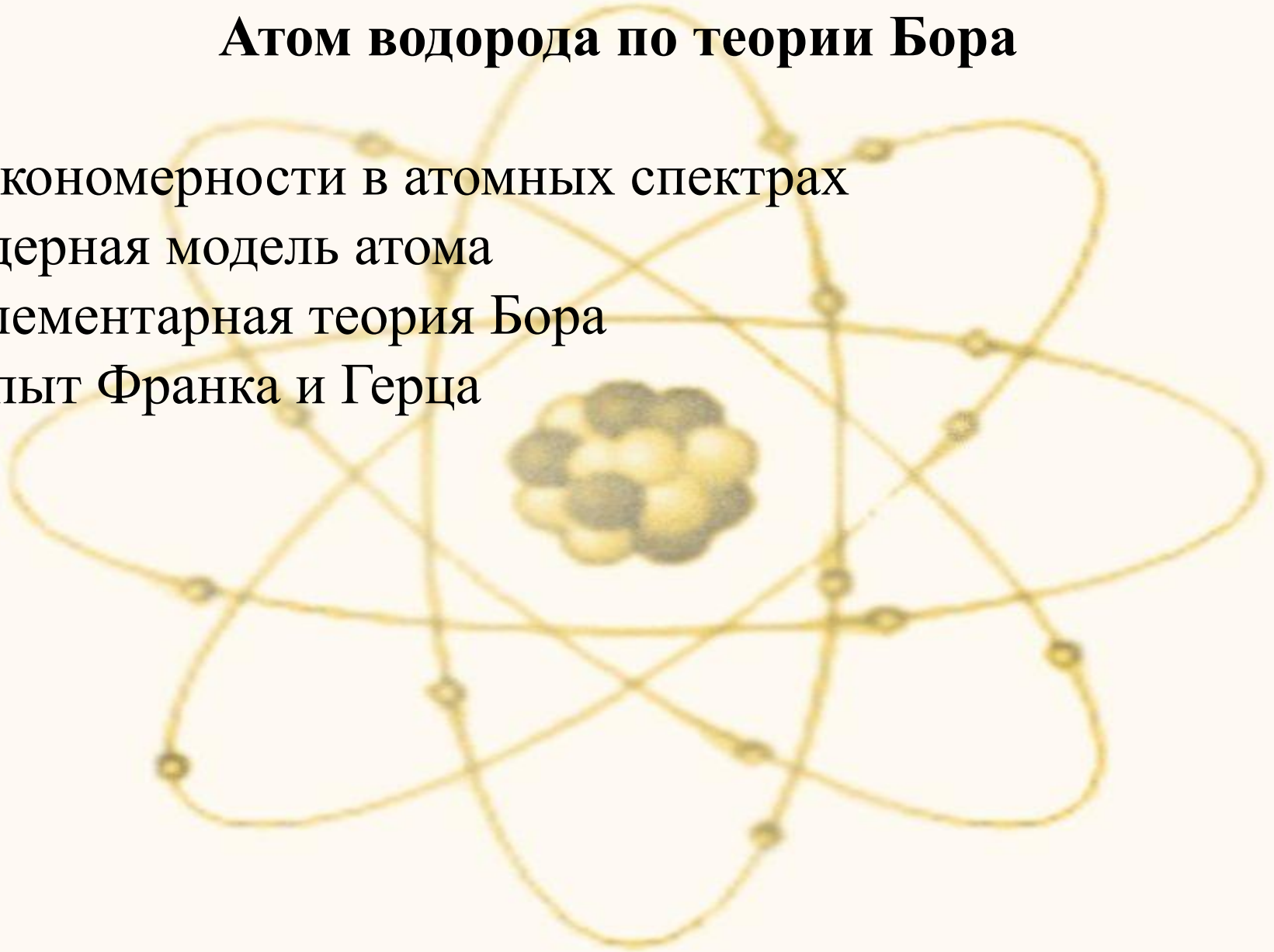


Модели атомов.

Атом водорода по теории Бора

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

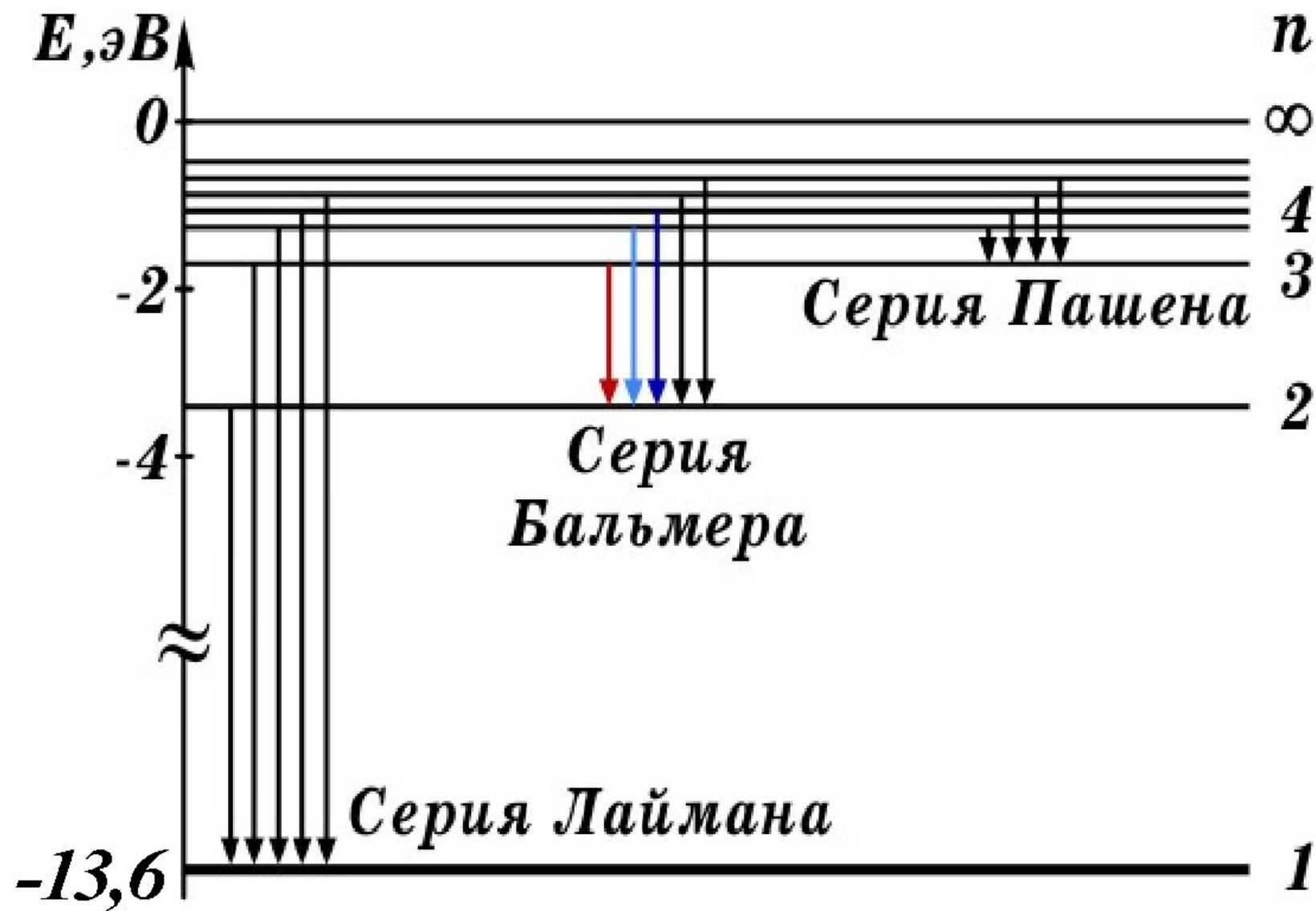


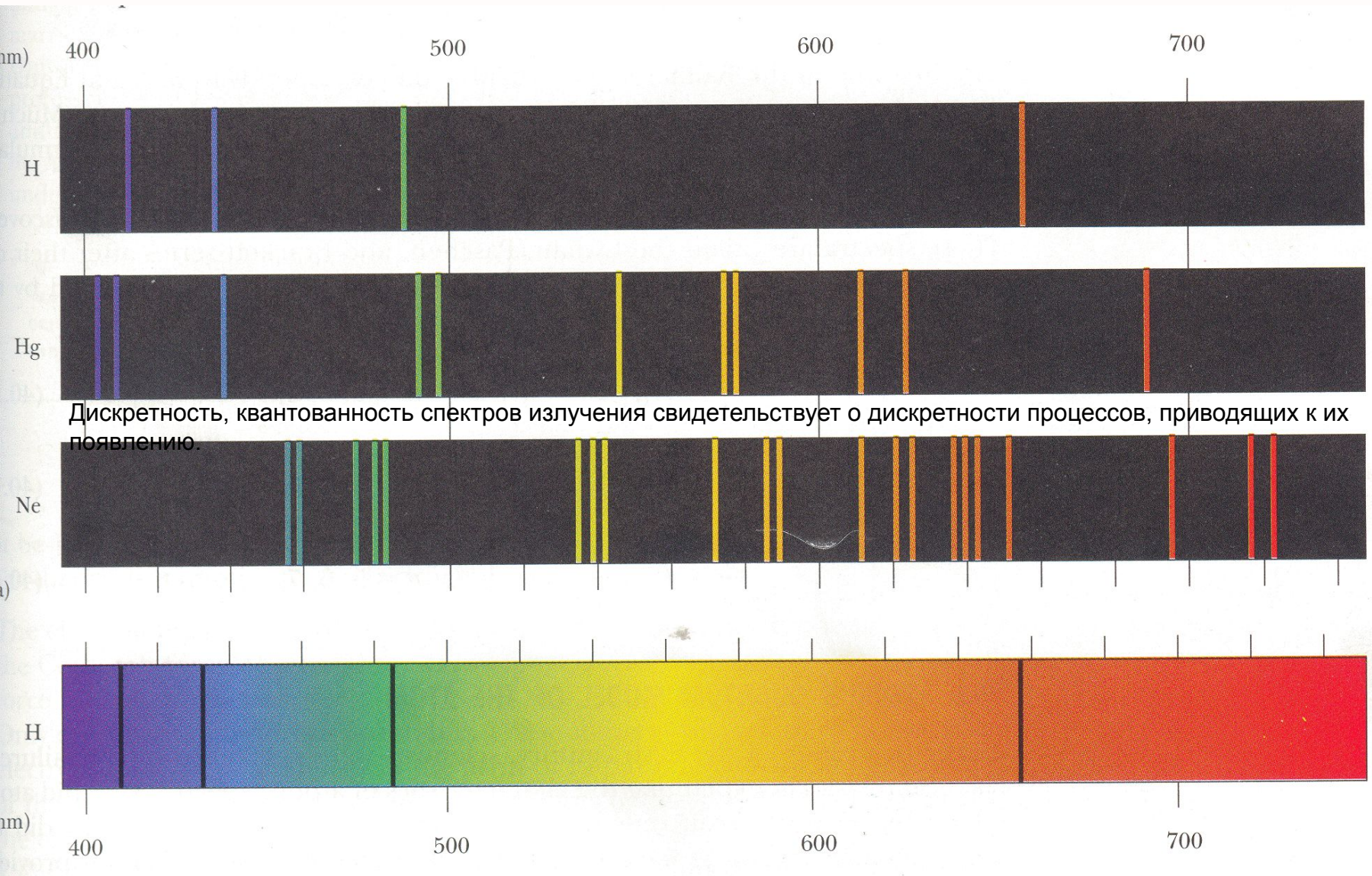
1. Закономерности в атомных спектрах.

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.





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 $R = R' \cdot c$.

