

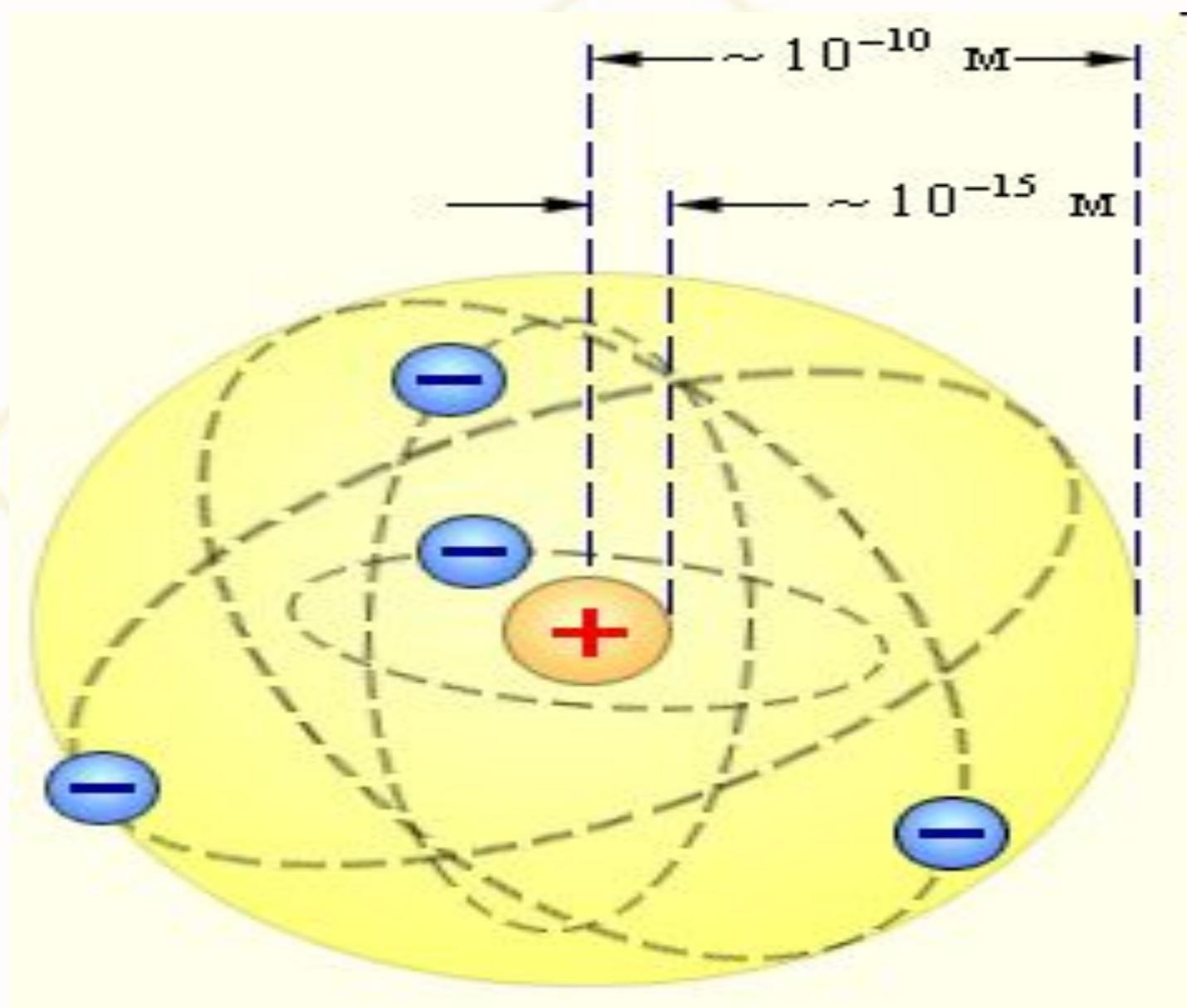
Тема 1. Модели атомов.
Атом водорода по теории Бора.

1.1. Закономерности в атомных спектрах.

1.2. Ядерная модель атомов.

1.3. Элементарная теория Бора.

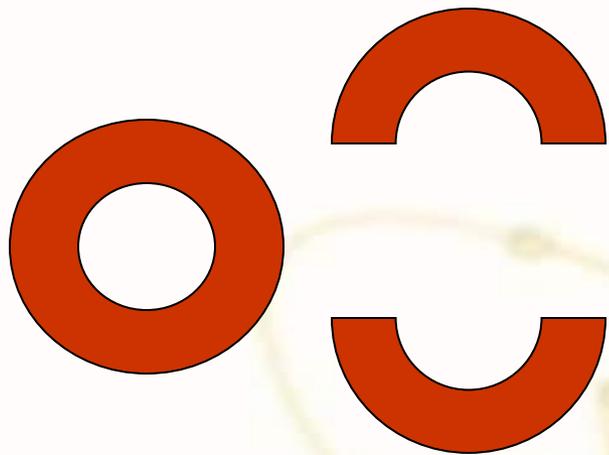
1.4. Опыт Франка и Герца.



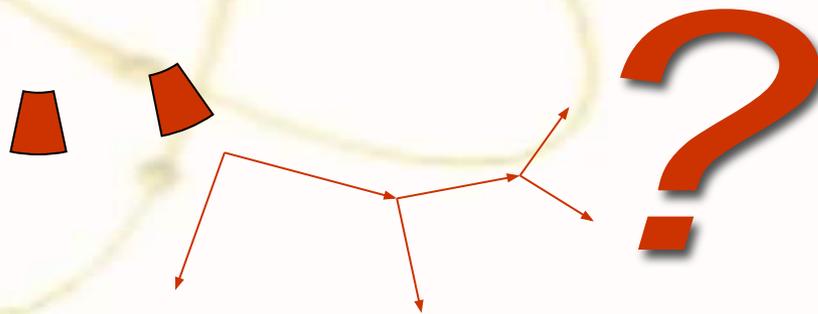
Концепция атомизма



1. Дихотомия Демокрита



Легенда о яблоке

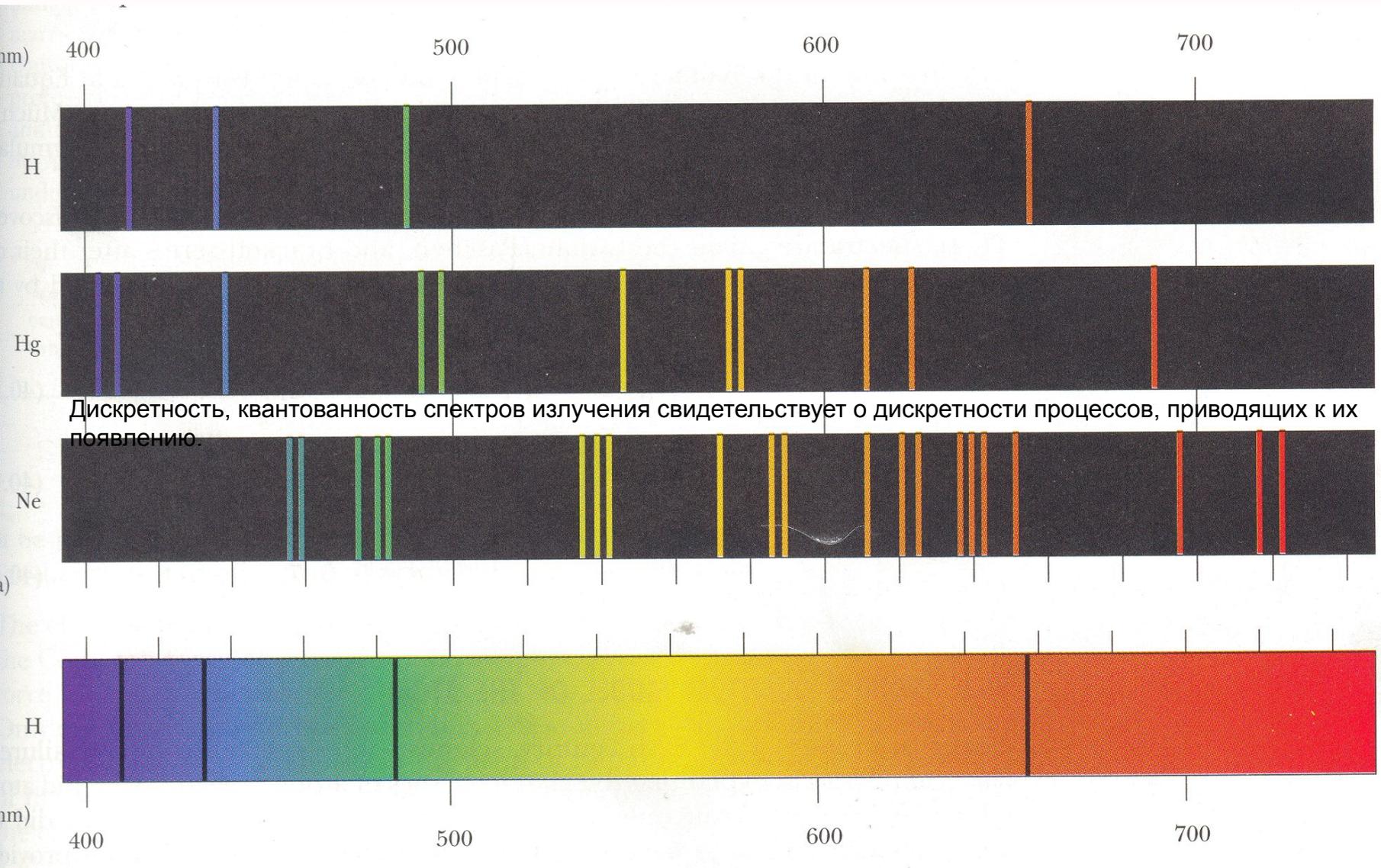


1.1. Закономерности в атомных спектрах.

Итак, что же такое атом?

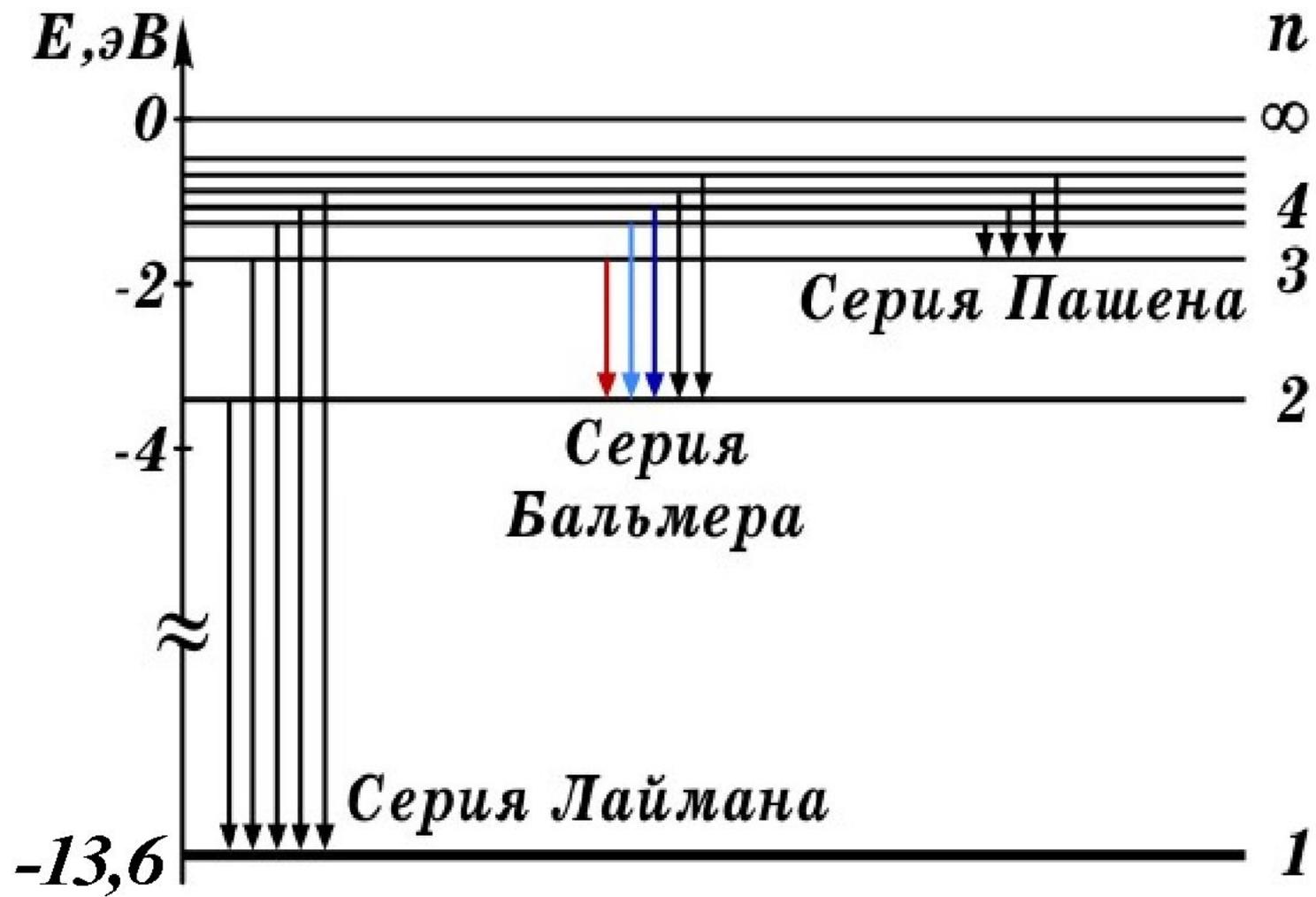
Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных спектральных линий (линейчатый спектр). Изучение атомных спектров послужило *ключом к познанию строения атомов.*

Прежде всего было замечено, что 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.



