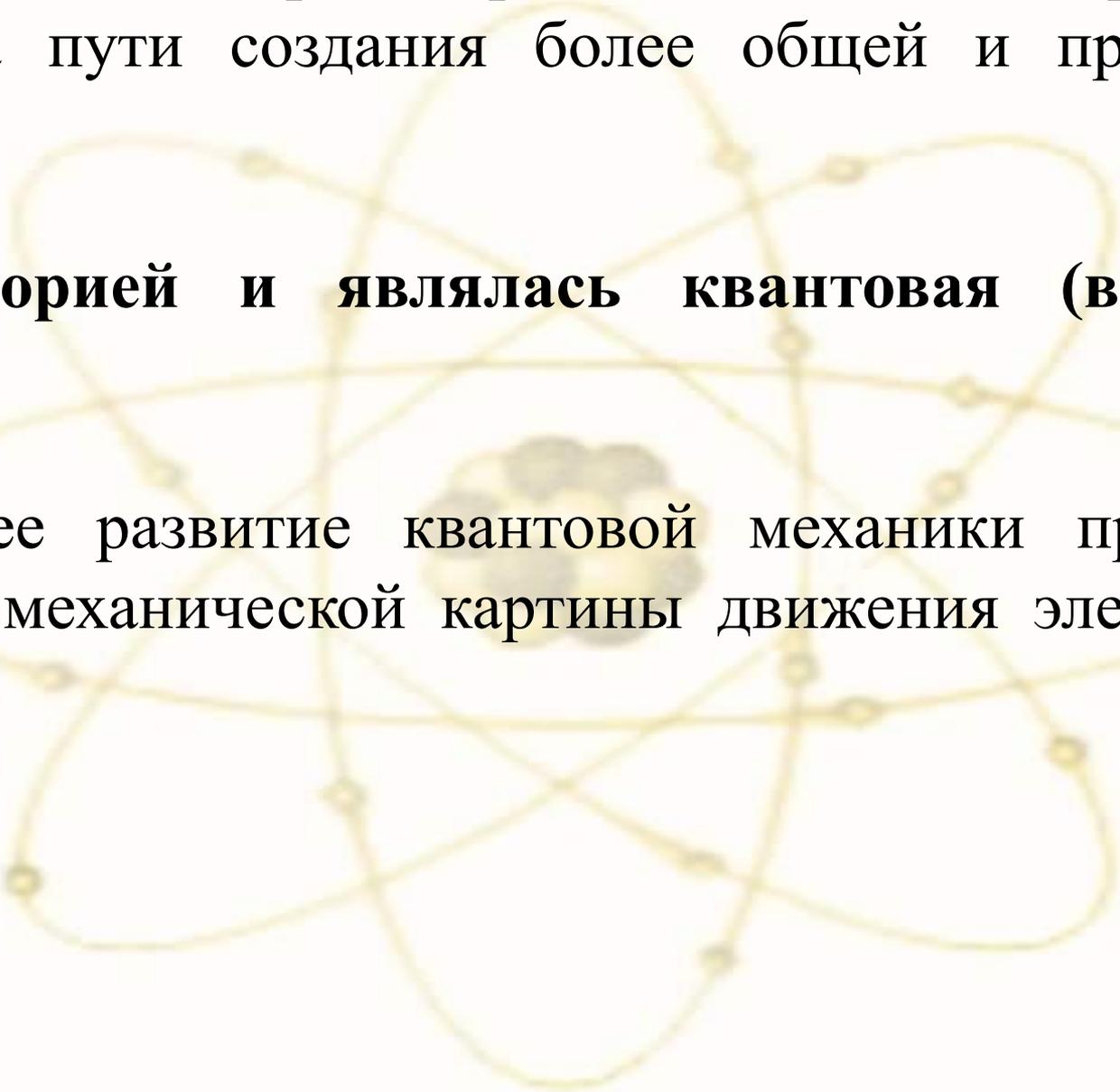
• Теория не могла объяснить **вопрос об интенсивностях спектральных линий**.

• Серьезной неудачей являлась **абсолютная невозможность применить теорию для объяснения спектров гелия (He)** (два электрона на орбите, и уже теория Бора не справляется).