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

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 | $\nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 6, 7, 8, \dots$ |

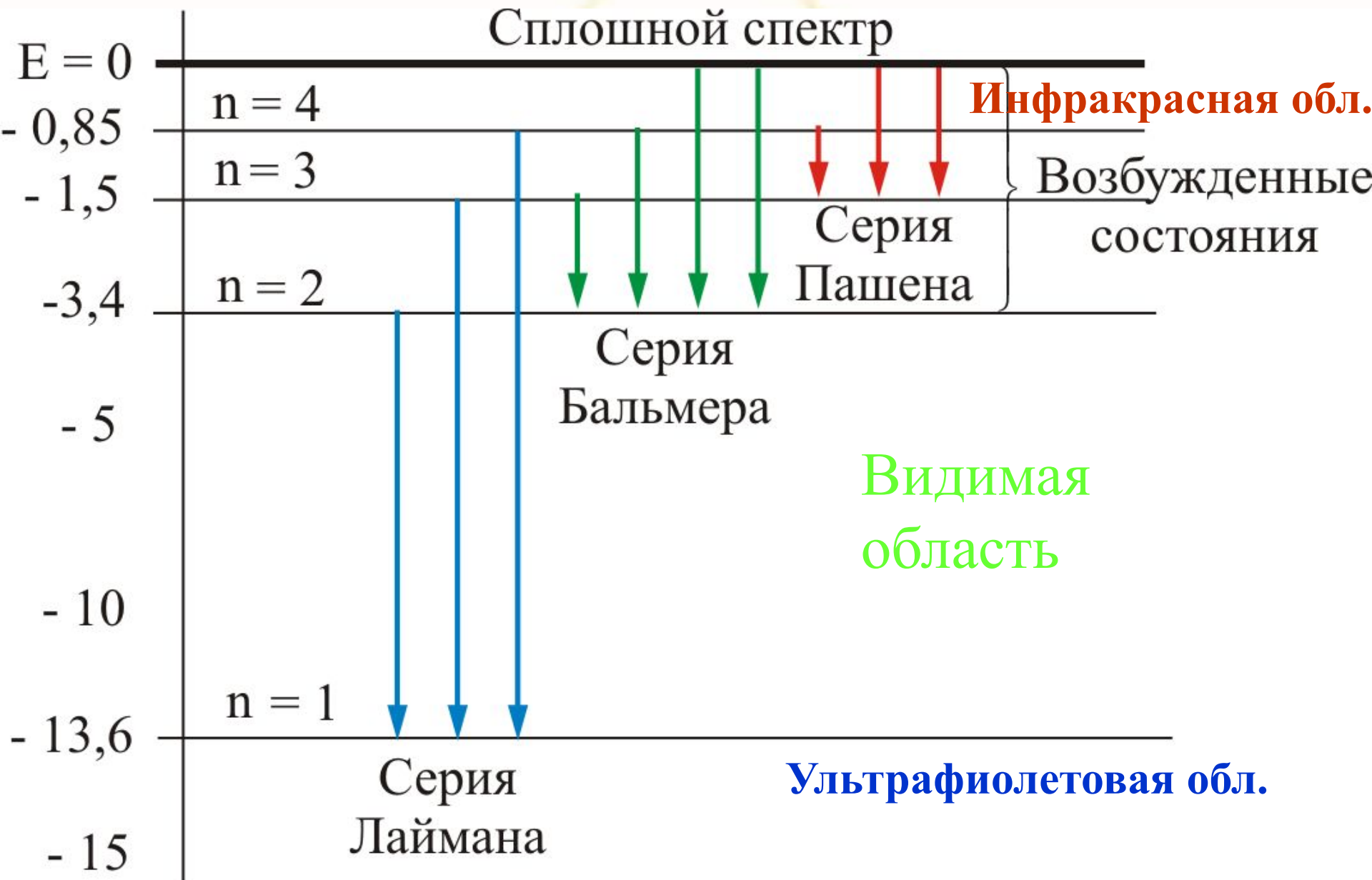
Обобщенная формула Й. Бальмера

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

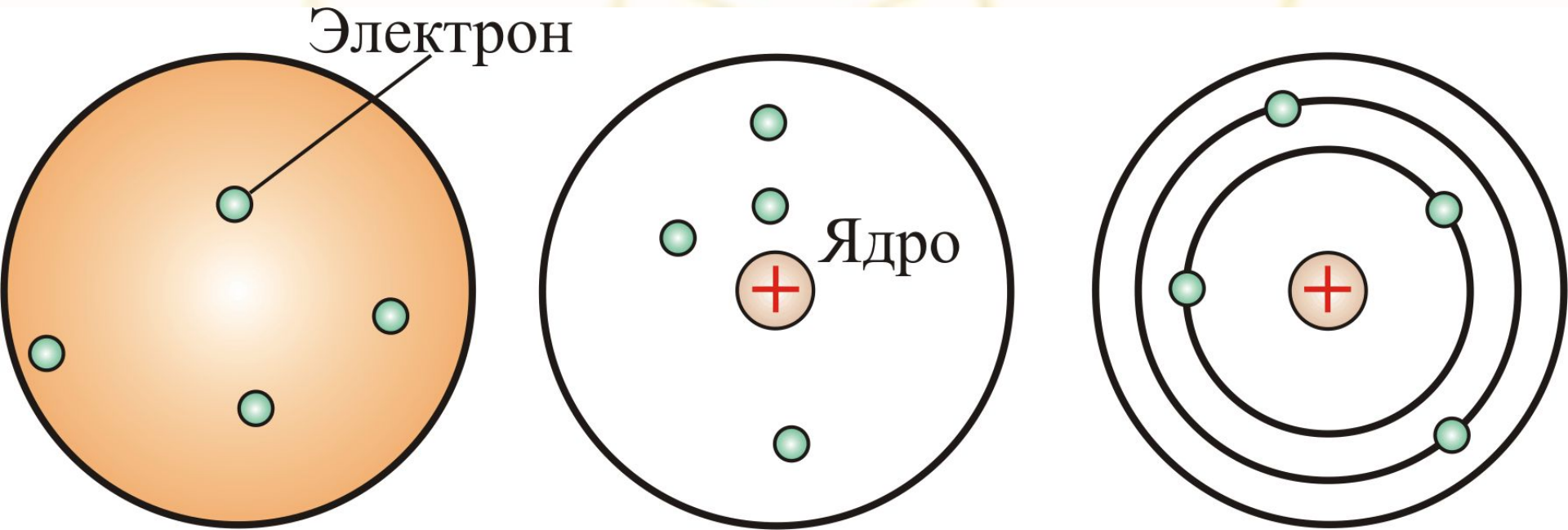
или

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

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



Модели атомов



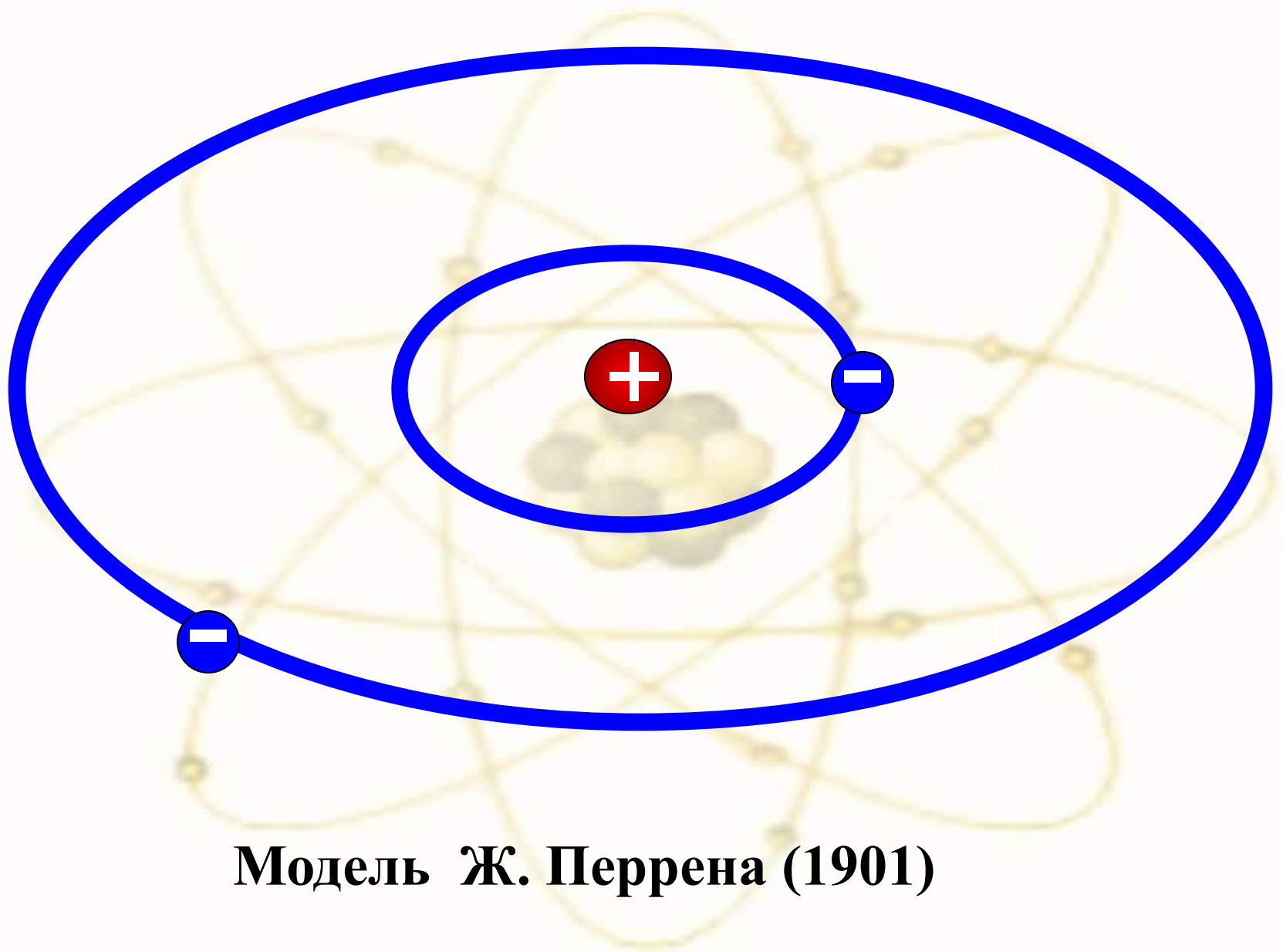
1895г. - открытие X-лучей Рентгеном

1896г. - открытие радиоактивности Беккерелем

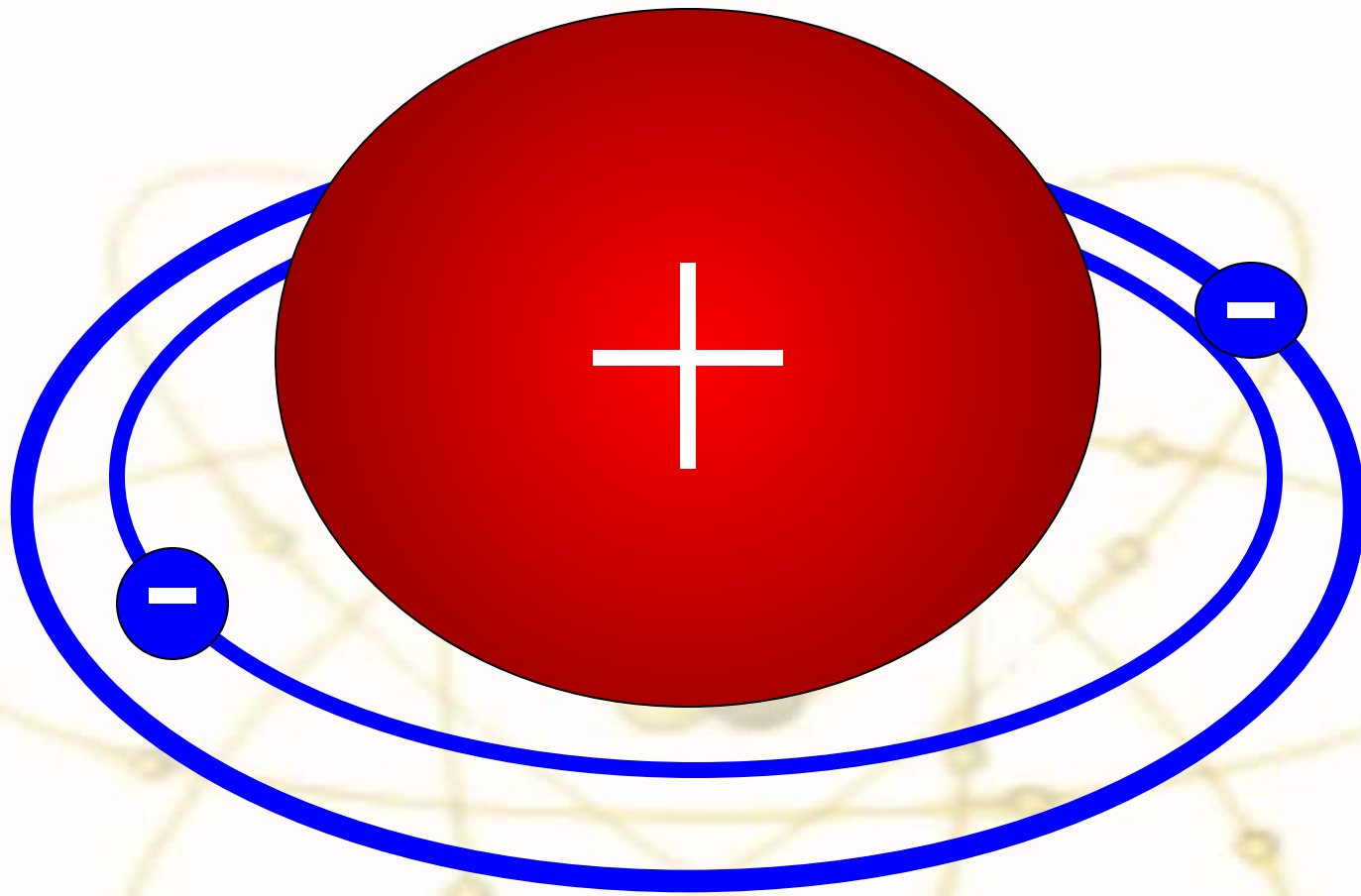
1897г. - открытие электрона (Дж.Томсон определил величину отношения q/m)