H



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*

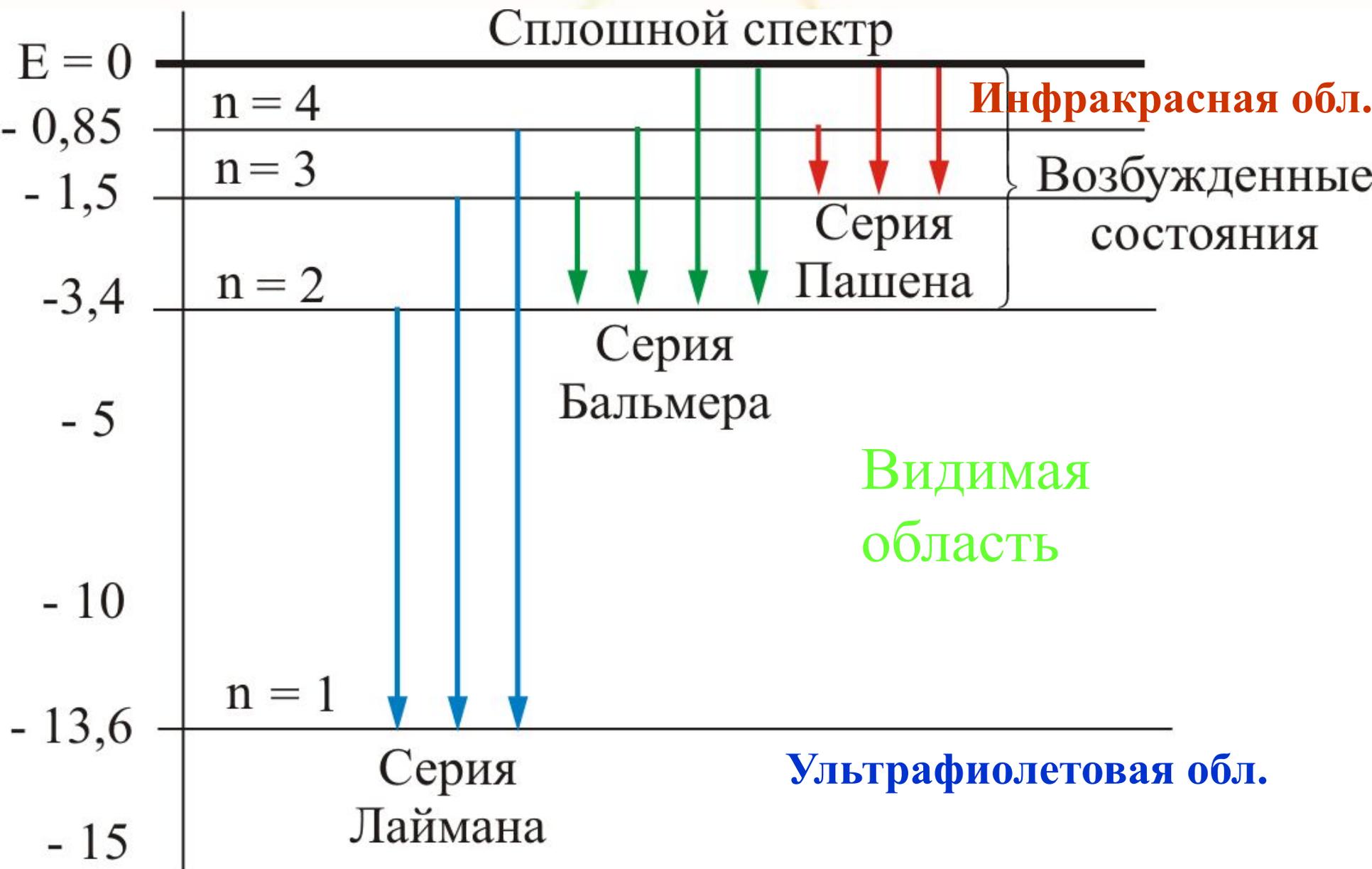
$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

или

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

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

Атом сложная система, имеющая сложный спектр



В то время учеными рассматривались **многие**
модели атомов

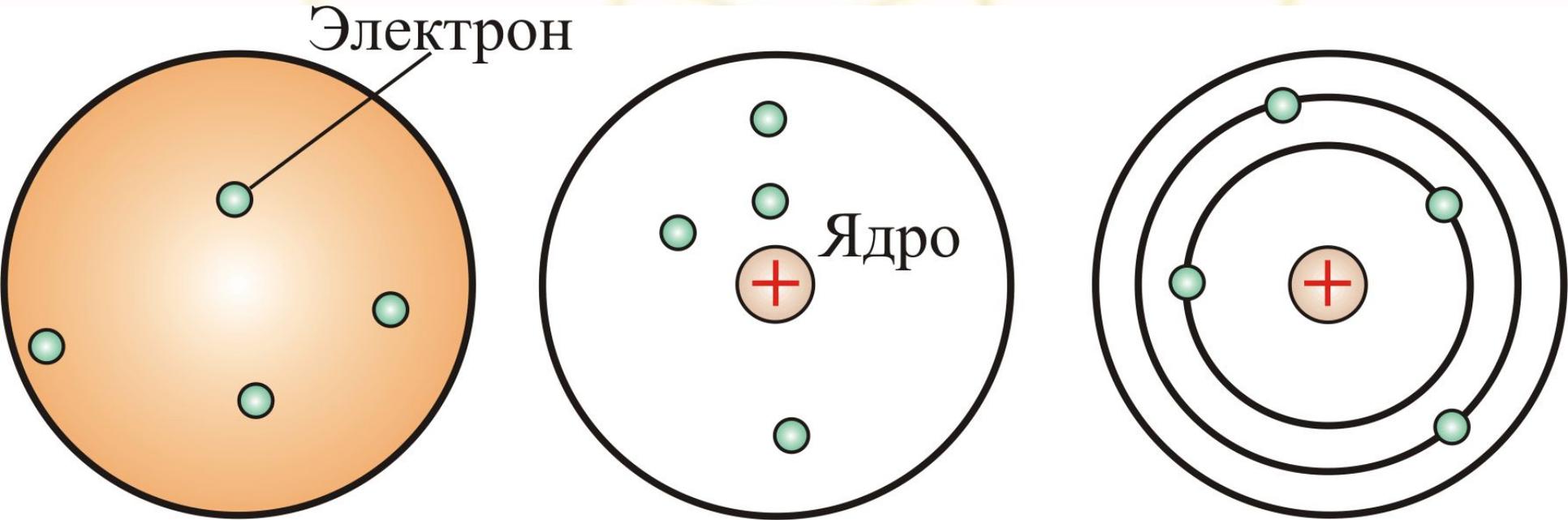


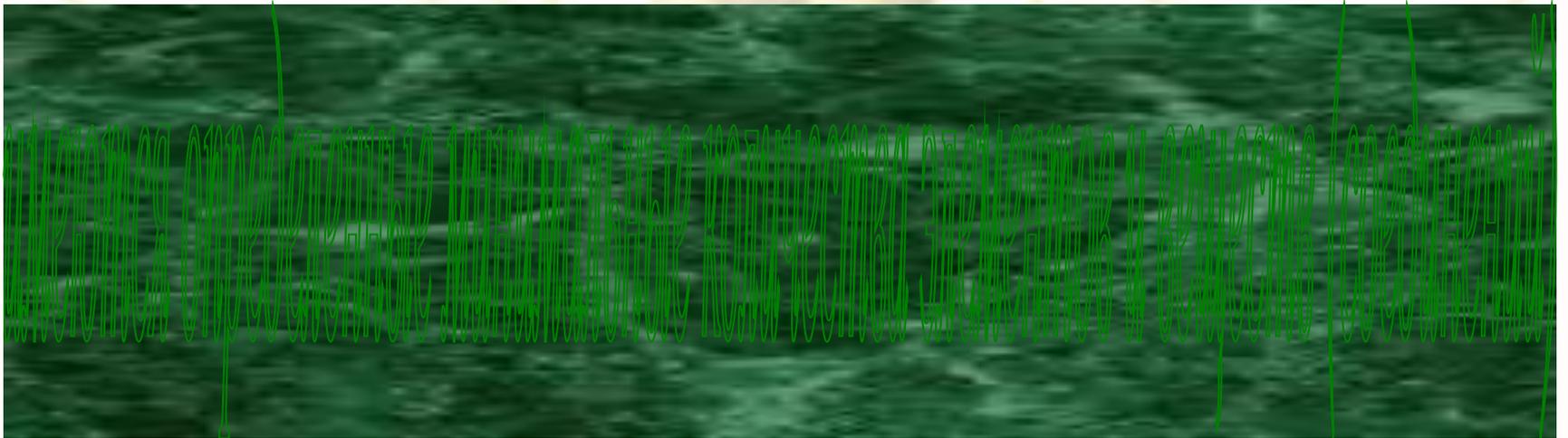
Рисунок 1.2

Открытие атомов в химии

Закон постоянства состава соединений Лавуазье (1743-1794)

	Hydrogen	^{wc} 1		Strontian	^{wc} 46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

Интерпретация Дальтона:

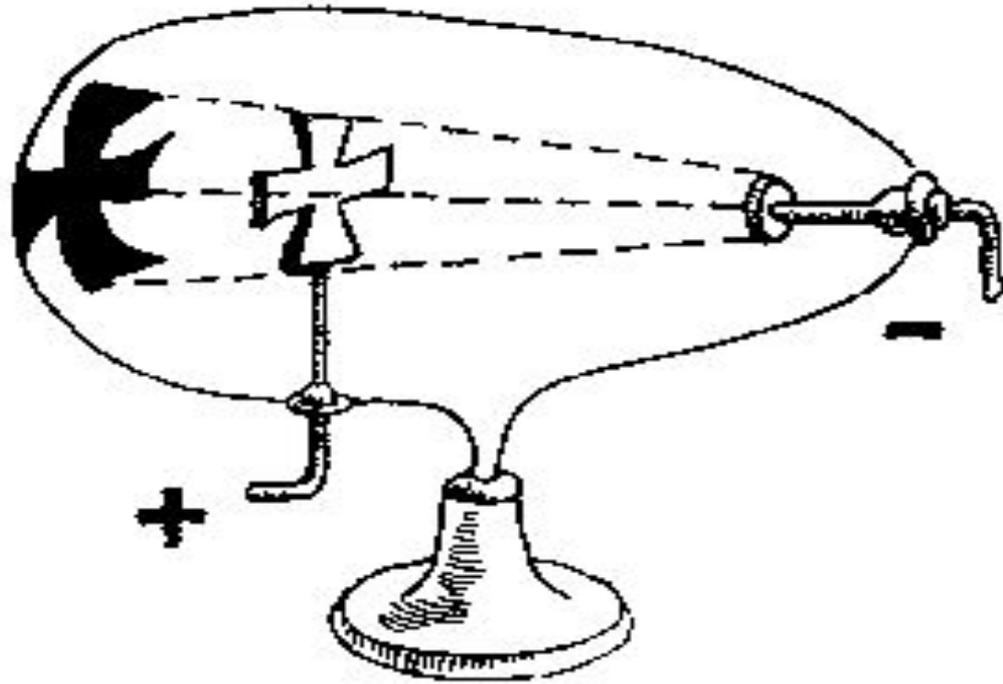


Проблема внутреннего строения атома

Открытие электрона

Исследование тока в разреженных газах

Трубка Крукса



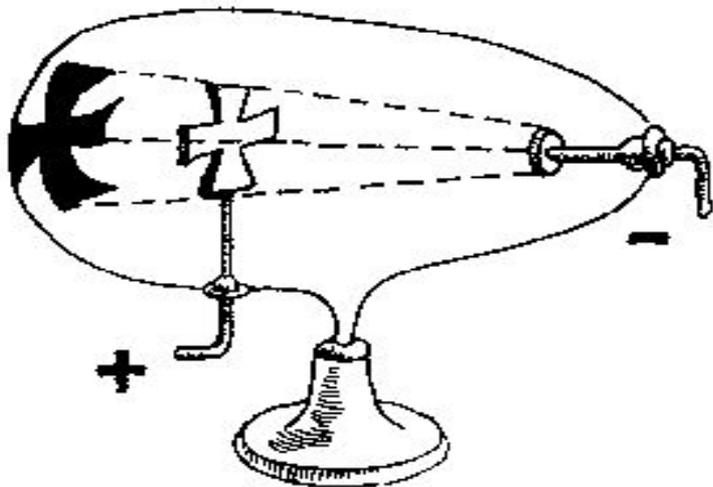
катодные лучи ("лучистая материя", "4 состояние")

Результаты:

1 - отклоняются в магнитном поле

2 - имеют отрицательный заряд

3 - свойства K -лучей не зависят от типа газа



ВЫВОДЫ:

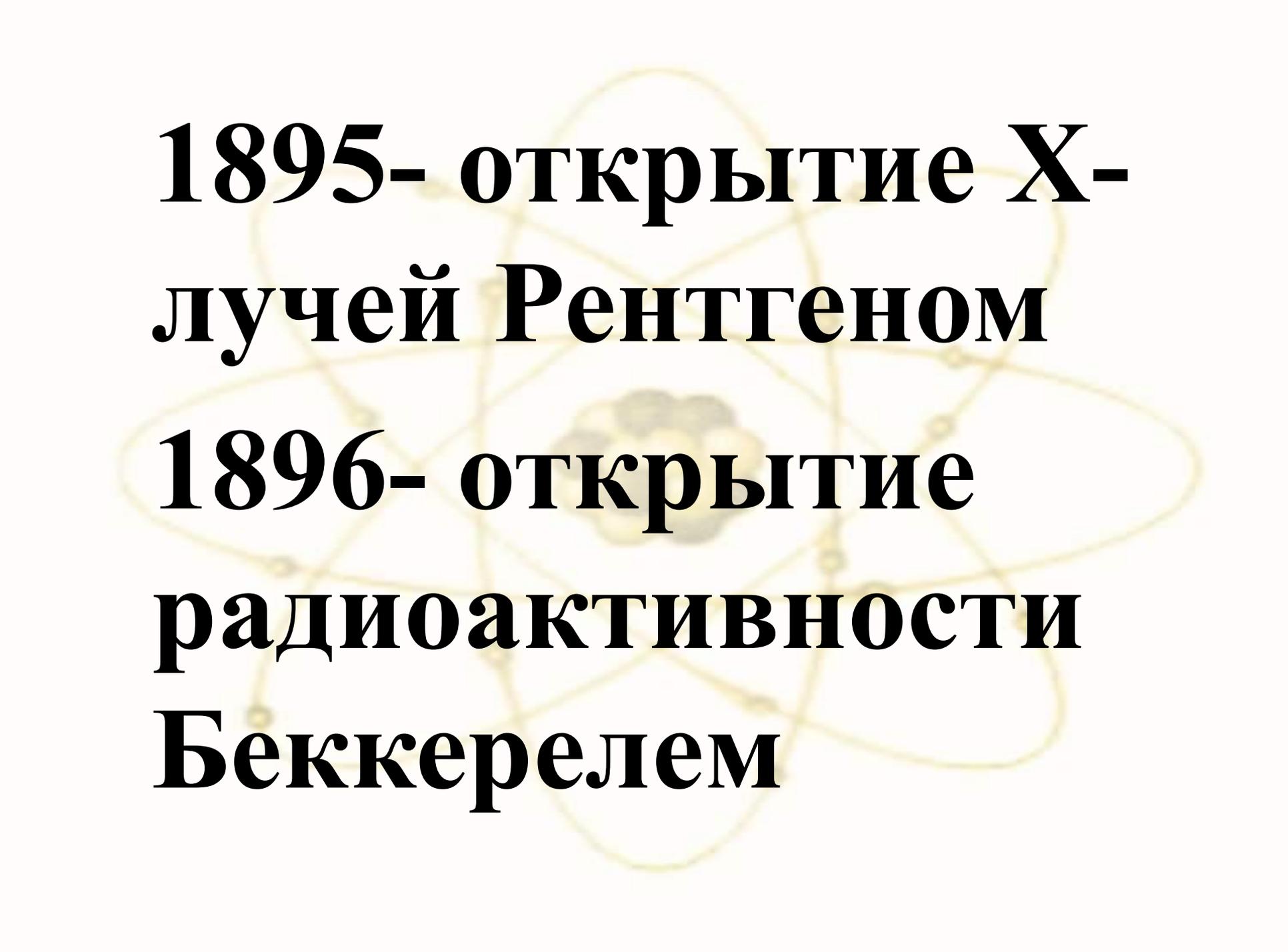
К-лучи - это поток отрицательно заряженных частиц вещества.

Дж.Дж. Томсон в 1897 году

определил величину отношения "заряд" / "масса" для этих частиц.



Как же "устроен" атом?



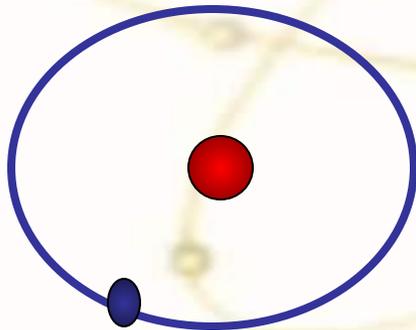
**1895- открытие X-
лучей Рентгеном**

**1896- открытие
радиоактивности
Беккерелем**

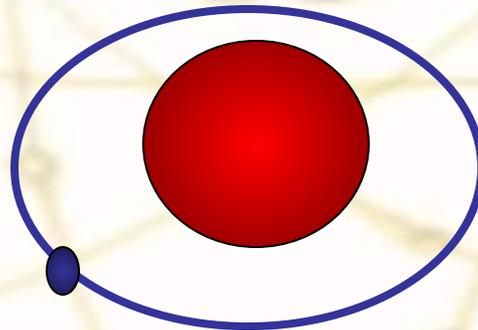
1897 - открытие электрона



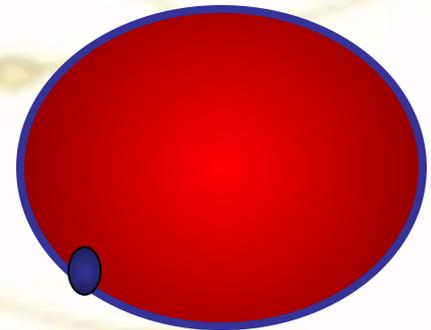
**Были предложены
различные модели
строения атома.**



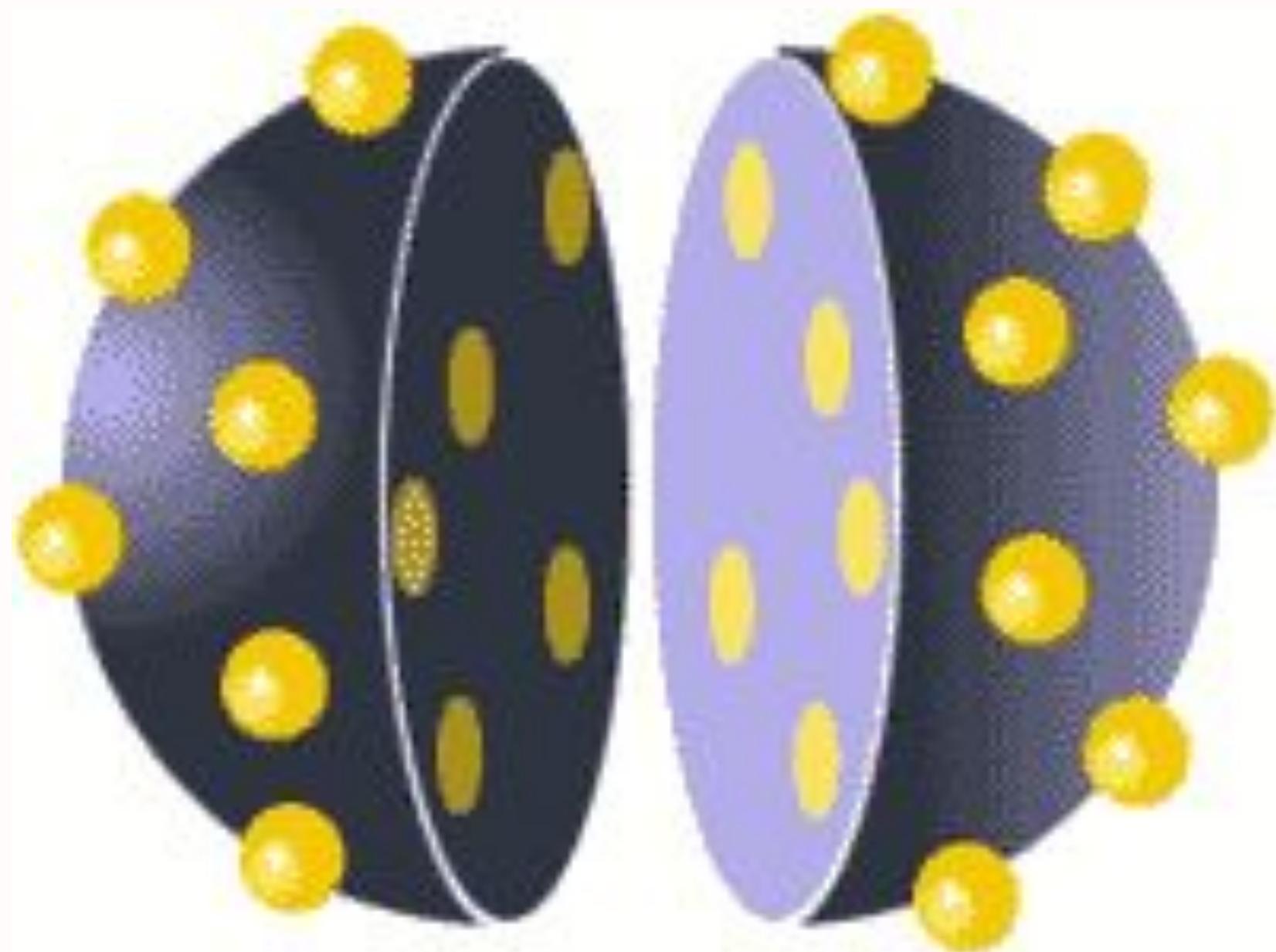
1



2



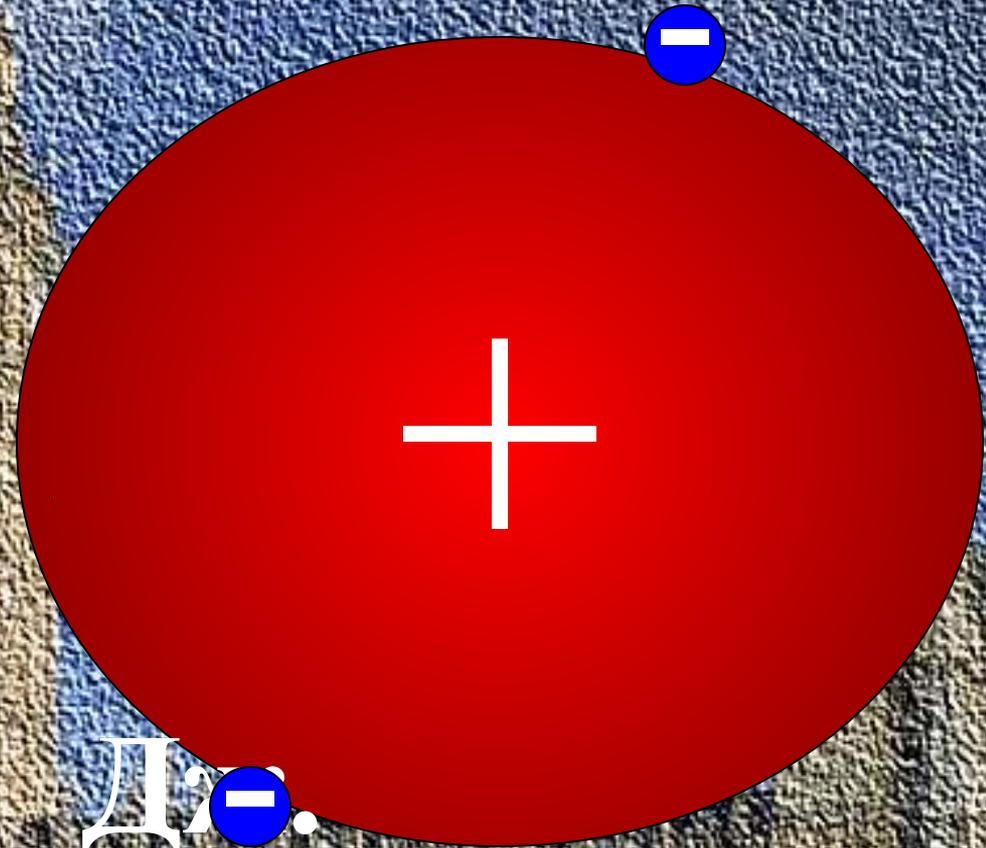
3

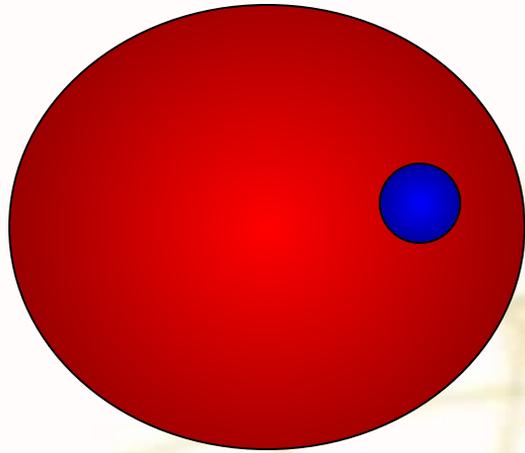


Пудинговая модель

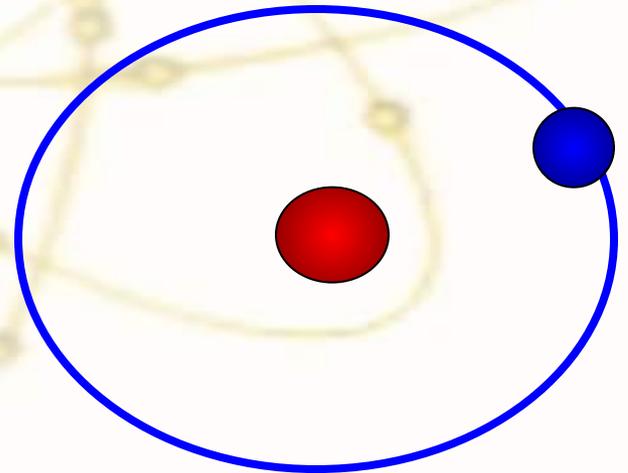
В 1903 году Дж. Дж. Томсон, предложил модель атома: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны. Суммарный заряд сферы равен заряду электронов. Атом в целом нейтрален. Теория такого атома давала, что спектр должен быть сложным, но никоим образом не линейчатым, что противоречило экспериментам.

Модель Дж.
Дж Томсона
(1904)





**Какая
из моделей
верна?**





Резерфорд Эрнест (1871–1937)

– английский физик, основоположник ядерной физики.

Исследования посвящены атомной и ядерной физике, радиоактивности.

Своими фундаментальными открытиями в этих областях заложил основы современного учения о радиоактивности и теории строения атома. 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. Предсказал существование трансурановых элементов.