Стало ясно, что теория Бора является лишь переходным этапом на пути создания более общей и правильной теории.

**Такой теорией и являлась квантовая (волновая) механика.**

Дальнейшее развитие квантовой механики привело к отказу от механической картины движения электрона в поле ядра.

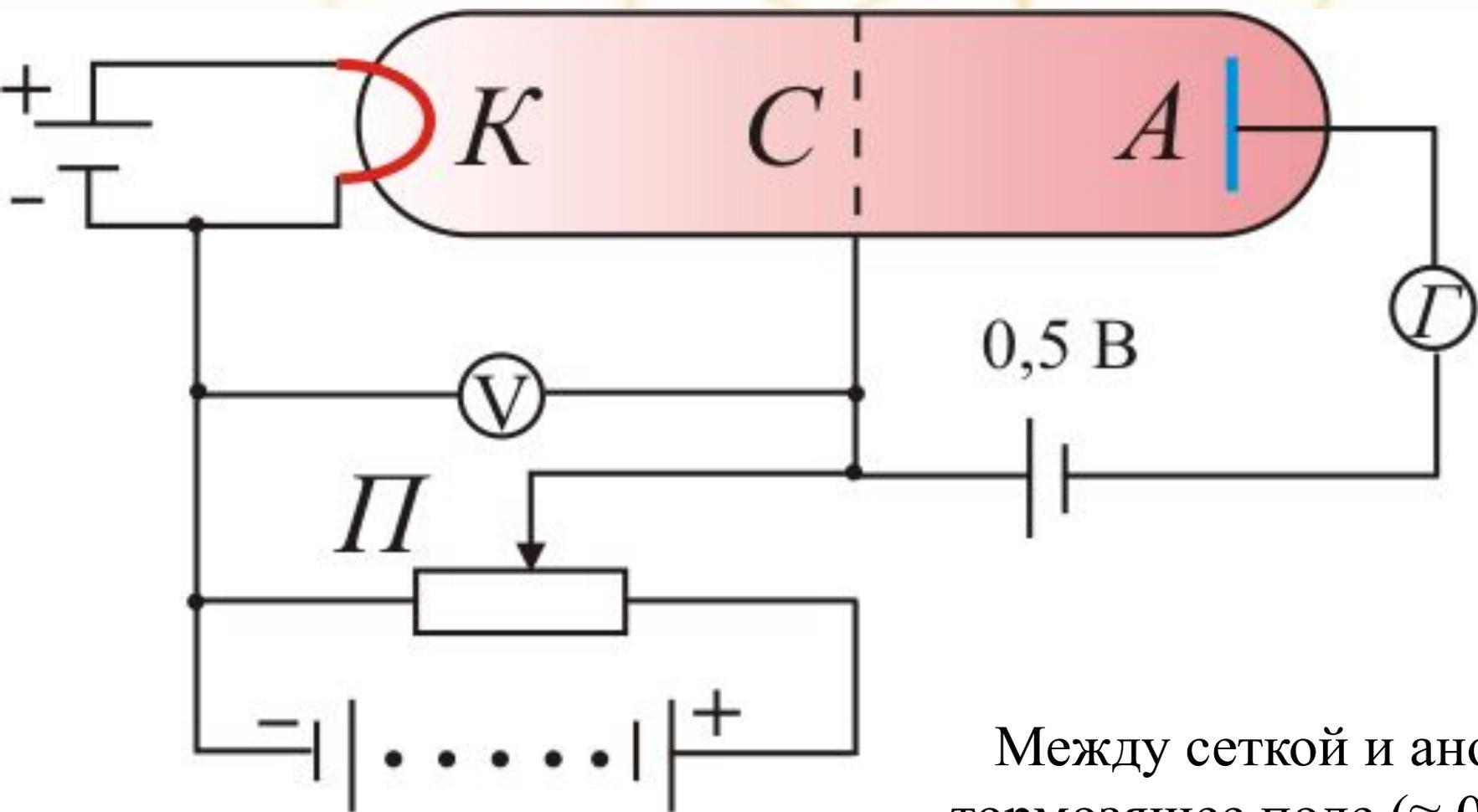


## 4. Опыт Франка и Герца

Существование дискретных энергетических уровней атома и доказательство правильности теории Бора подтверждается опытом Франка и Герца.