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

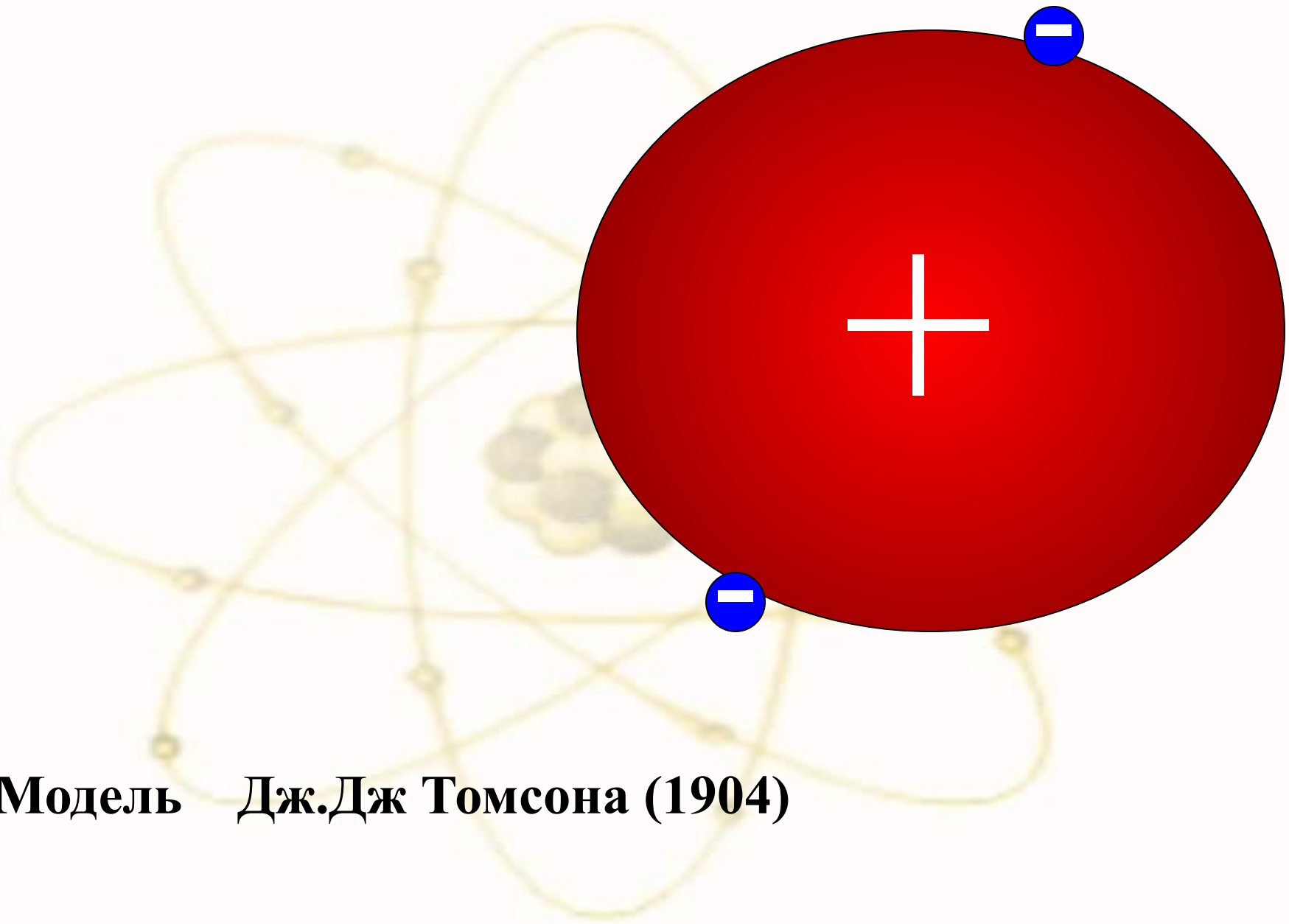




Модель Ж. Перрена (1901)



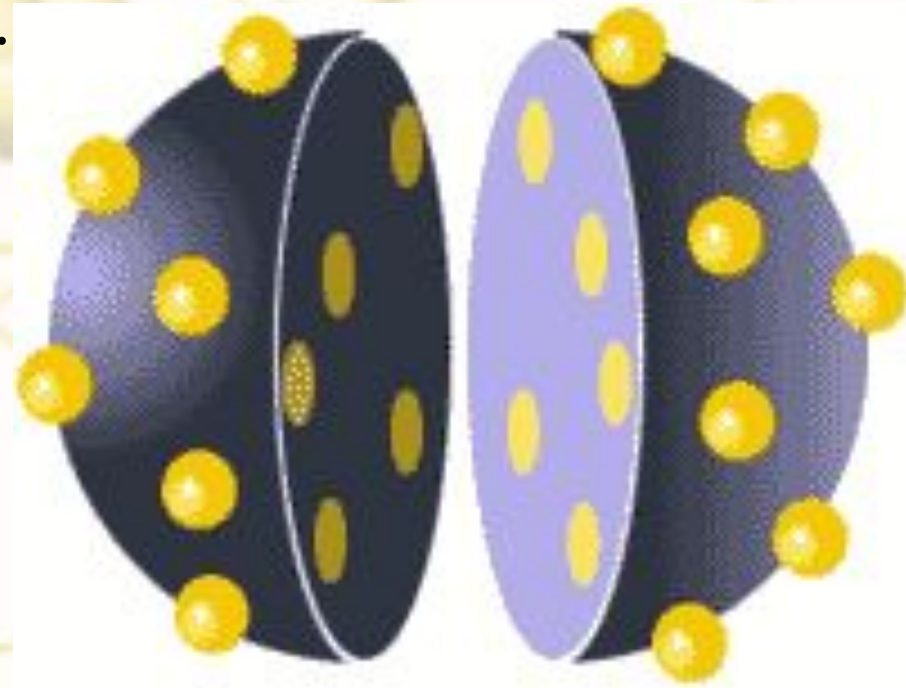
Модель Х. Нагаока (1904)



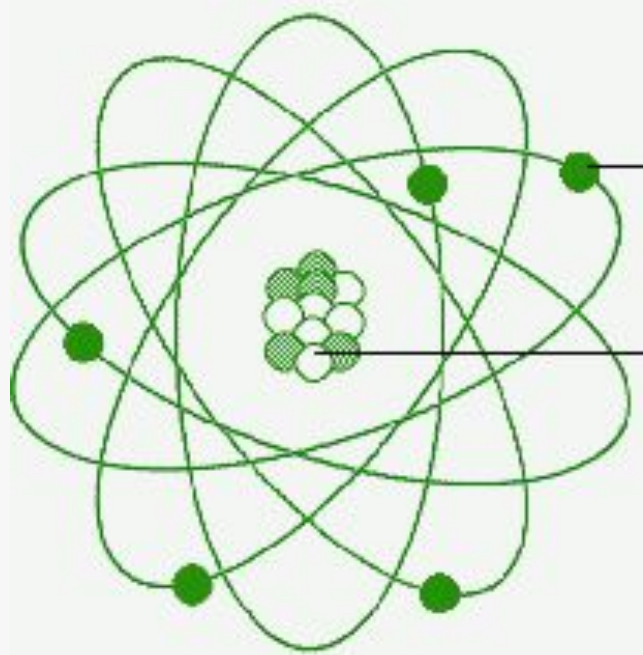
Модель Дж.Дж Томсона (1904)

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.

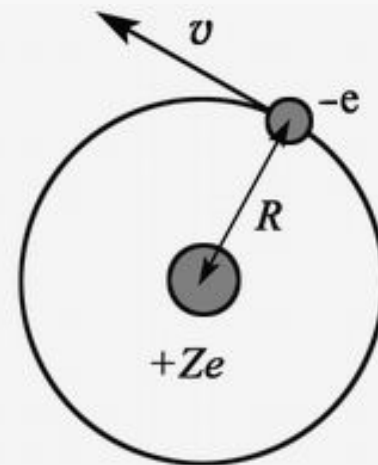
Теория такого атома давала, что спектр должен быть сложным, но никоим образом не линейчатым, что противоречило экспериментам.



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.

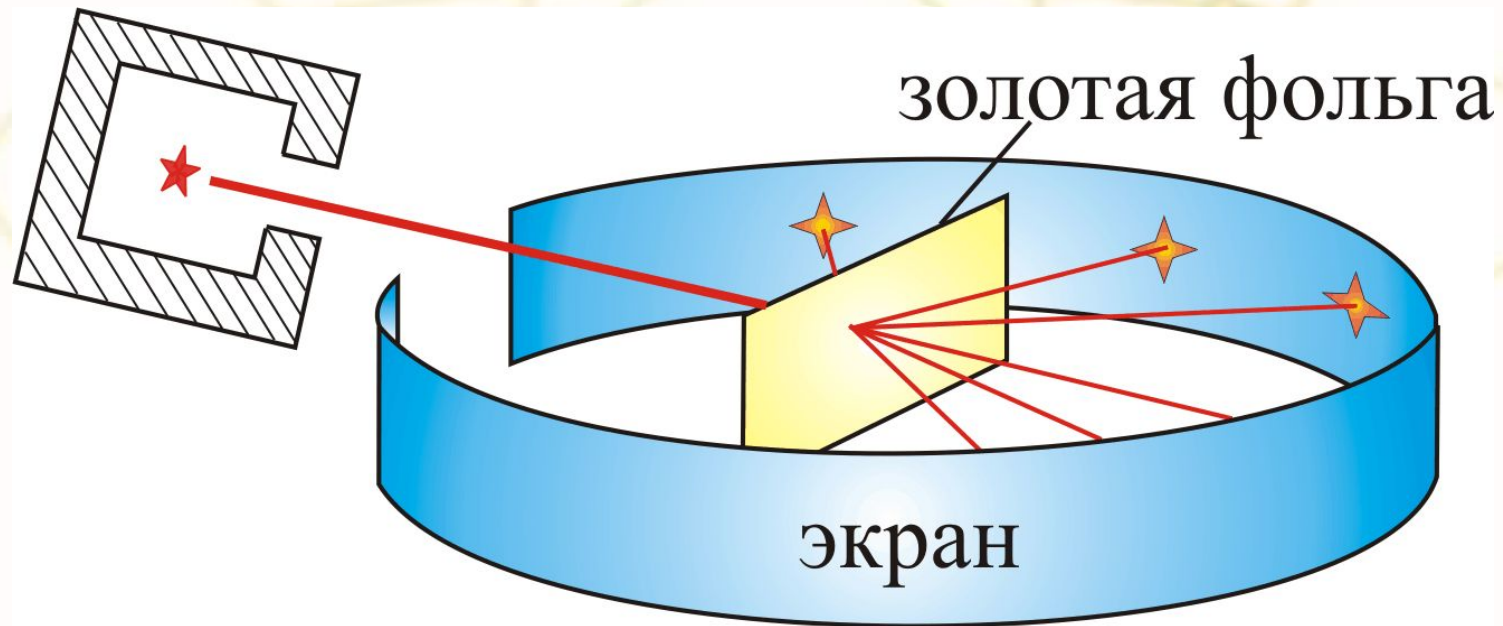
В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

2. Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

Скорость α – частиц = 10^7 м/с = 10^4 км/сек.

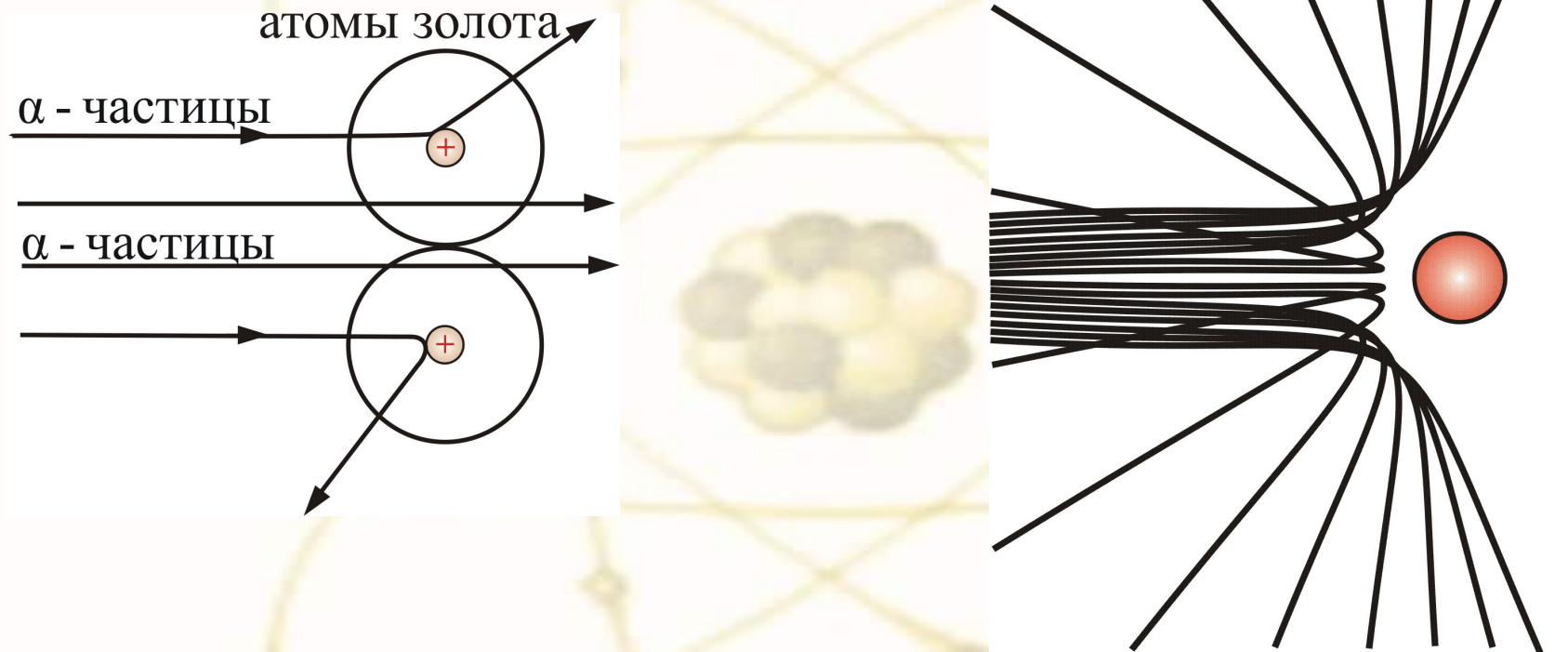
α – частица имеет положительный заряд равный $+2e$.