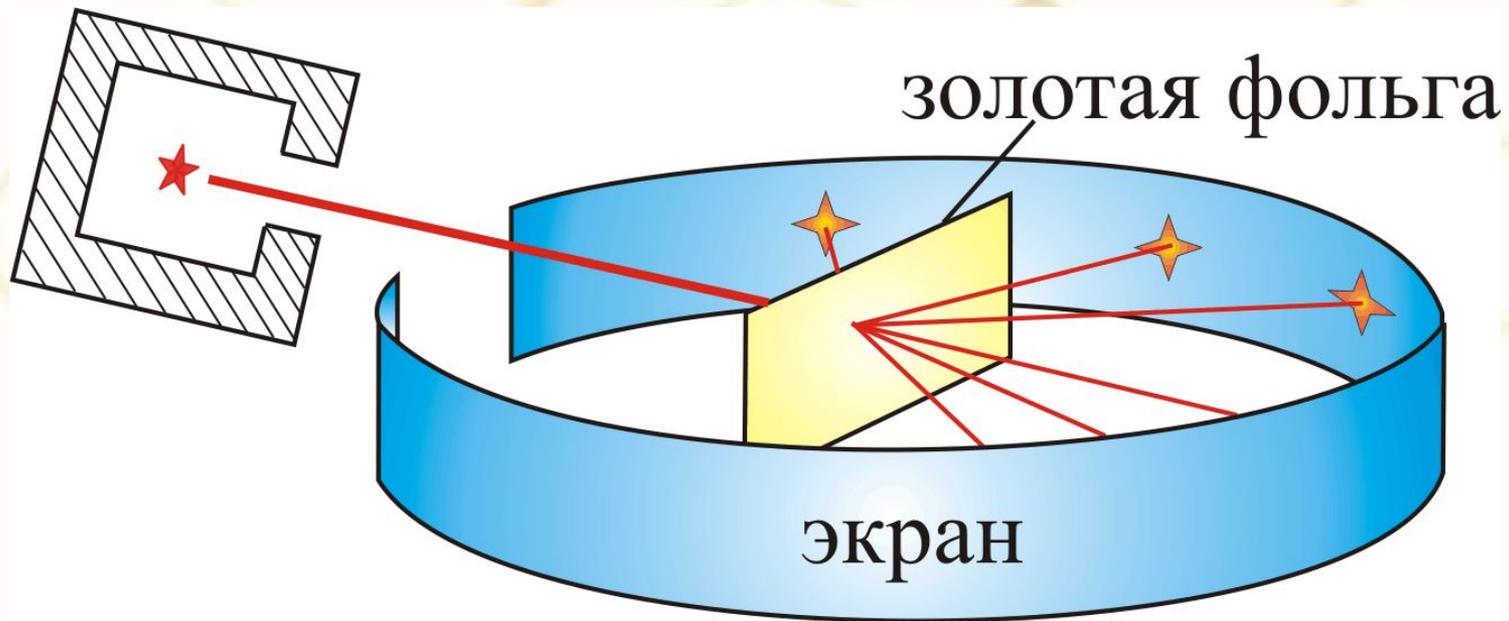
В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

1.2. 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

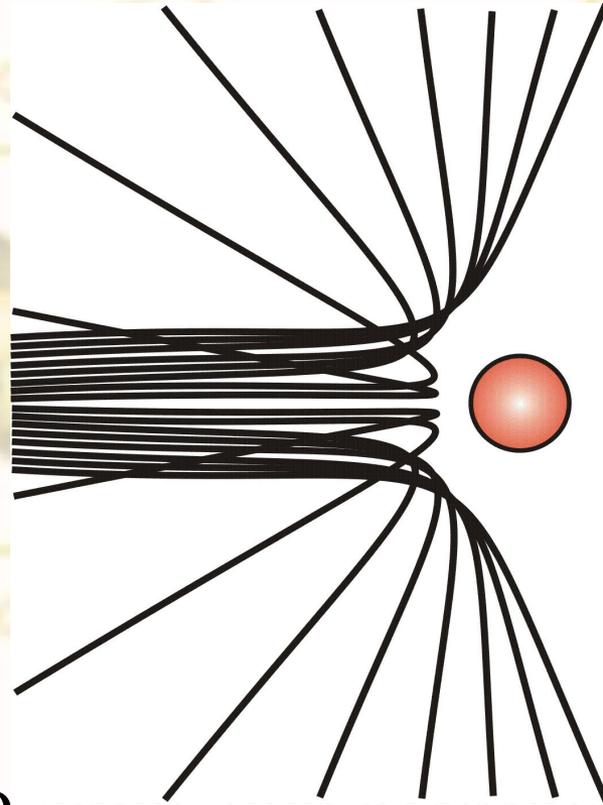
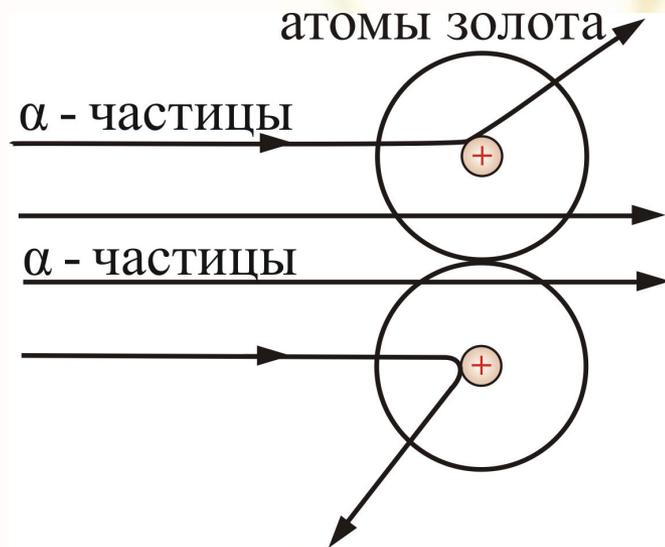


Рассеянные частицы ударялись об экран из сернистого цинка, вызывая **сцинтилляции** – вспышки света.

Количество вспышек в темноте фиксировалось через микроскоп

Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3°

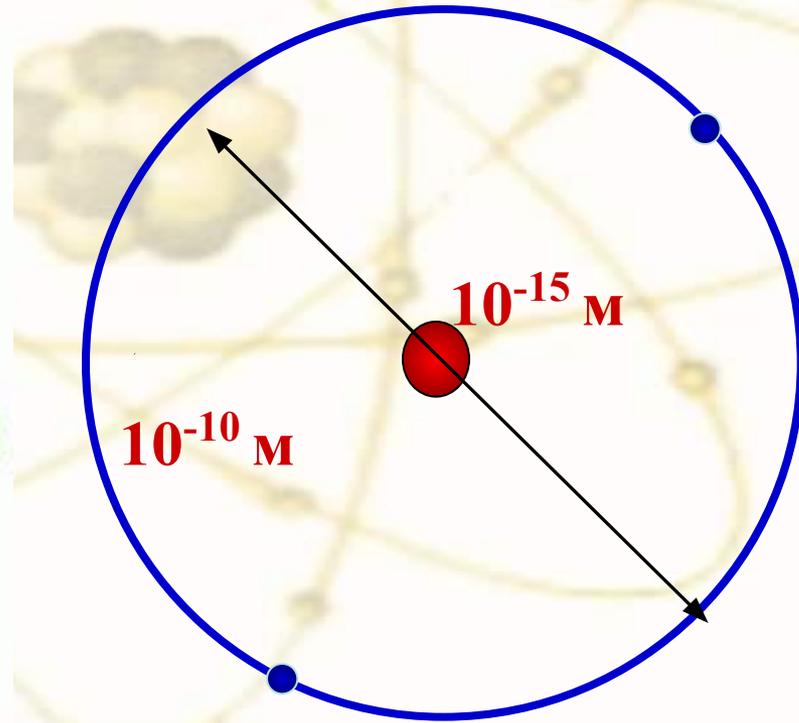
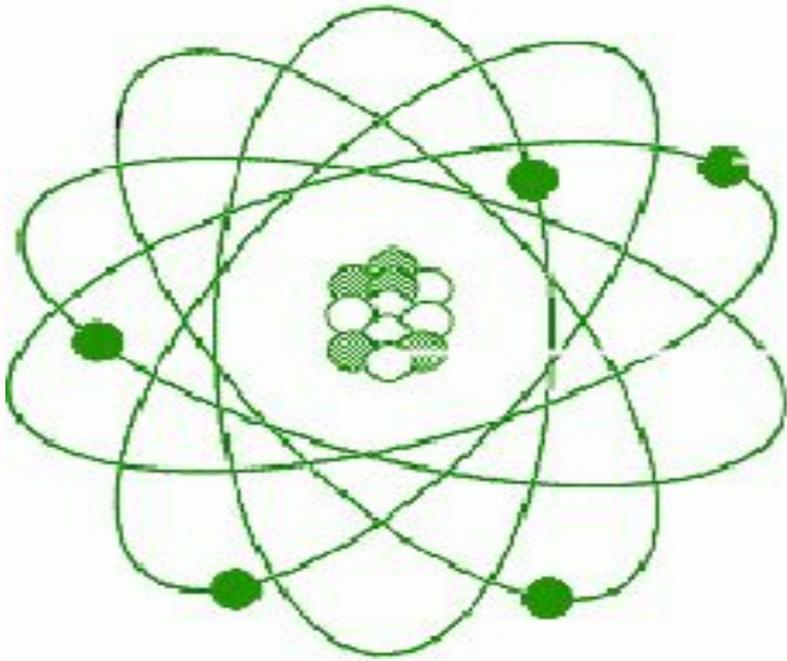
Отдельные α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)



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;

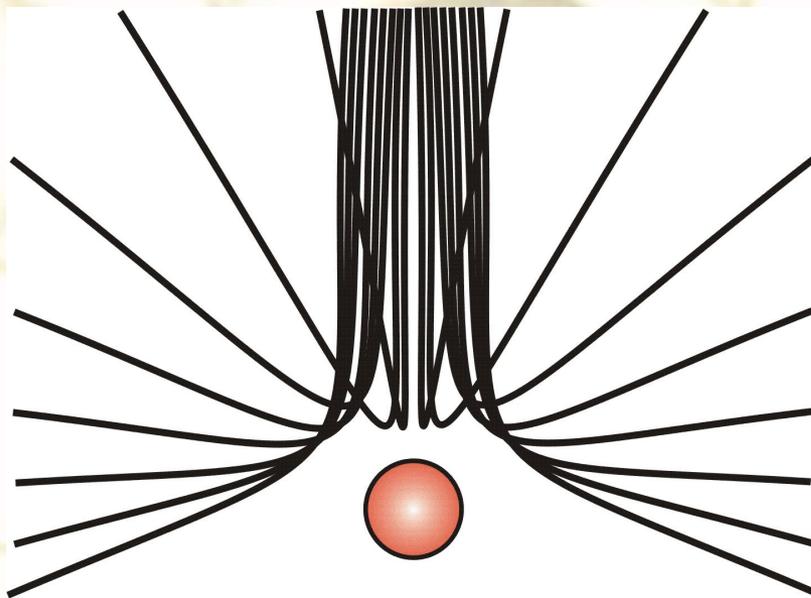
Ze – заряд ядра;

b – *прицельный параметр*.

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

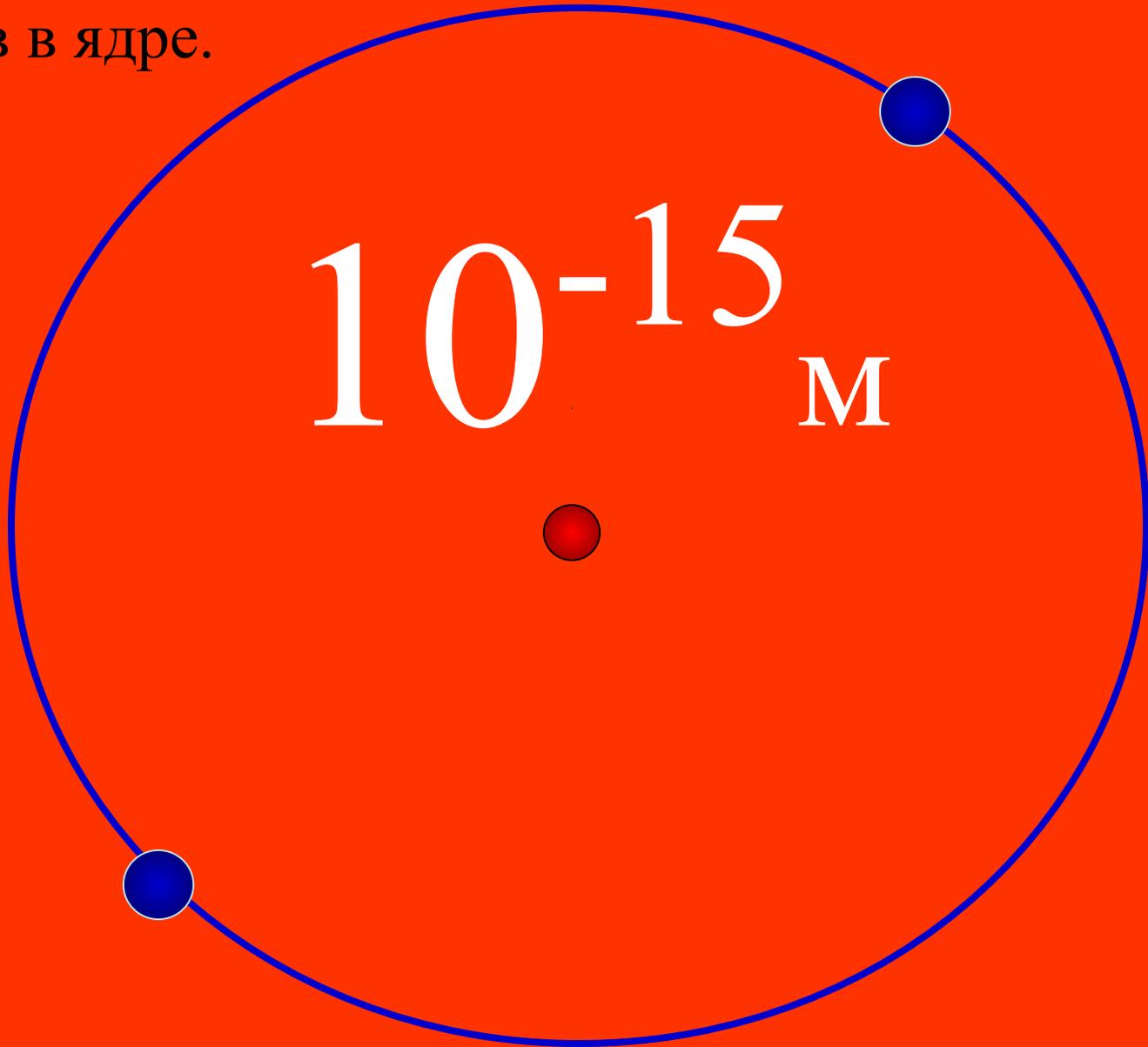
$$d\sigma = \left(\frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}$$