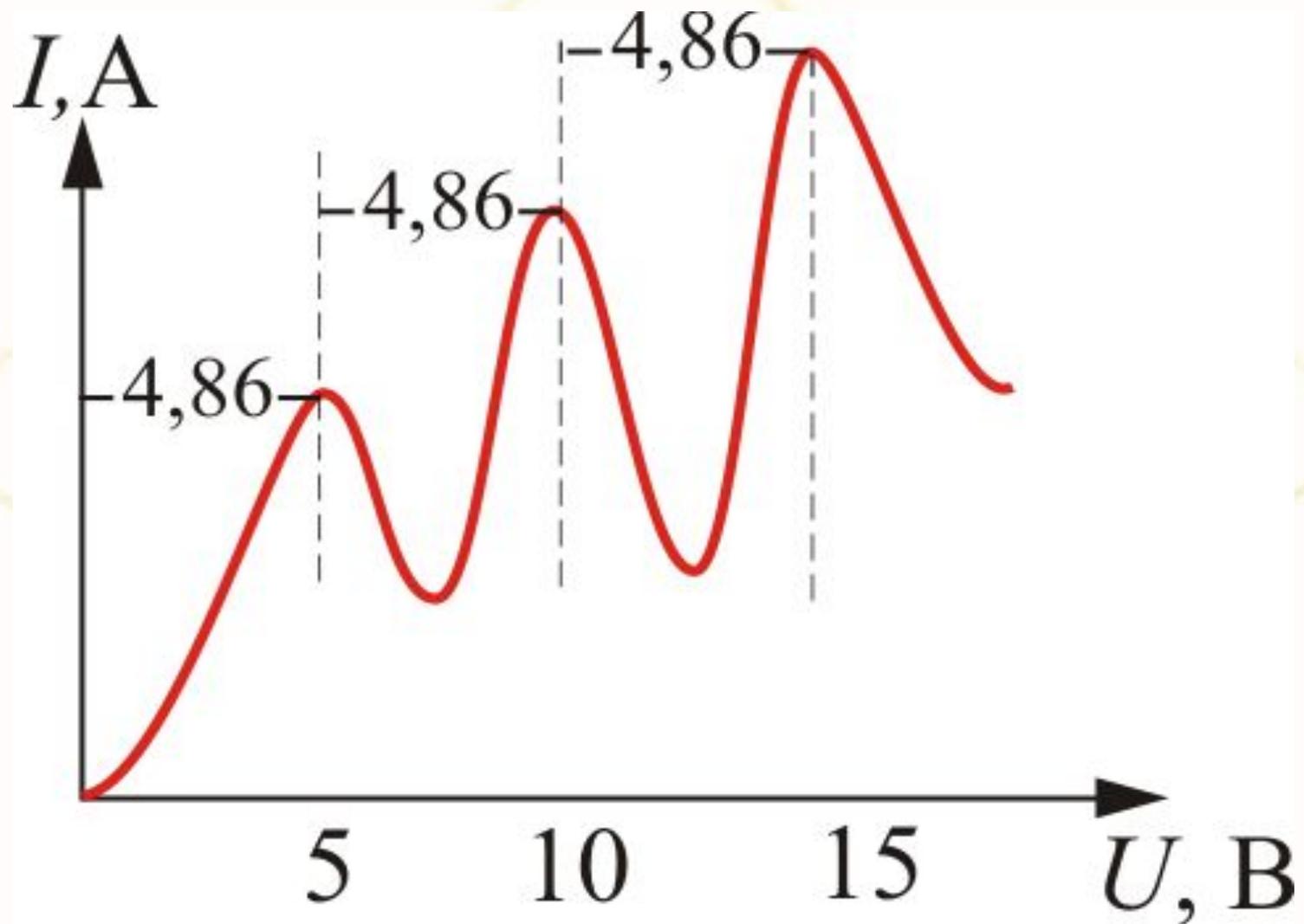
Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц, за экспериментальные исследования дискретности энергетического уровня получили Нобелевскую премию в 1925 г.