Схема опыта Резерфорда



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

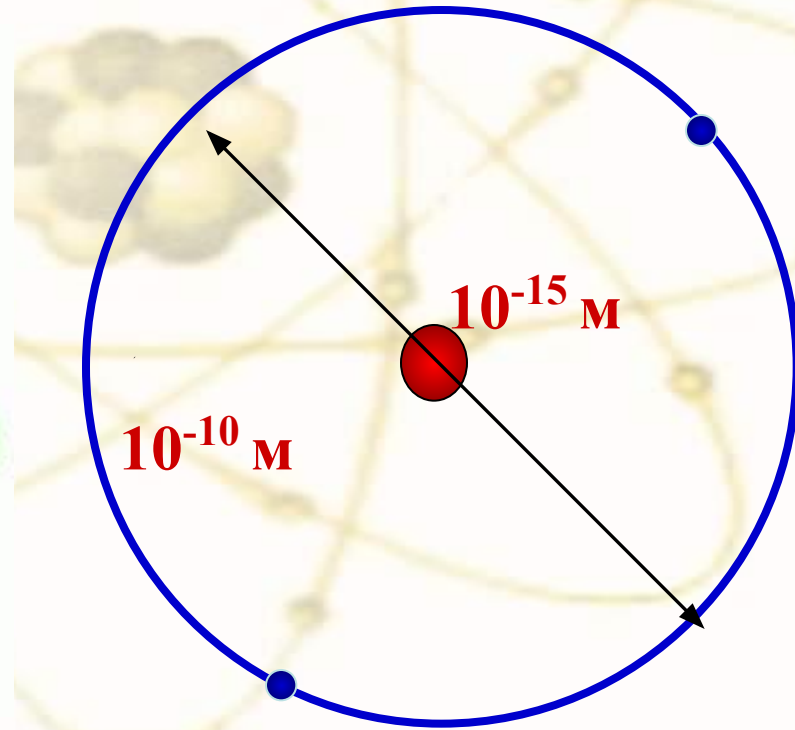
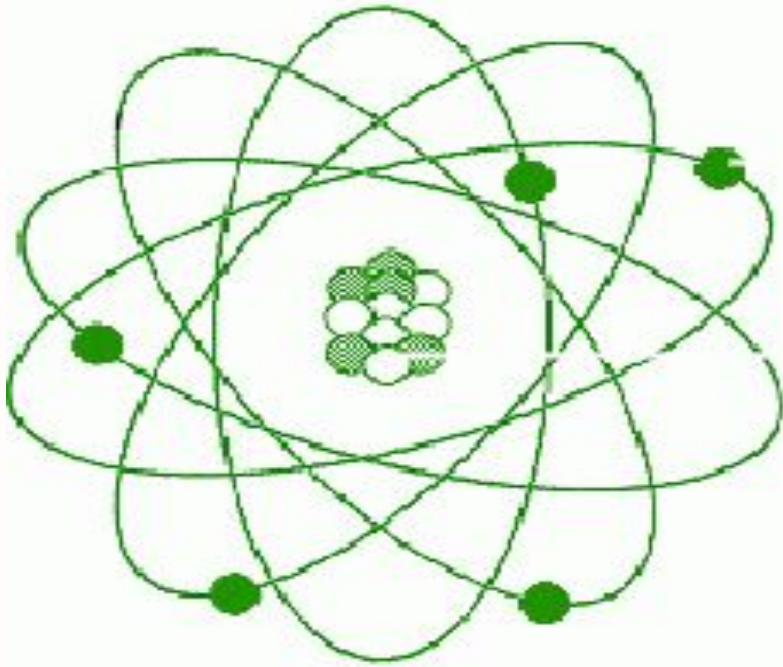
Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3°
Отдельные α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)



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

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

99,95% массы атома сосредоточено в ядре.



Движение α -частицы происходит **по гиперболе**:



Угол рассеяния равен углу между асимптотами гиперболы

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

m – масса α -частицы,

v – ее скорость вдали от ядра;

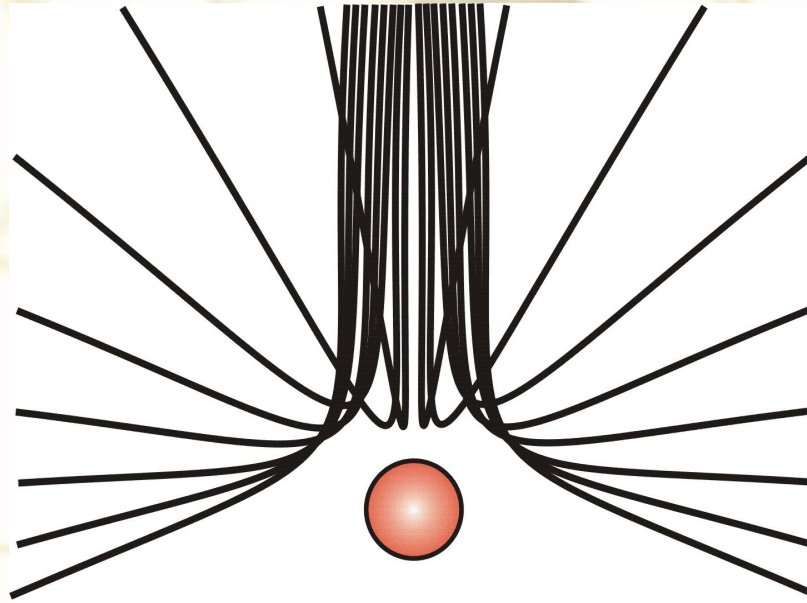
Ze – заряд ядра;

b – **прицельный параметр**.

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

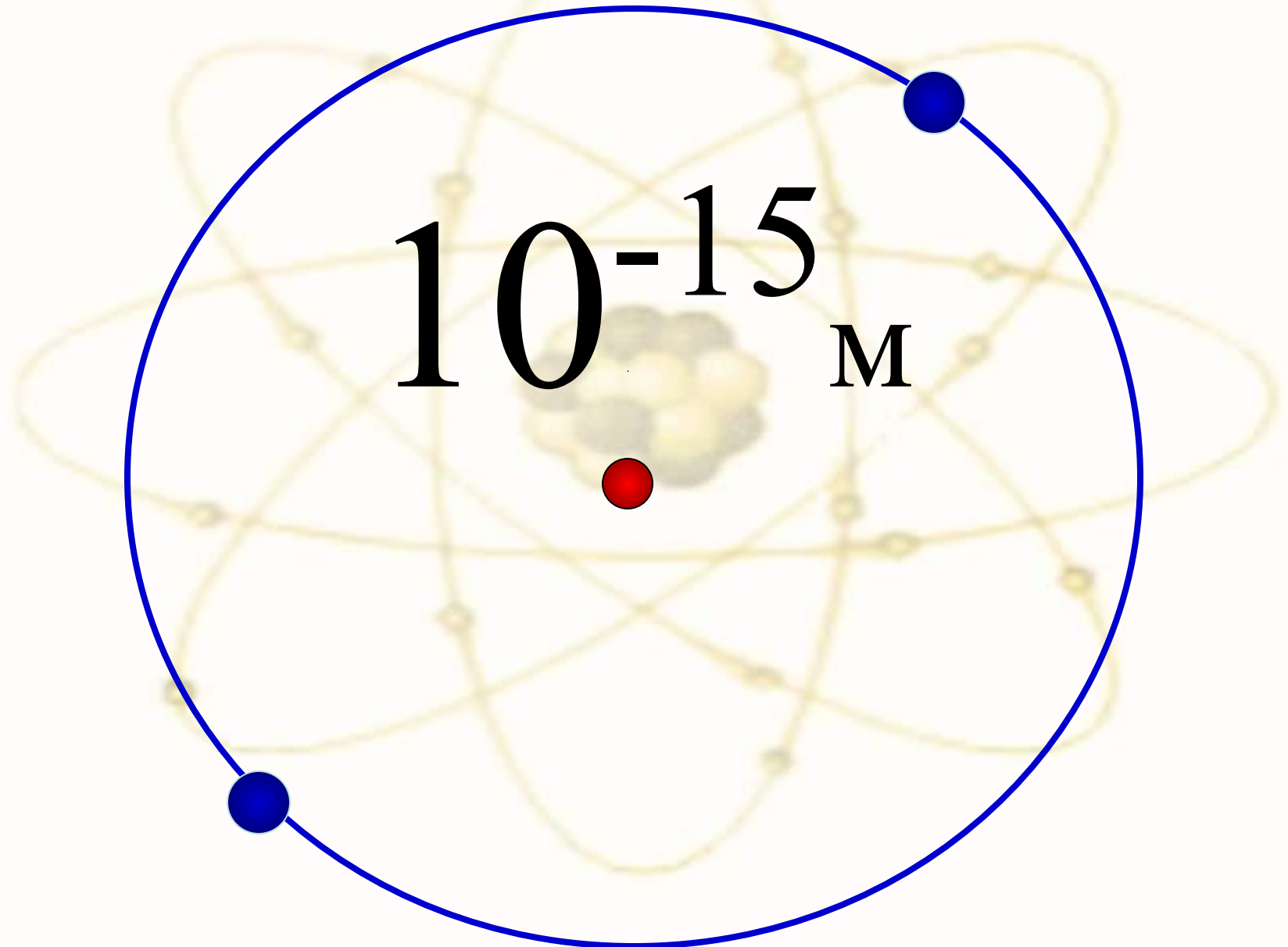
$$d\sigma = \left(\frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}$$

- формула Резерфорда

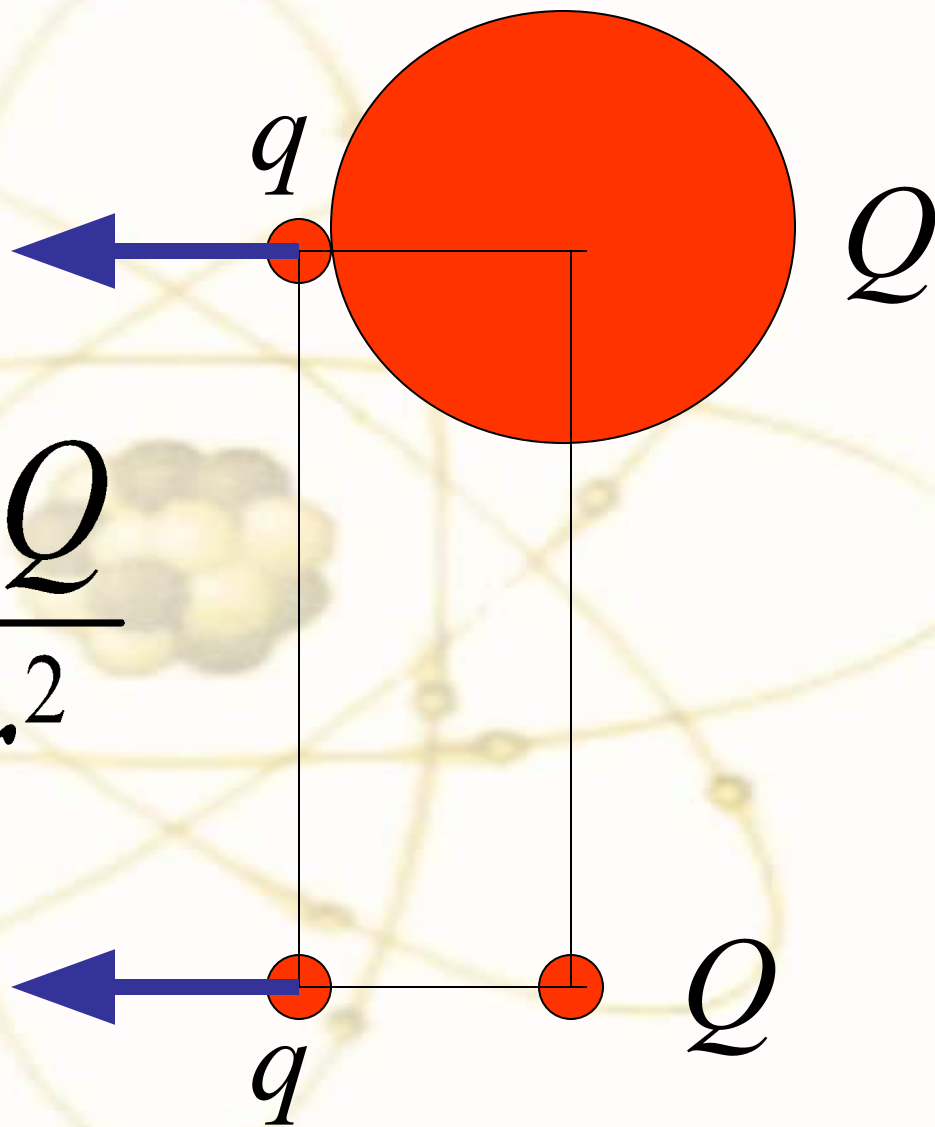


Частицы с разными прицельными параметрами отклоняются на разные углы.