- формула Резерфорда



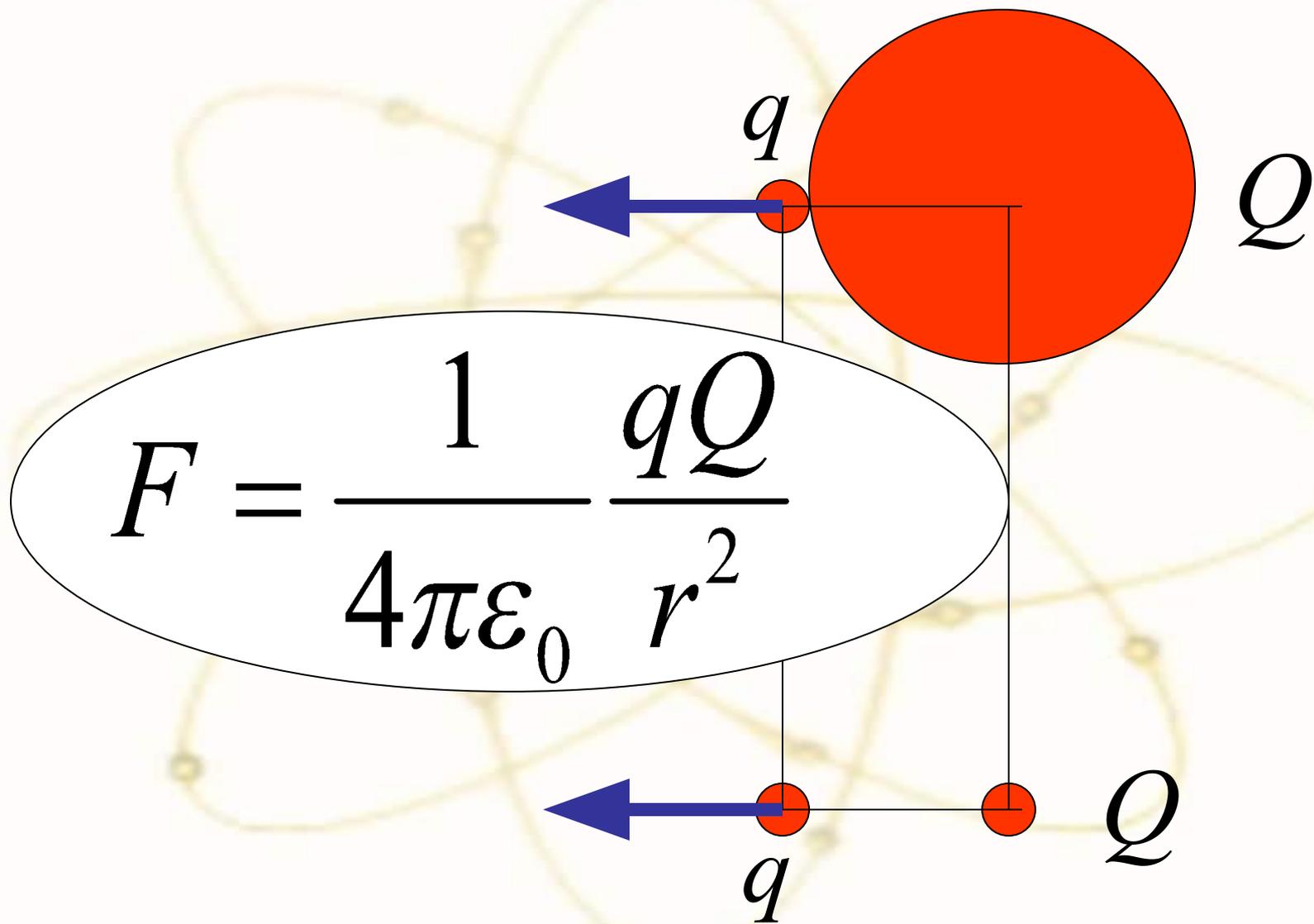
Частицы с разными прицельными параметрами отклоняются на разные углы.

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

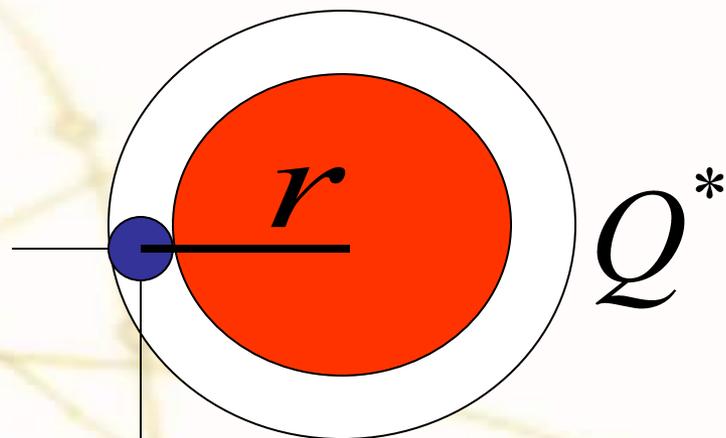




**Сравним силы
взаимодействия двух
положительно
заряженных частиц в
разных моделях**

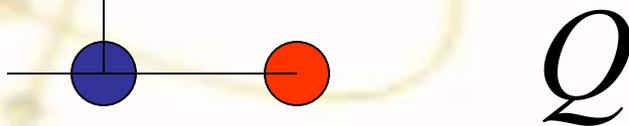


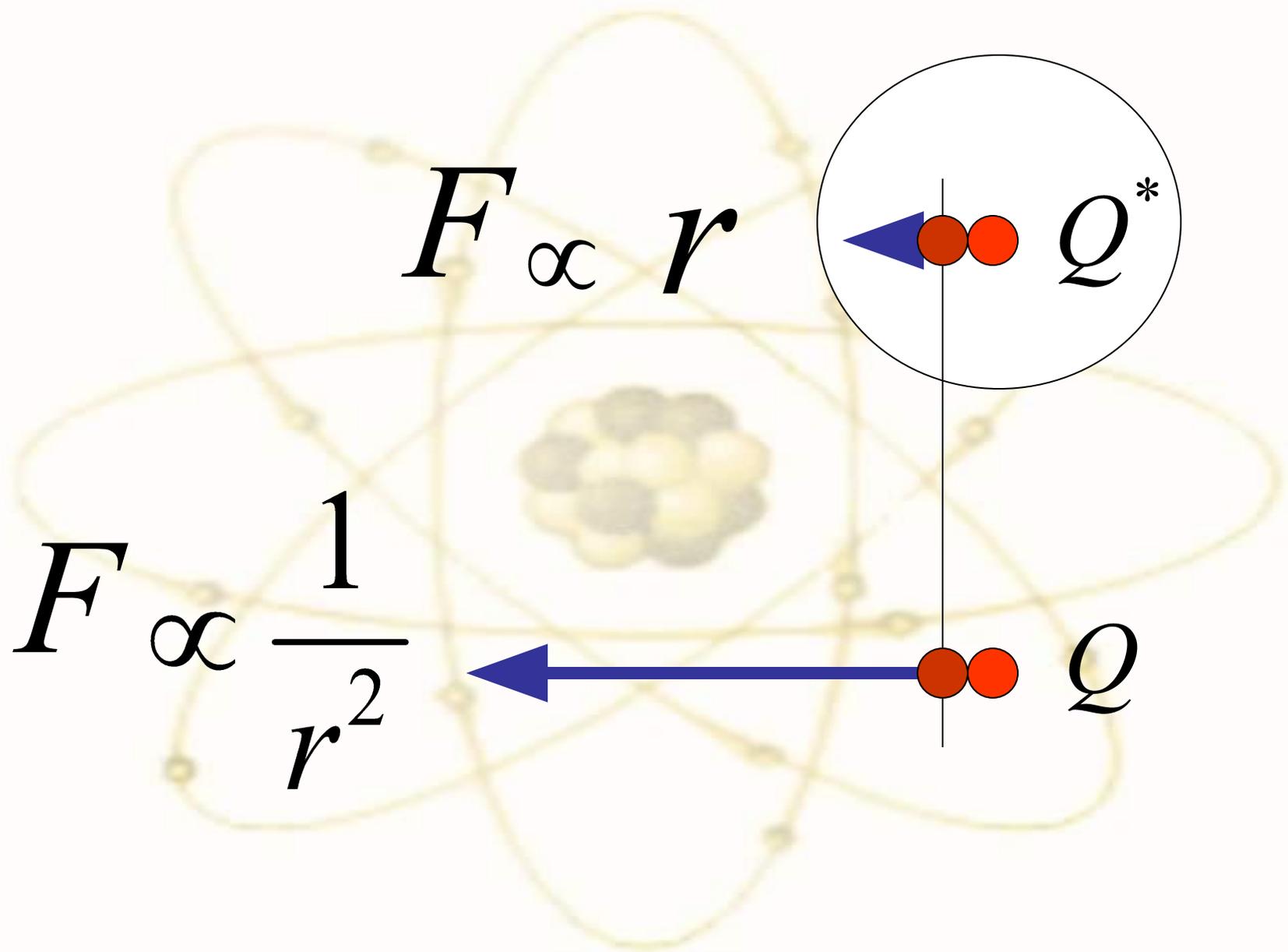
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ^*}{r^2} \propto r$$