В трубке, заполненной парами ртути при давлении  $p \approx 1$  мм рт. ст., три электрода, катод – сетка – анод. Электроны ускорялись разностью потенциалов  $U$  между катодом и сеткой.

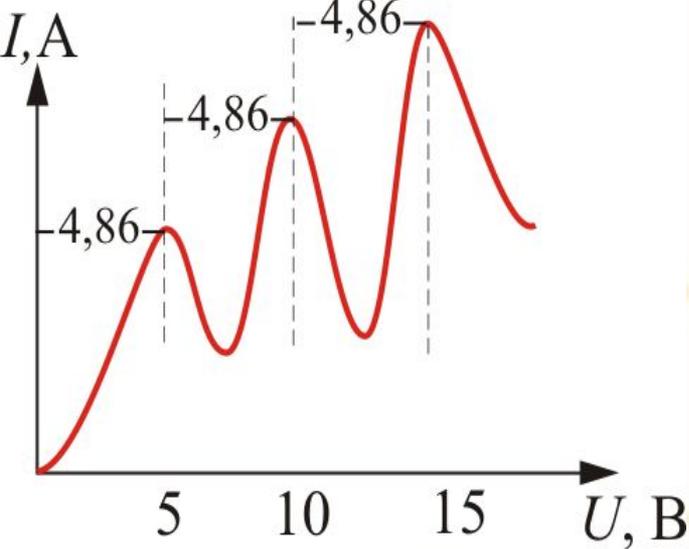


Между сеткой и анодом тормозящее поле ( $\approx 0,5\text{В}$ )

Зависимость тока через гальванометр ( $\Gamma$ ) от разности потенциалов между катодом и сеткой ( $U$ ):



$U = 4,86$  – соответствует 1-му потенциалу возбуждения



- при увеличении  $U$  вплоть до 4,86В ток  $I$  возрастает монотонно,
- при  $U = 4,86$ В ток максимален, затем резко уменьшается и возрастает вновь.
- дальнейшие максимумы тока наблюдаются при  $U = 2 \cdot 4.86$  В,  $3 \cdot 4.86$  В...

Такой ход кривой объясняется тем, что вследствие дискретности энергетических уровней атомы ртути могут воспринимать энергию бомбардирующих электронов только порциями:

$$\Delta E_1 = E_2 - E_1 \quad \text{либо} \quad \Delta E_2 = E_3 - E_2 \dots$$

$E_1, E_2, E_3 \dots$  - энергии 1-го, 2-го и т.д. стационарных состояний.

При  $U < 4,86\text{В}$  энергия электронов меньше  $\Delta E_1$ ; соударения между электронами и атомами ртути носят **упругий характер**.

При  $U = 4,86\text{В}$  энергия электрона становится достаточной, чтобы вызвать **неупругий удар**, при котором **электрон отдает атому ртути энергию  $\Delta E_1$**  и продолжает двигаться с меньшей скоростью;

- число электронов, достигающих А, резко уменьшается и ток падает
- **атом ртути переходит в возбужденное состояние.**

При  $U$ , кратном  $4,86\text{ В}$  электроны могут испытывать с атомами ртути 2, 3, ... неупругих соударения, теряя при этом полностью свою энергию.

- **анодный ток каждый раз резко уменьшается.**

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию  $\Delta E_1$  и перешедшие в возбужденное состояние, спустя время  $\sim 10^{-8}$  с должны вернуться в основное состояние, излучая, согласно второму постулату Бора фотон с частотой (правило частот):

$$\nu = \frac{\Delta E_1}{h}$$

При этом длина волны светового кванта:

$$\lambda = hc / \Delta E \approx 255 \text{ нм}$$

- что соответствует ультрафиолетовому излучению.

Опыт действительно обнаруживает **ультрафиолетовую**  
**линию** с  $\lambda \approx 255 \text{ нм}$

Таким образом, **опыты Франка и Герца экспериментально подтвердили не только первый, но и второй постулат Бора.**

Эти опыты сыграли огромное значение в развитии атомной физики.