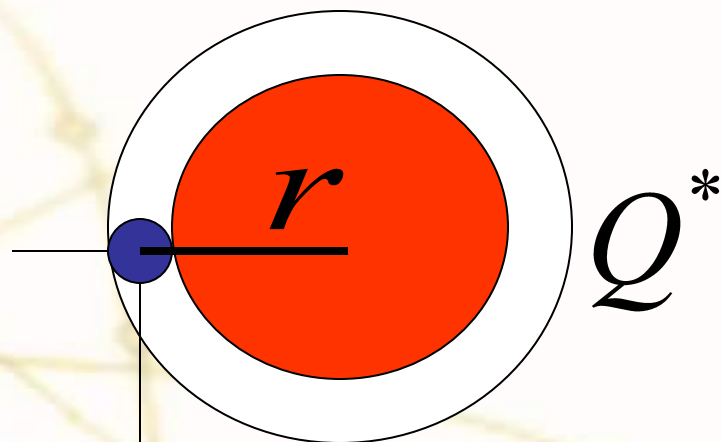
Радиус ядра $R \approx (10^{-14} \div 10^{-15})$ м и зависит от числа нуклонов в ядре.



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

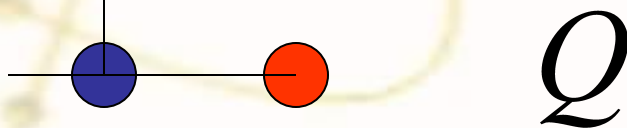


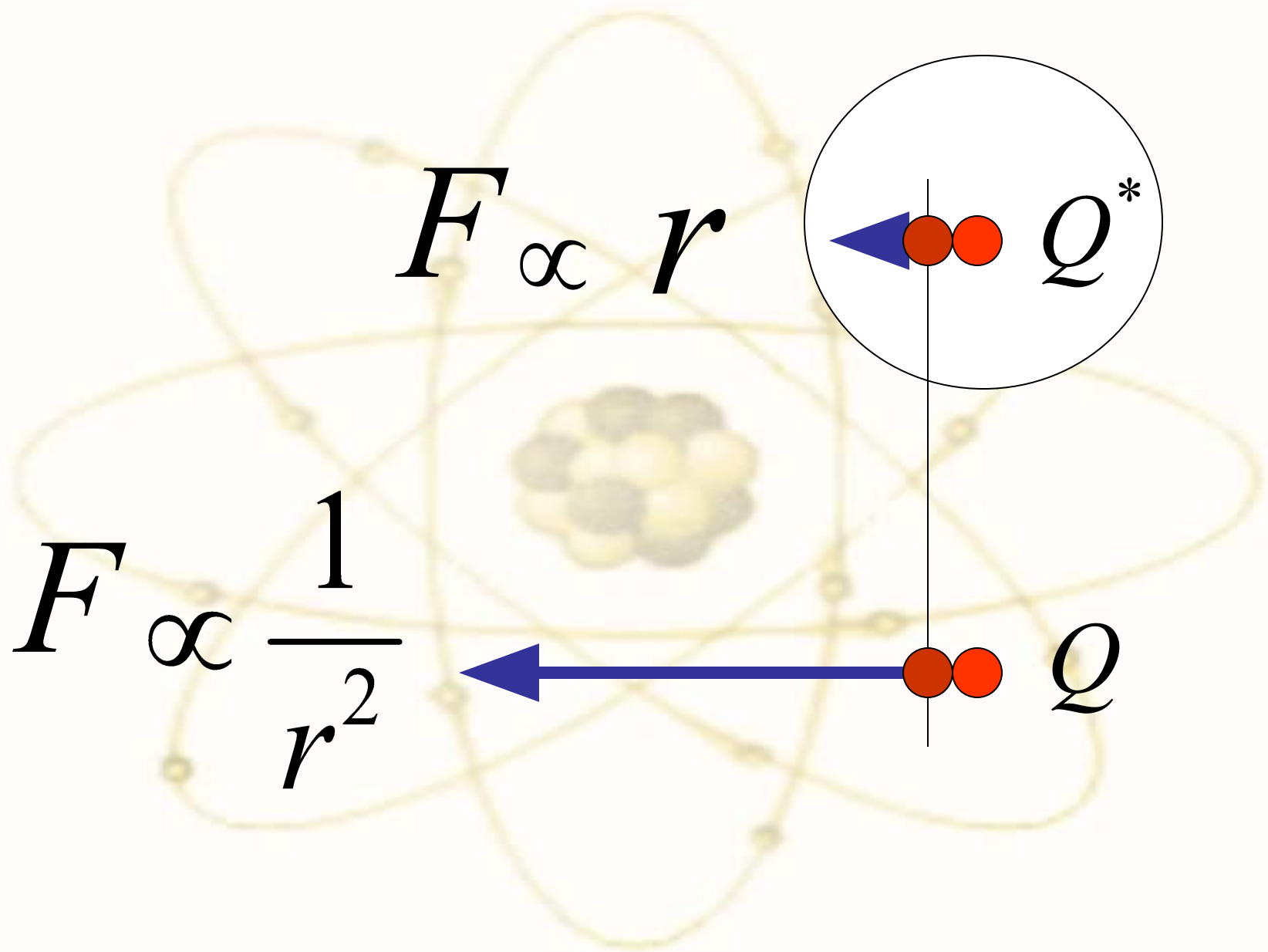
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ^*}{r^2} \propto r$$



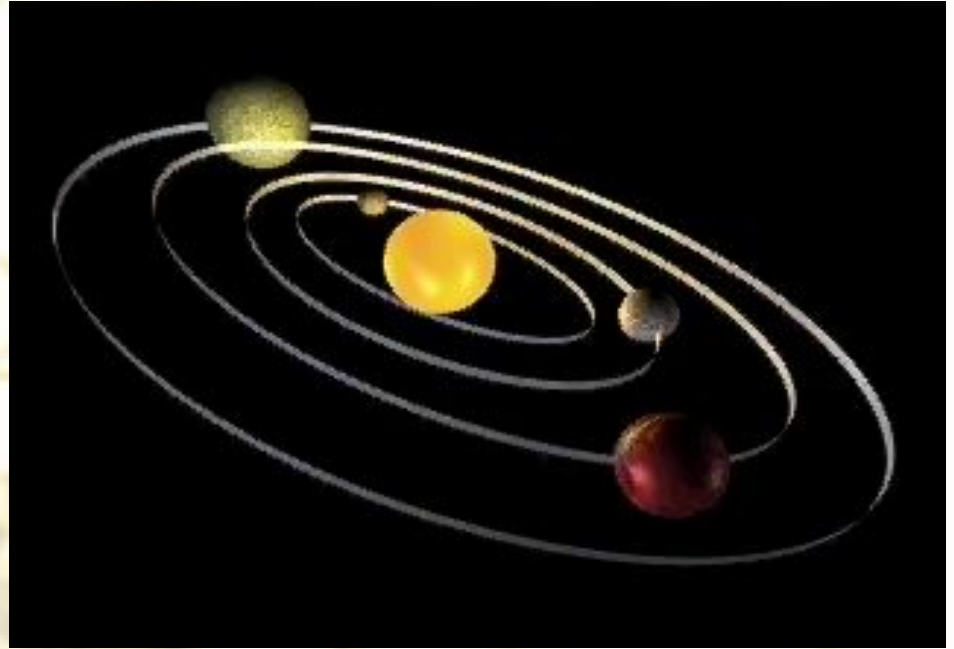
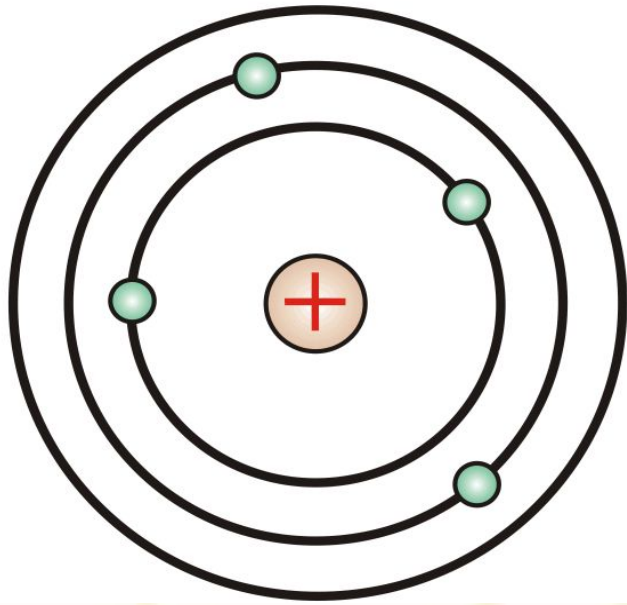
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

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





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)

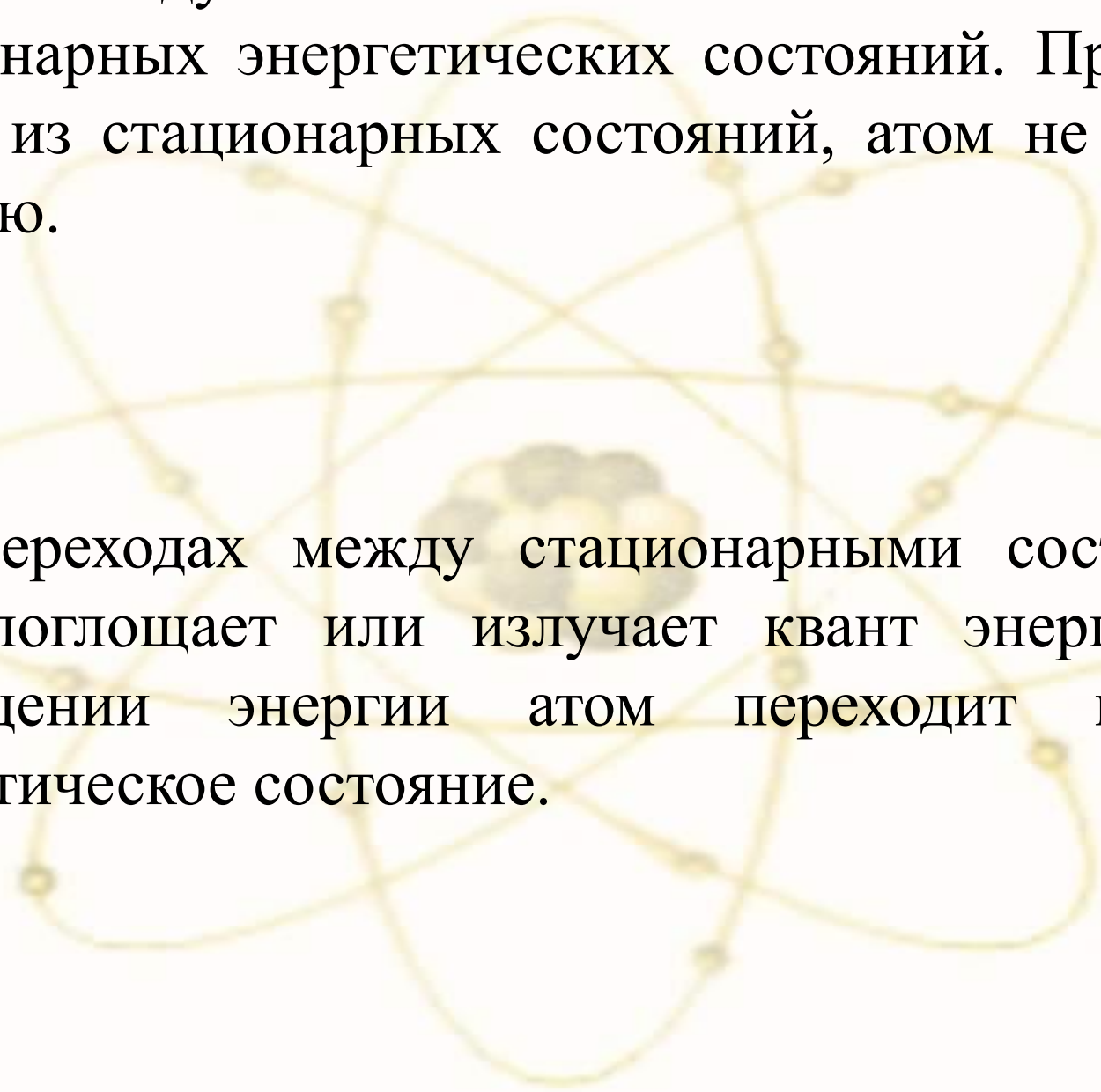
датский физик-теоретик, один из создателей современной физики.