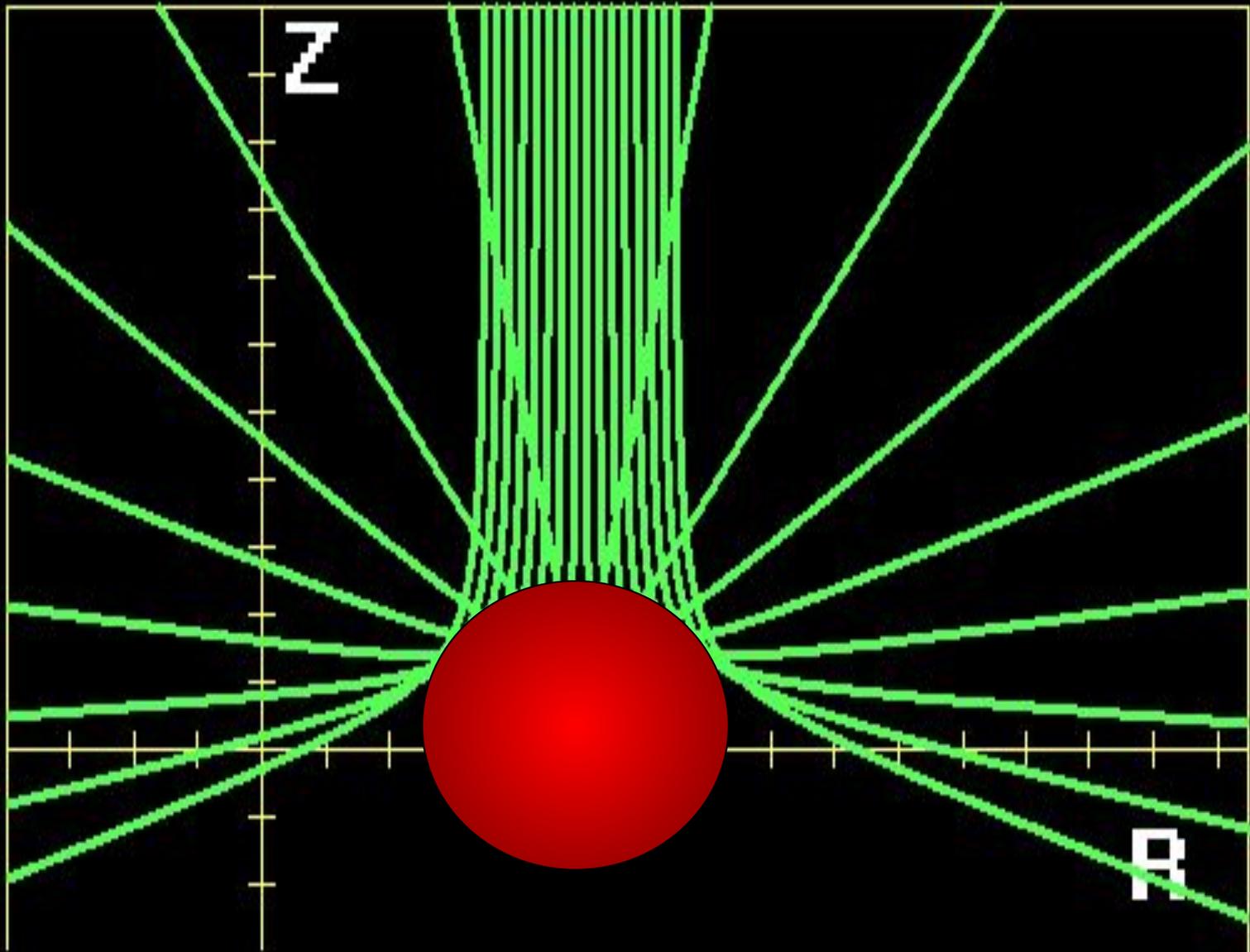


$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

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

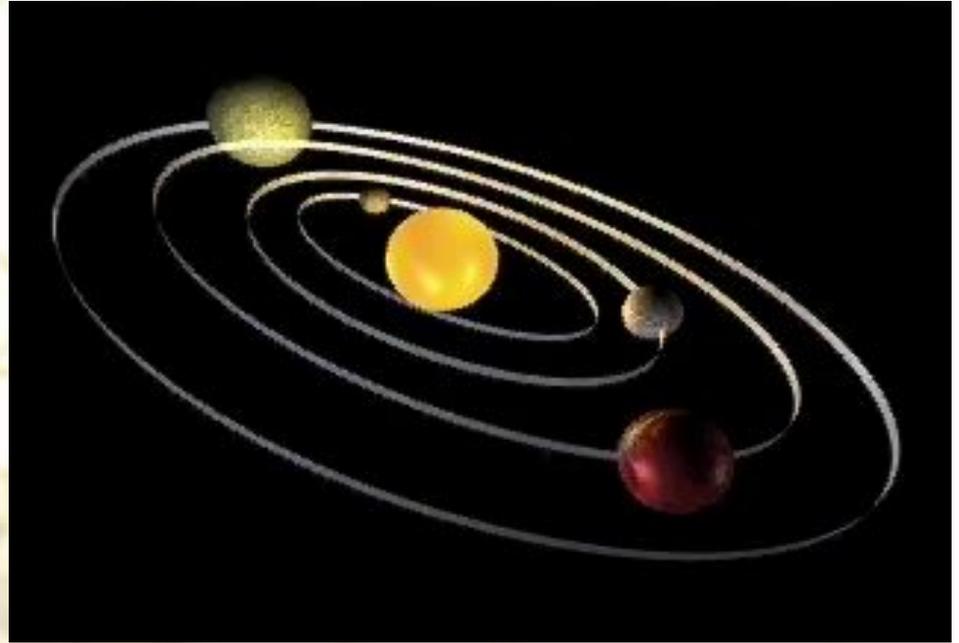
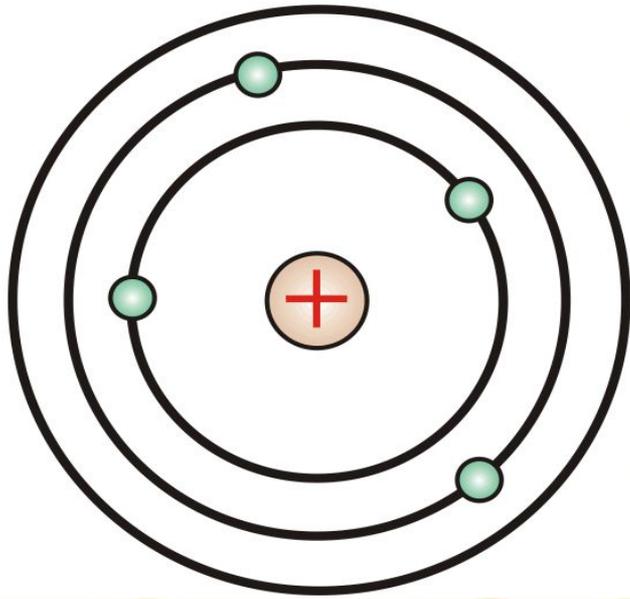






RUTHERFORD Ernest, lord of Nelson, (1871 - 1937)

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**. Т.о. модель Резерфорда не могла объяснить, почему атом устойчив.

**Планетарная
модель атома
противоречит
электродинамике
Максвелла!!!**

**Согласно теории
Максвелла, ускоренно
движущийся заряд
излучает
электромагнитные
волны.**

При движении по окружности
имеется

центростремительное

ускорение. Поэтому электрон

должен терять энергию на

электромагнитное излучение и

падать на ядро.

**Попыткой
спасения
планетарной
модели атома
стали постулаты
Н. Бора**

1.3. Элементарная теория Бора.



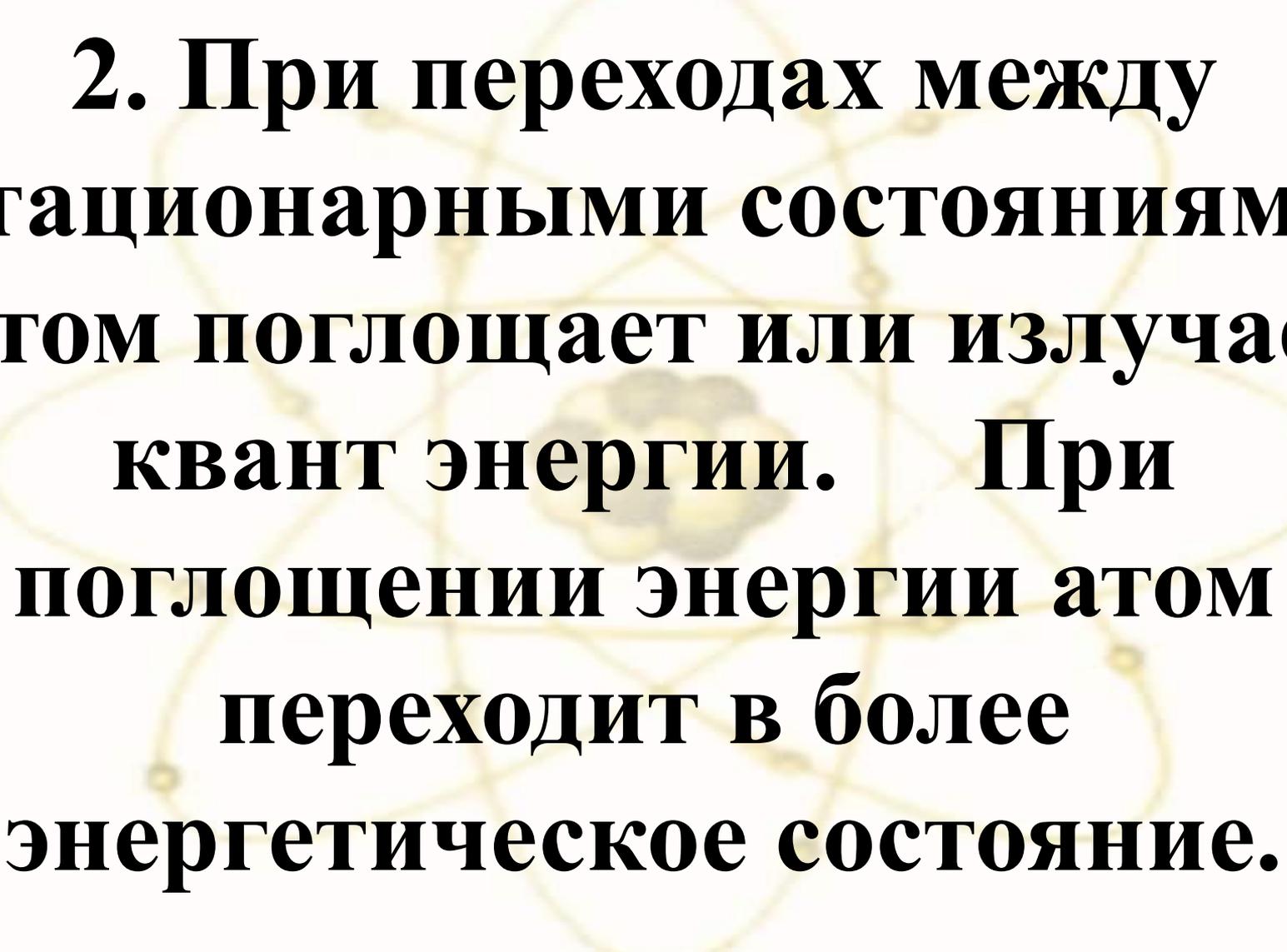
БОР Нильс Хендрик Давид

(1885–1962) – Выдающийся датский физик-теоретик, один из создателей современной физики.

Сформулировал идею о дискретности энергетических состояний атомов, в свете новых идей построил атомную модель, открыв условия устойчивости атомов, и объяснил большой круг явлений. Создал первую квантовую модель атома, основанную на двух постулатах, которые прямо противоречили классическим представлениям и законам. Бор много сделал для развития ядерной физики. Он – автор теории составного ядра, один из создателей капельной модели ядра и теории деления атомного ядра.



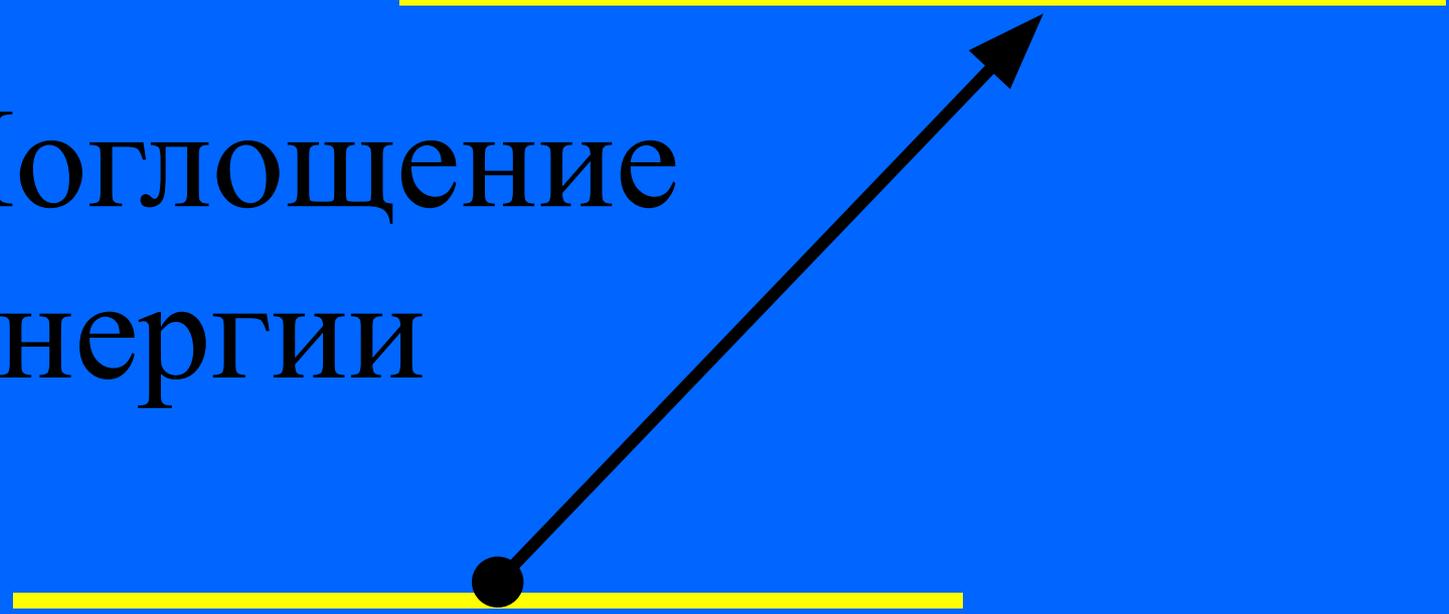
**1. Атом следует описывать
как «пирамиду»
стационарных
энергетических состояний.
Пребывая в одном из
стационарных состояний,
атом не излучает энергию.**



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

$$E_n$$

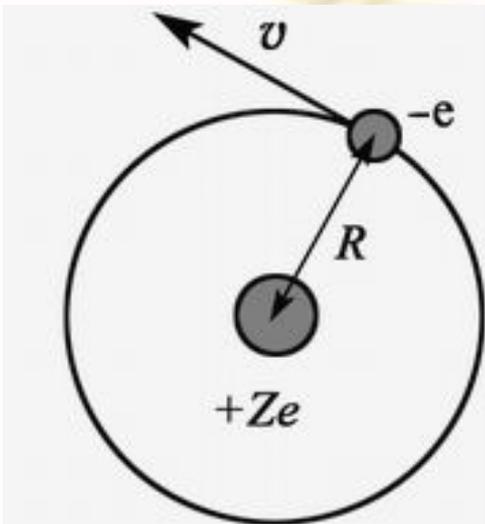


Постулаты Бора

1. Электроны 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:*



$$m_e v r = n \hbar$$

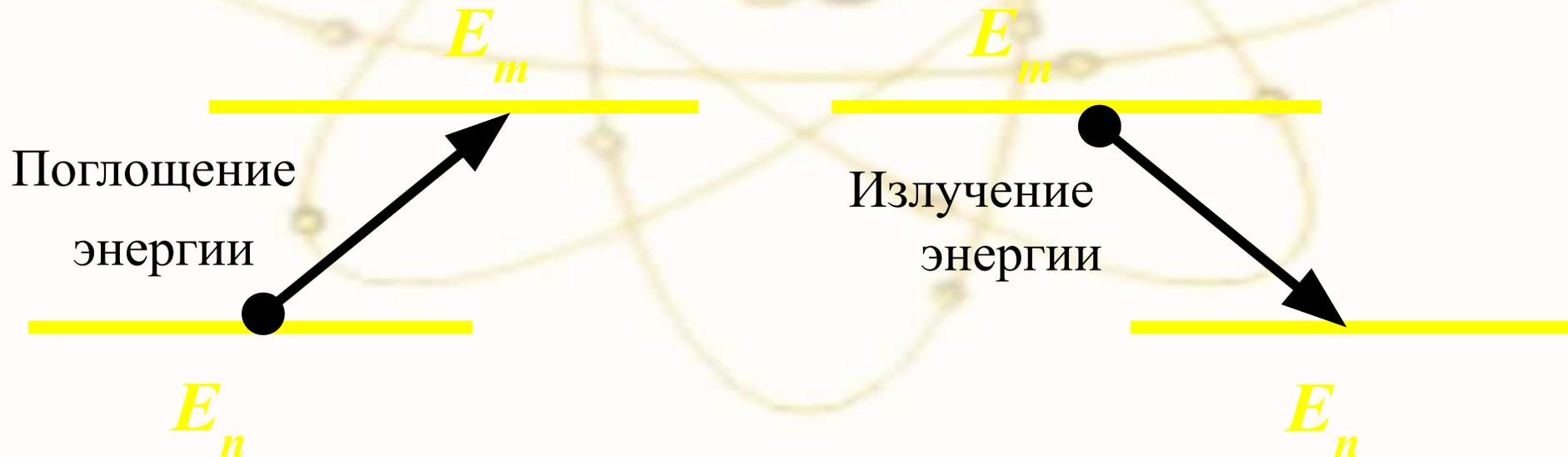
$n = 1, 2, 3, \dots$ главное квантовое число.