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.

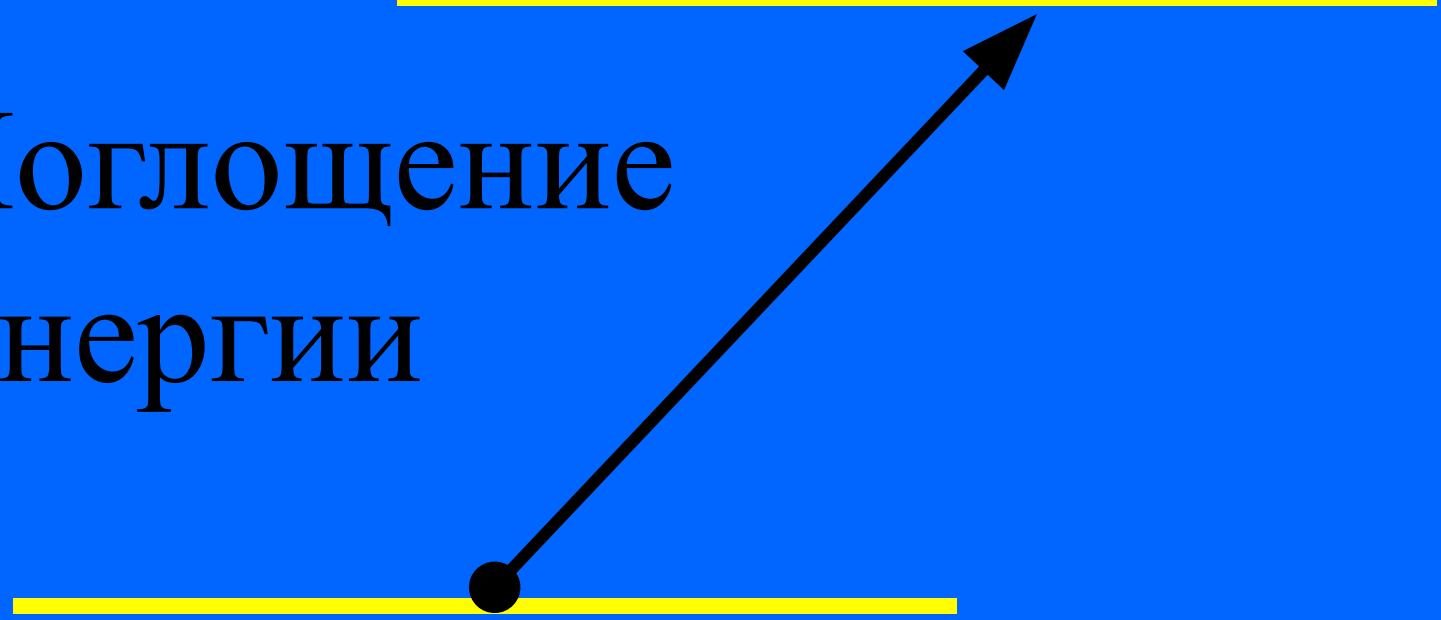
1. Атом следует описывать как «пирамиду» стационарных энергетических состояний. Пребывая в одном из стационарных состояний, атом не излучает энергию.

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

$$E_n$$

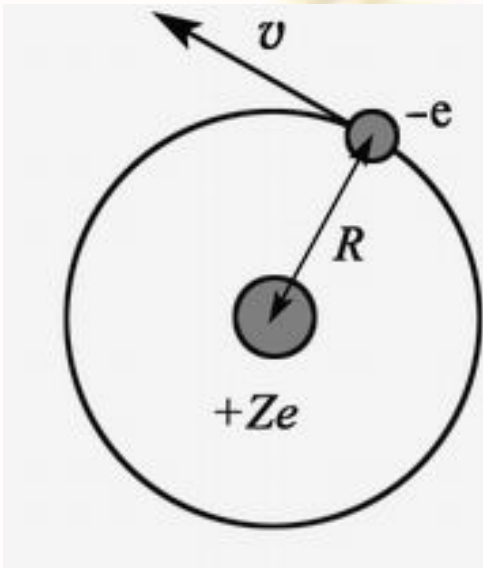


Постулаты Бора

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:**



$$m_e v r = n \hbar$$

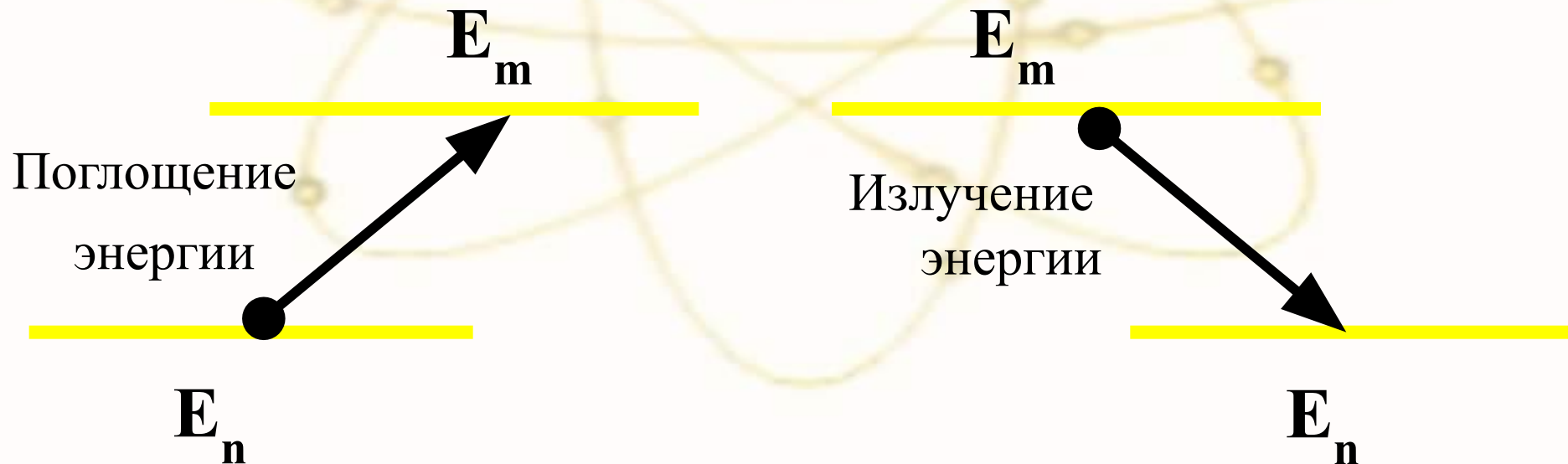
$n = 1, 2, 3, \dots$ главное квантовое число.

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

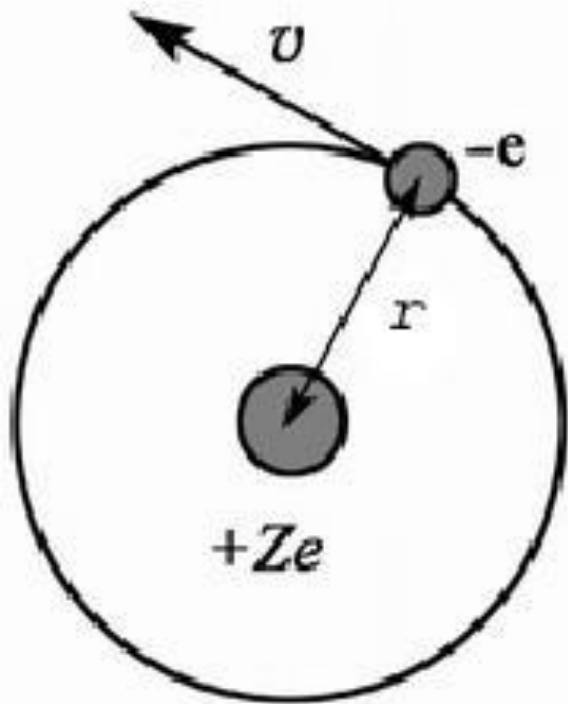
Энергия светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

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

m, n – номера состояний.



Уравнение движения электрона



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

$$m_e v r = n\hbar$$

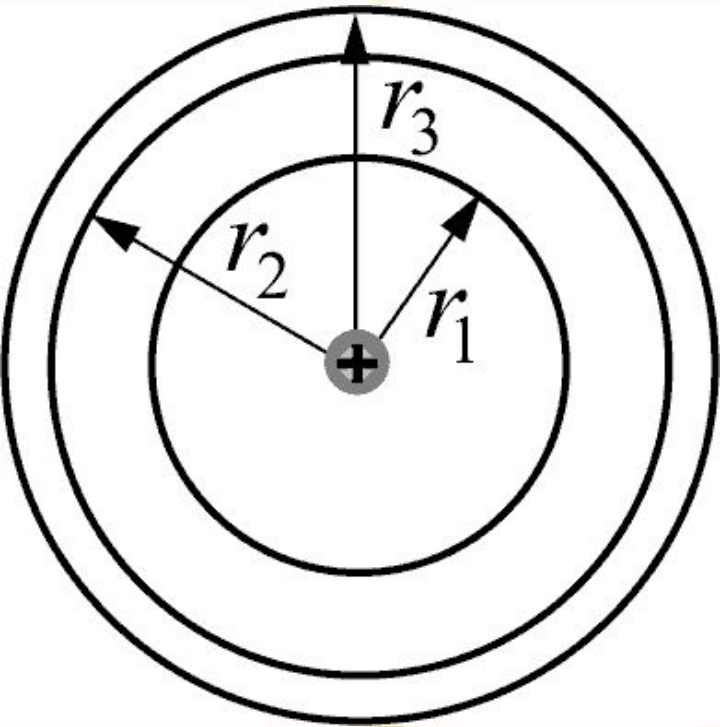
Радиус стационарных орбит:

\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:

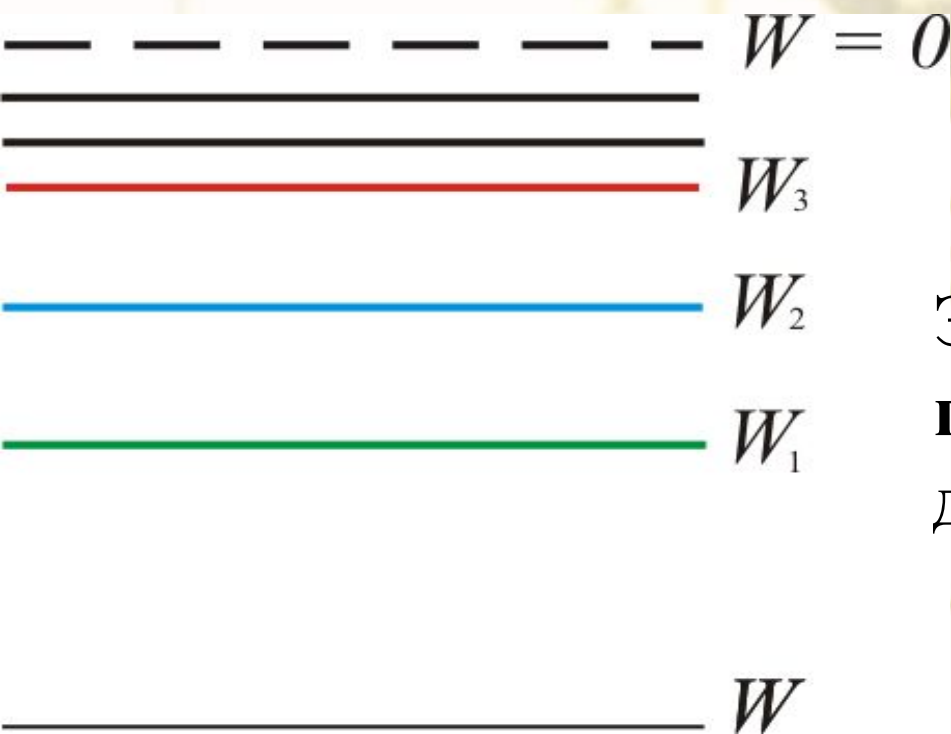


$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} =$$
$$= 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