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

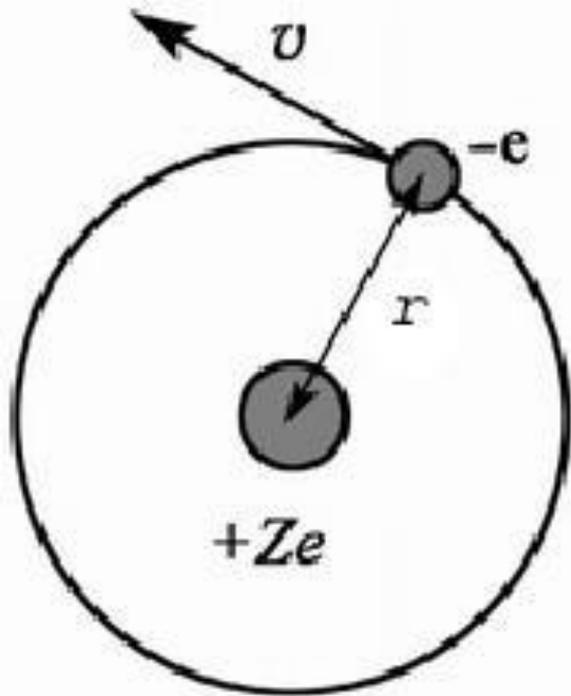
Световой квант равен разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

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

m, n – номера состояний.



Уравнение движения электрона получим из равенства центробежной силе кулоновской силе:



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

$$m_e v r = n\hbar$$

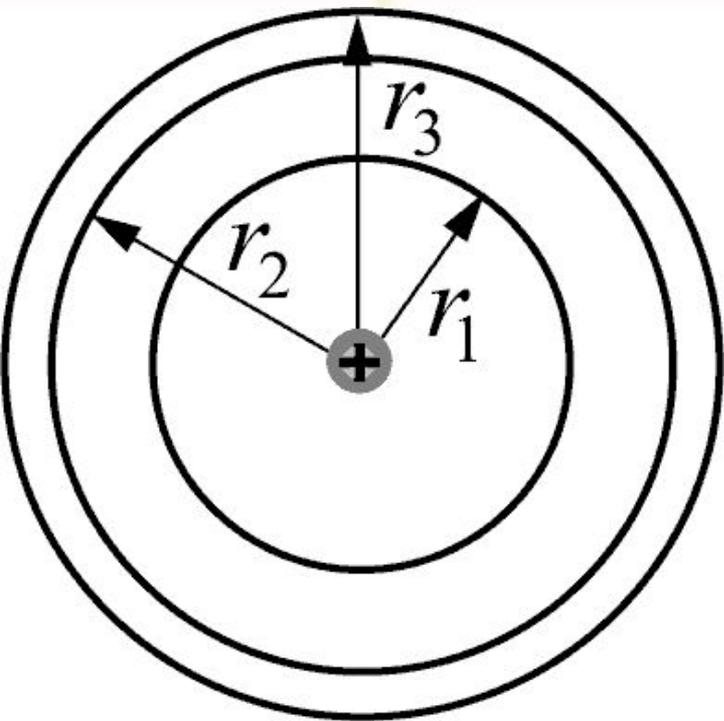
Отсюда найдем **радиус стационарных орбит:**

\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 энергией 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

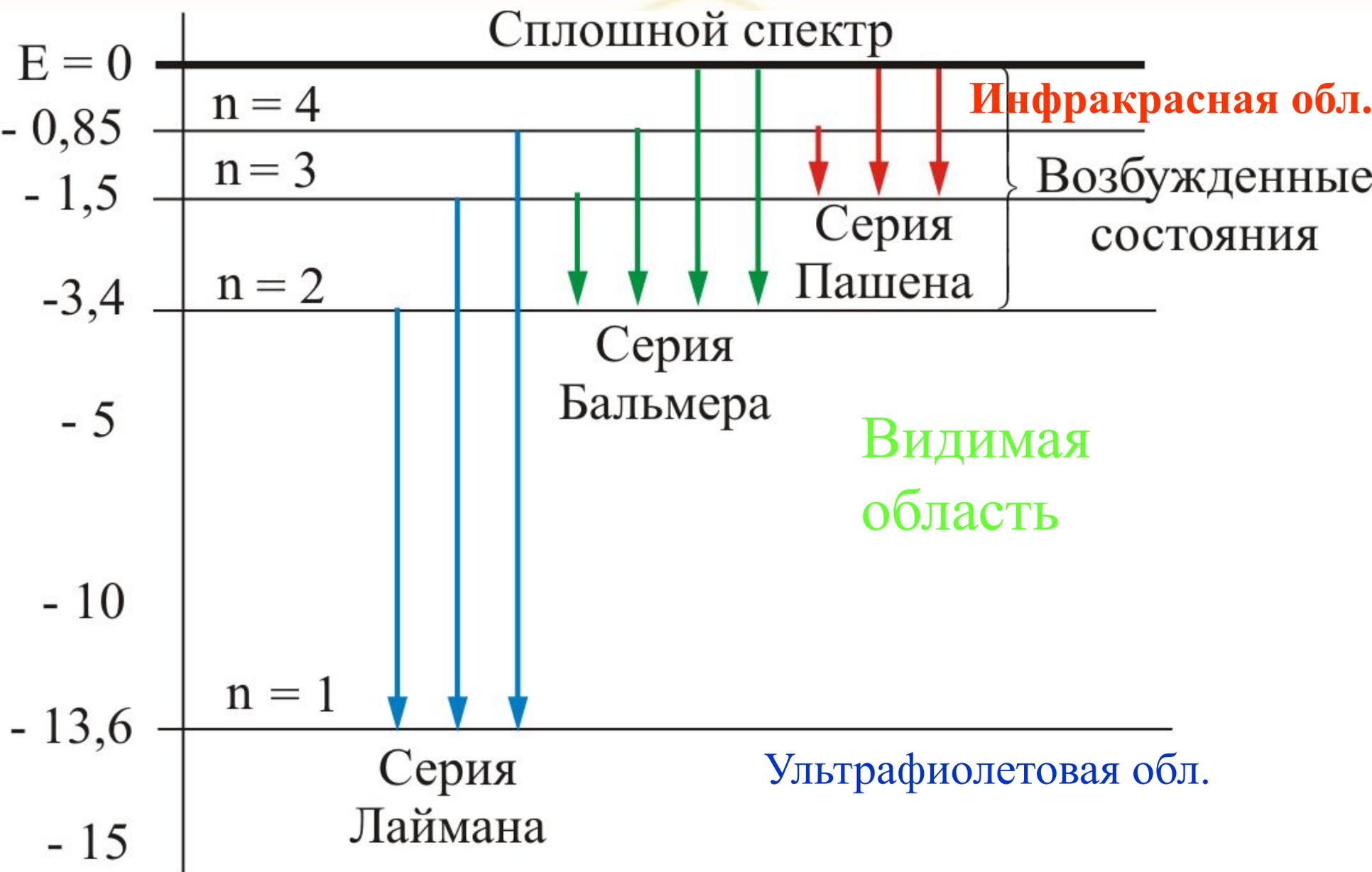


The diagram shows a vertical stack of horizontal lines representing energy levels. From top to bottom: a dashed line labeled $W = 0$, a solid black line, another solid black line, a solid red line labeled W_3 , a solid blue line labeled W_2 , a solid green line labeled W_1 , and a solid black line at the bottom labeled W .

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

Отсюда видно, что:

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,

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

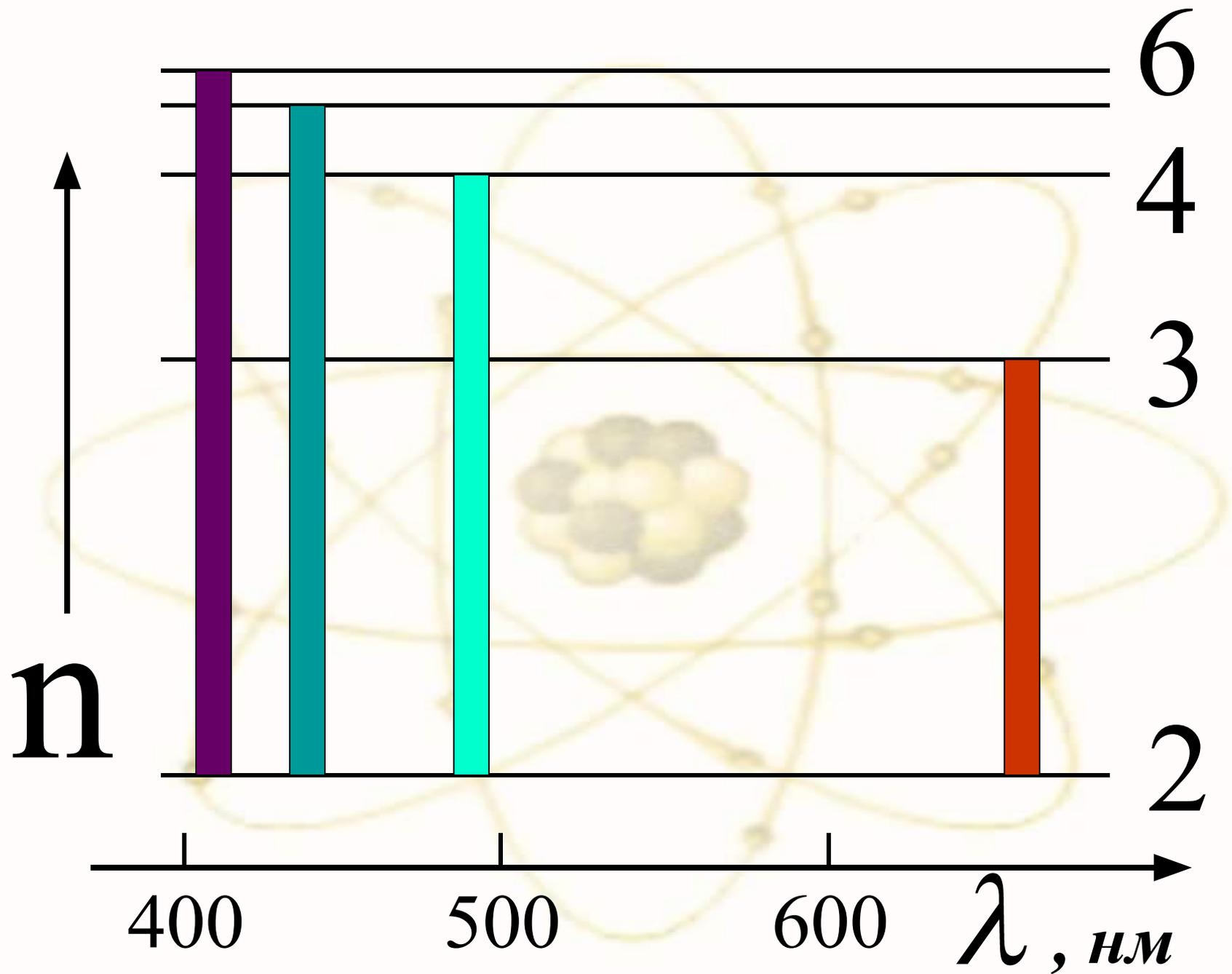
Мы получили обобщенную формулу Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом, где постоянная Ридберга

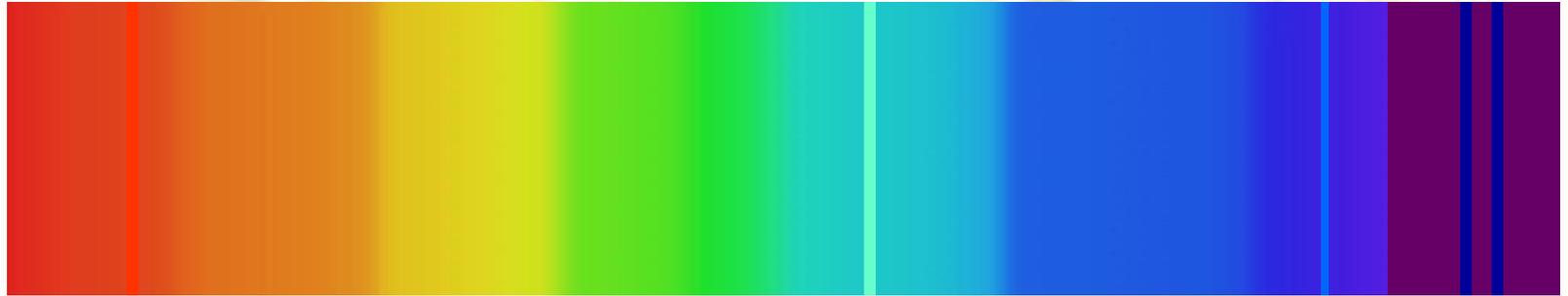
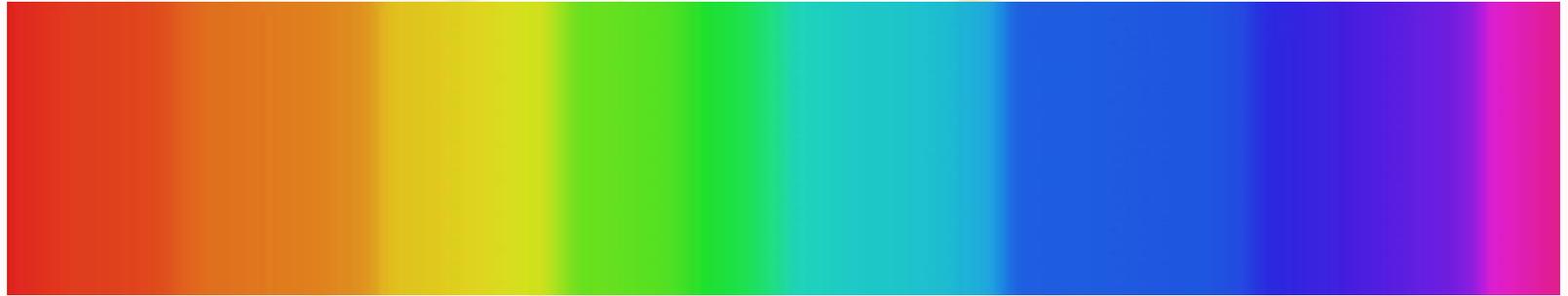
$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$$