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

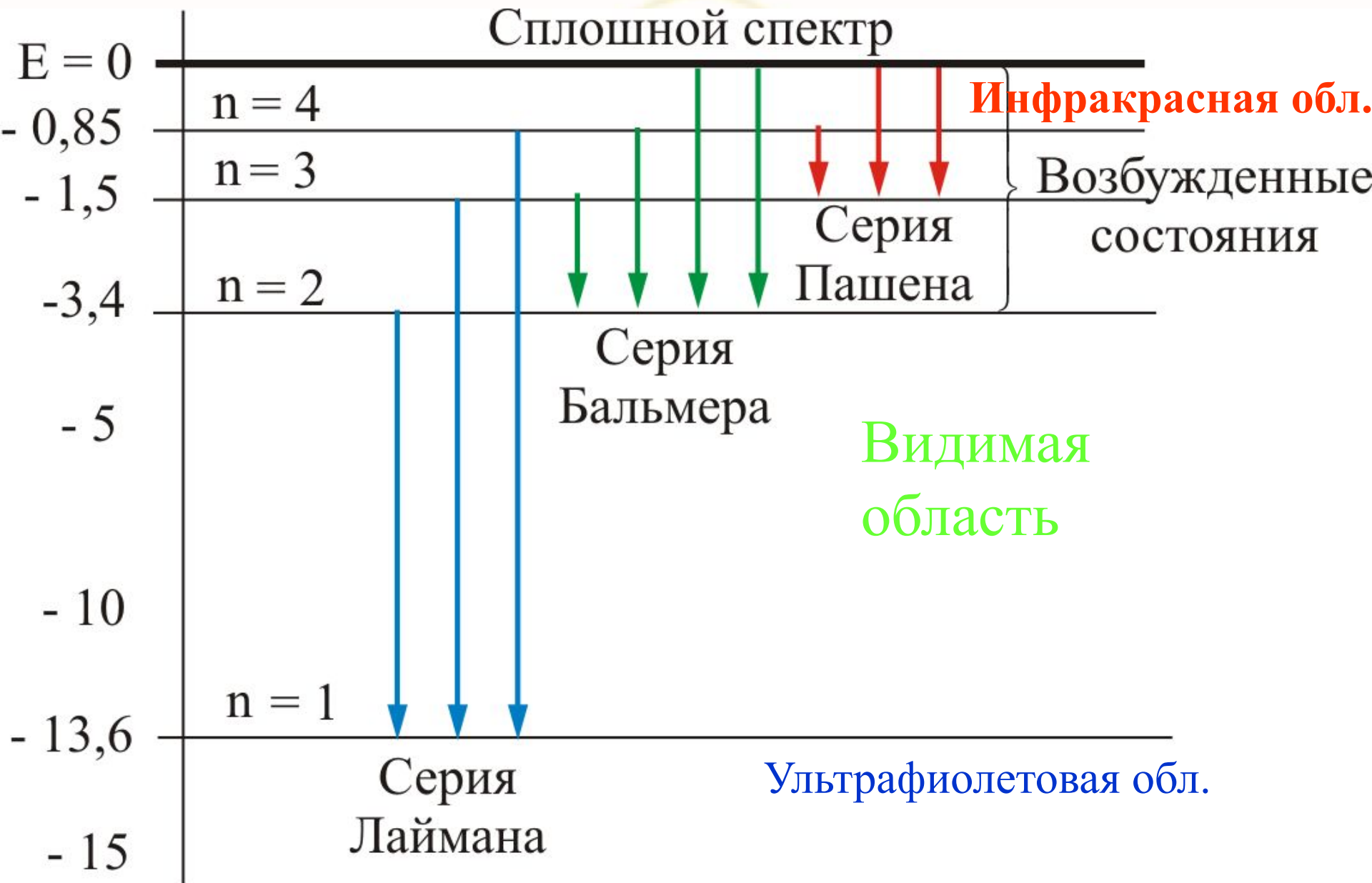
$$\frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

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

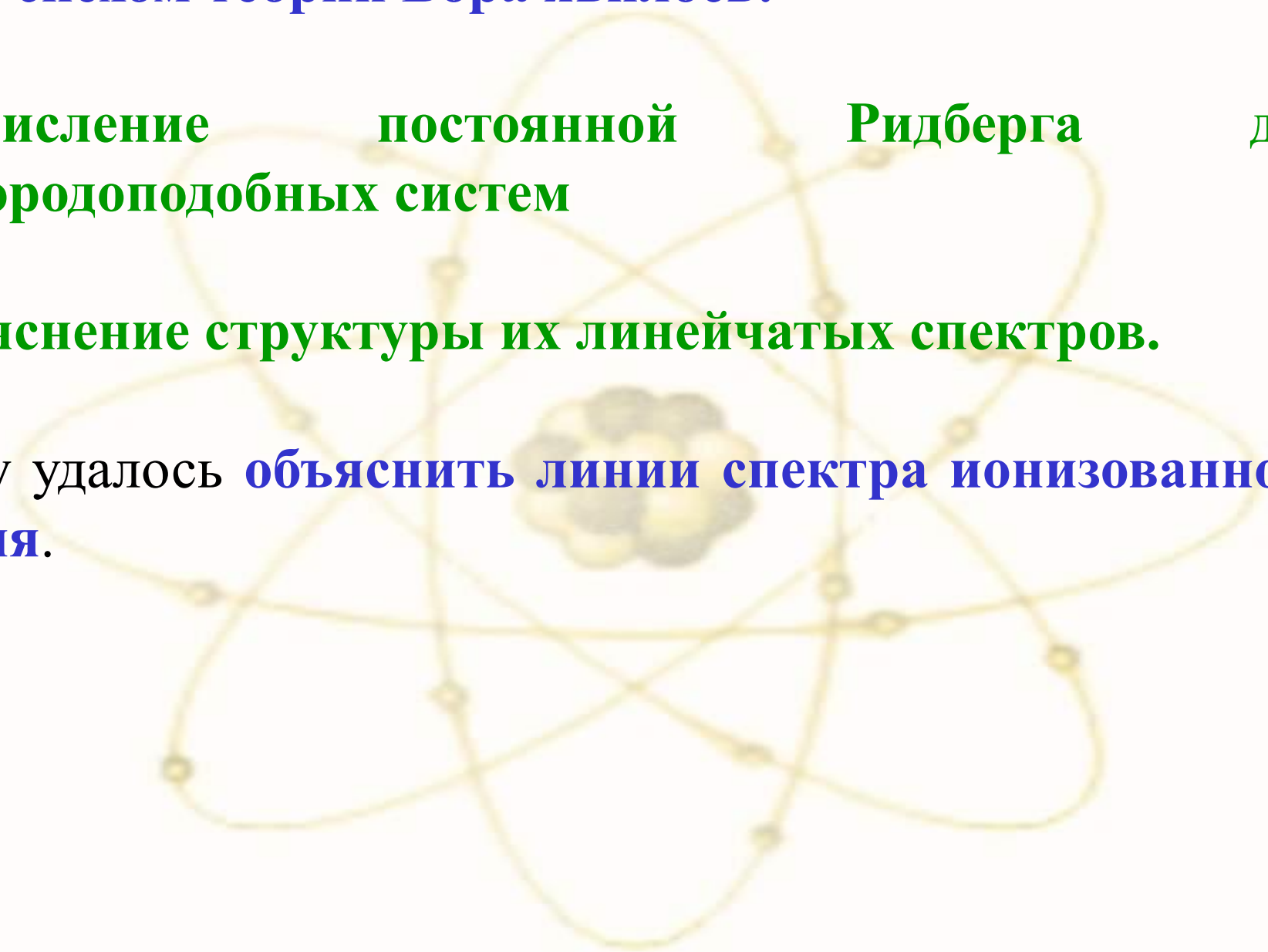
$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$$

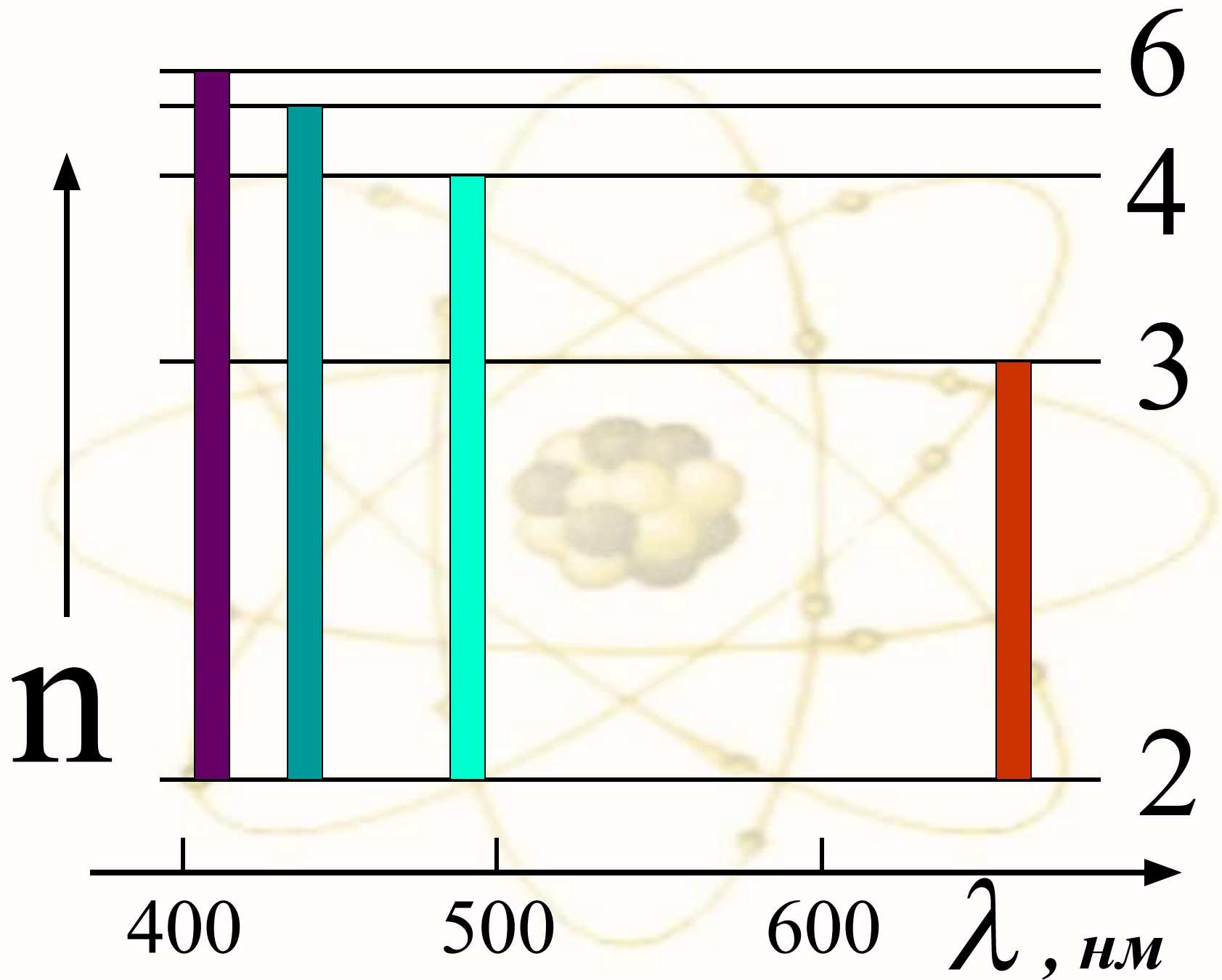
Успехом теории Бора явилось:

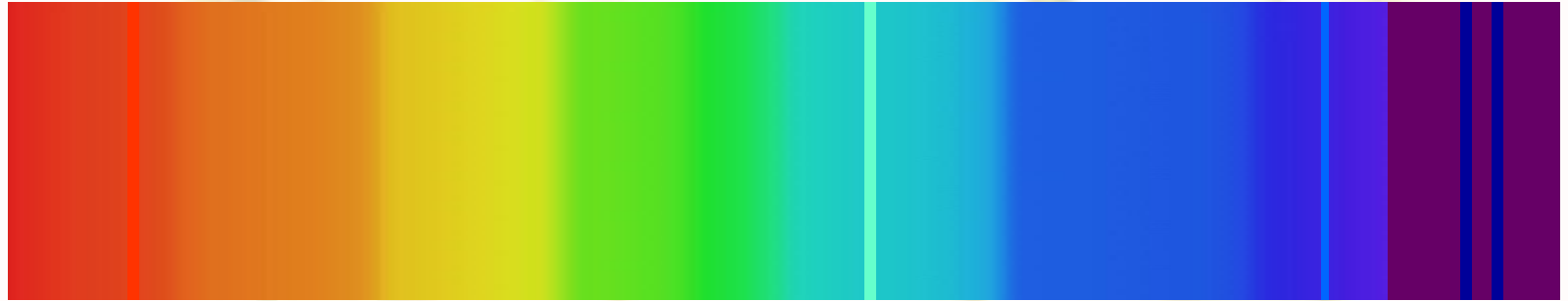
• вычисление постоянной Ридберга для водородоподобных систем

• объяснение структуры их линейчатых спектров.

Бору удалось объяснить линии спектра ионизованного гелия.







H_{α}

H_{β}

H_{γ}

H_{δ}

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.**

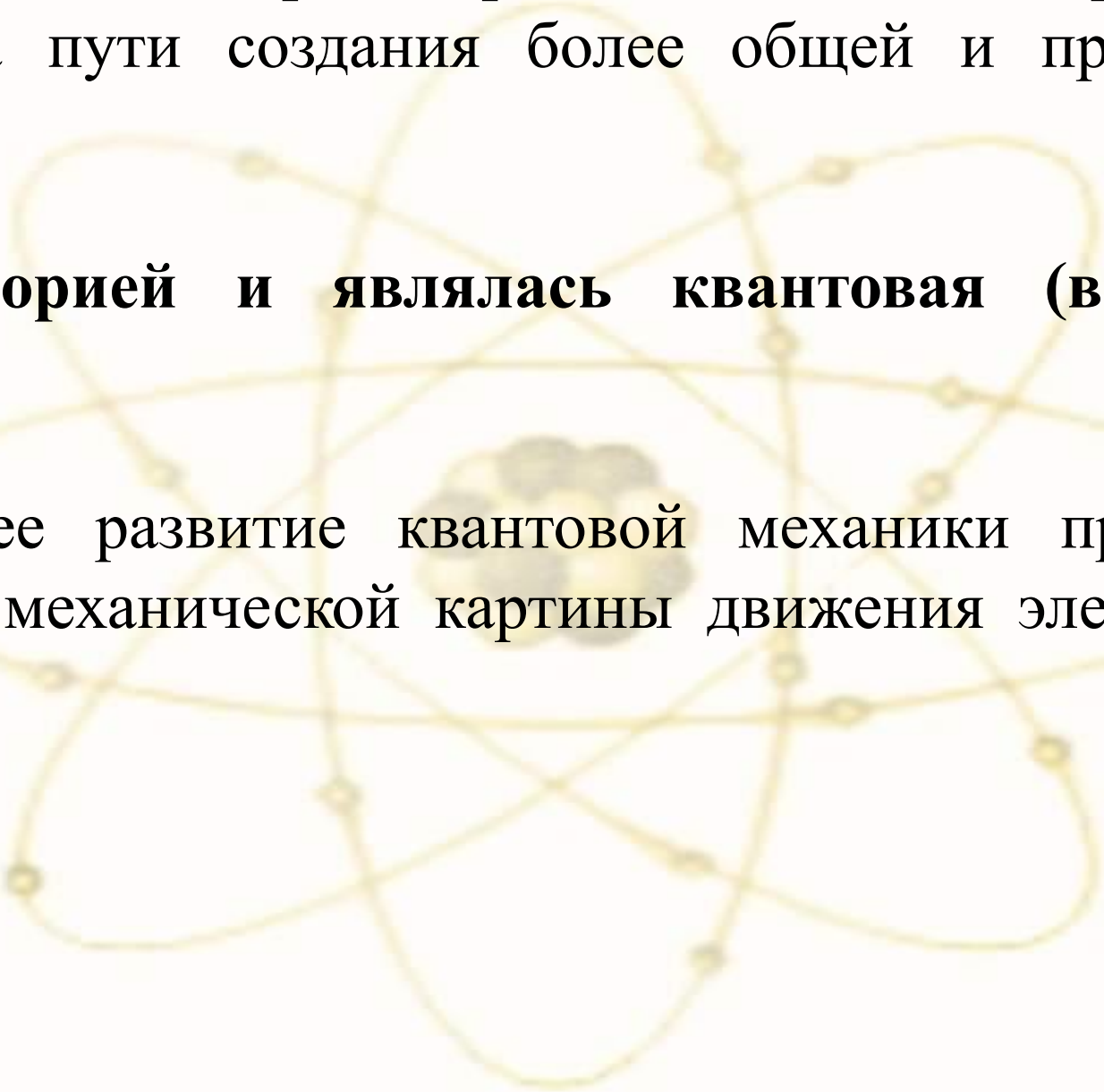
• Теория не могла объяснить **вопрос об интенсивностях спектральных линий**.

• 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.

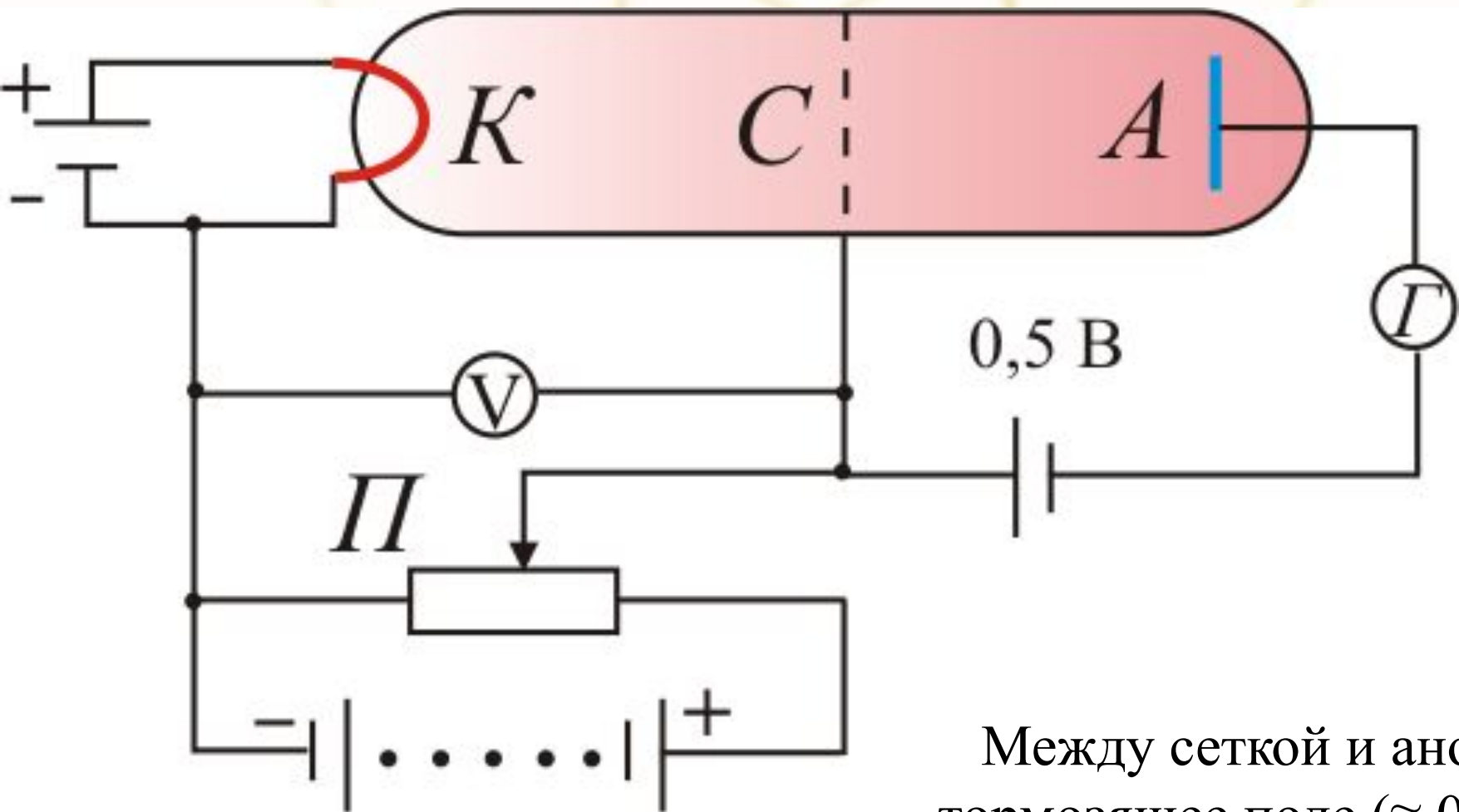


4. Опыт Франка и Герца

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

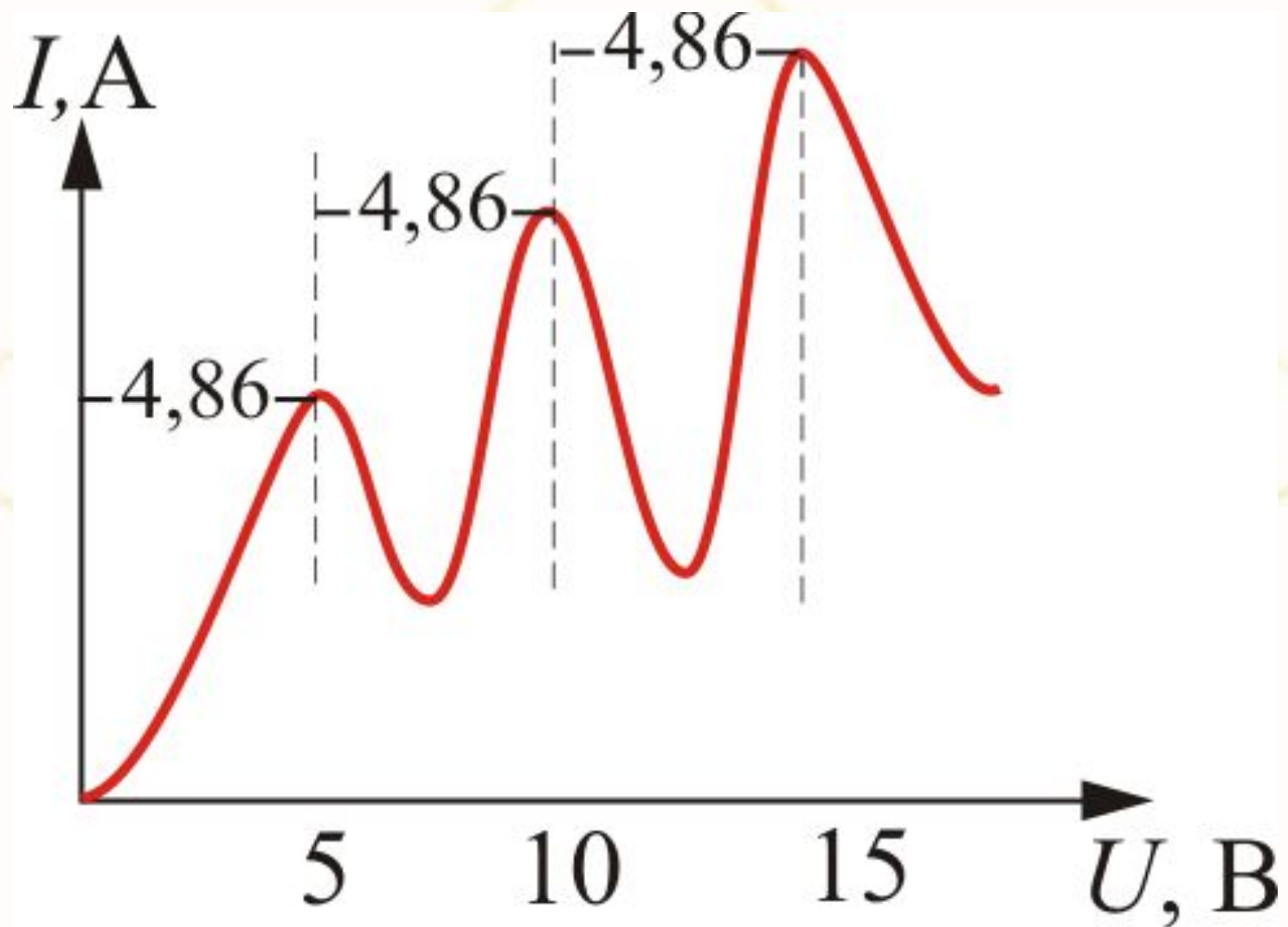
Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц, за экспериментальные исследования дискретности энергетического уровня получили Нобелевскую премию в 1925 г.

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.

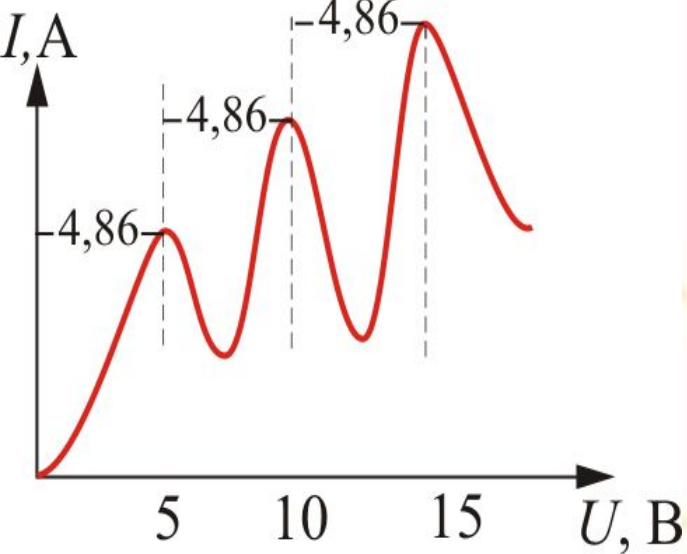


Между сеткой и анодом тормозящее поле ($\approx 0,5\text{В}$)

Зависимость тока через гальванометр (Γ) 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 ΔE_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 ΔE_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 ΔE_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.