*Серьезным успехом теории Бора
явилось:*

- *вычисление постоянной Ридберга
для водородоподобных систем и*
- *объяснение структуры их
линейчатых спектров.*

Бору удалось *объяснить линии
спектра ионизованного гелия.*





H_{α}

H_{β}

H_{γ}

H_{δ}

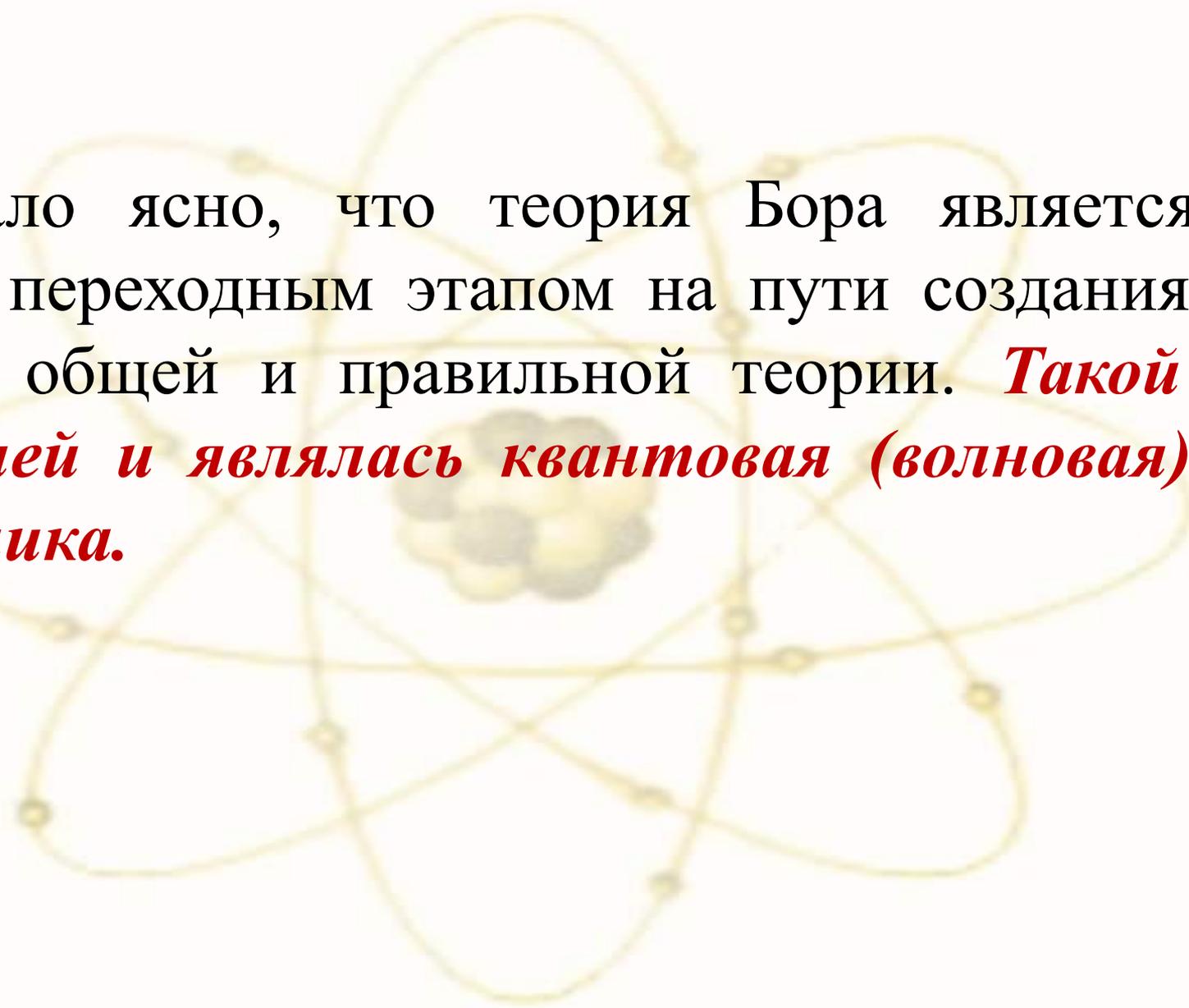
Бор теоретически вычислил отношение массы протона к массе электрона $m_p/m_e = 1847$, это находится в соответствии с экспериментом. Все это было важным подтверждением основных идей, содержащихся в теории Бора.

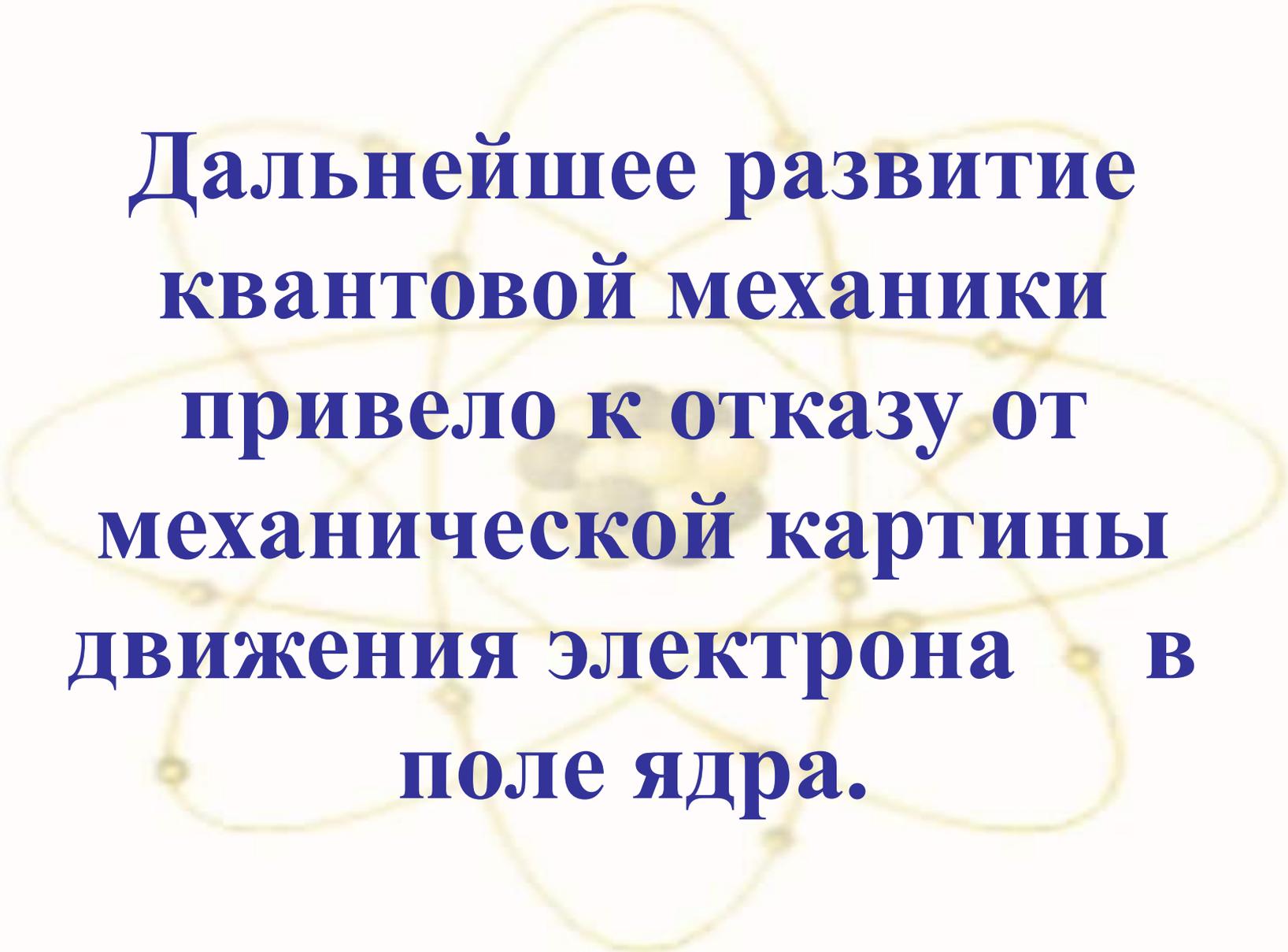
Теория Бора сыграла огромную роль в создании атомной физики. В период ее развития (1913 – 1925 г.г.) были сделаны важные открытия, навсегда вошедшие в сокровищницу мировой науки.

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

- Главнейшее – **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.*





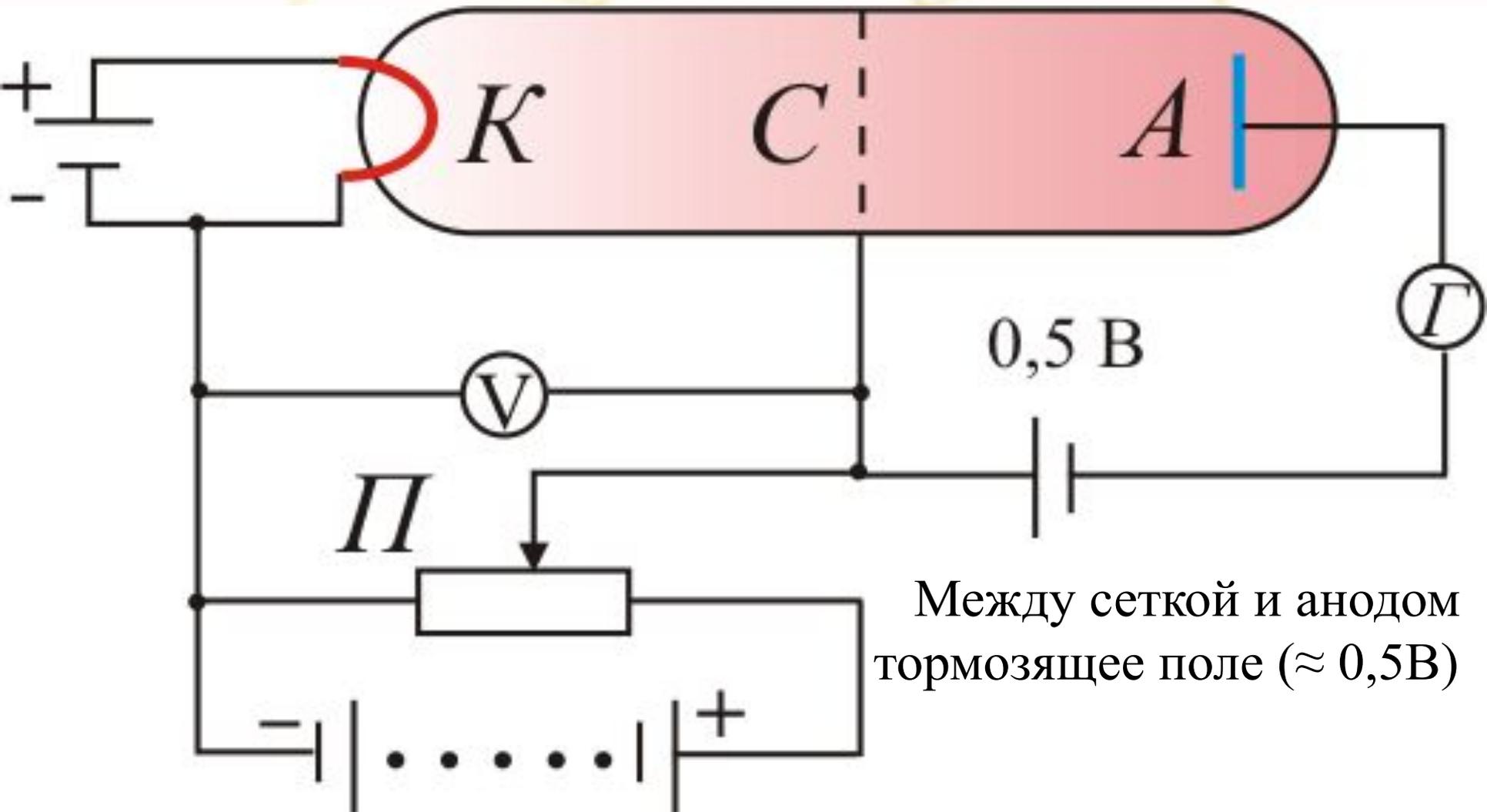
**Дальнейшее развитие
квантовой механики
привело к отказу от
механической картины
движения электрона в
поле ядра.**

1.4. Опыт Франка и Герца.

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

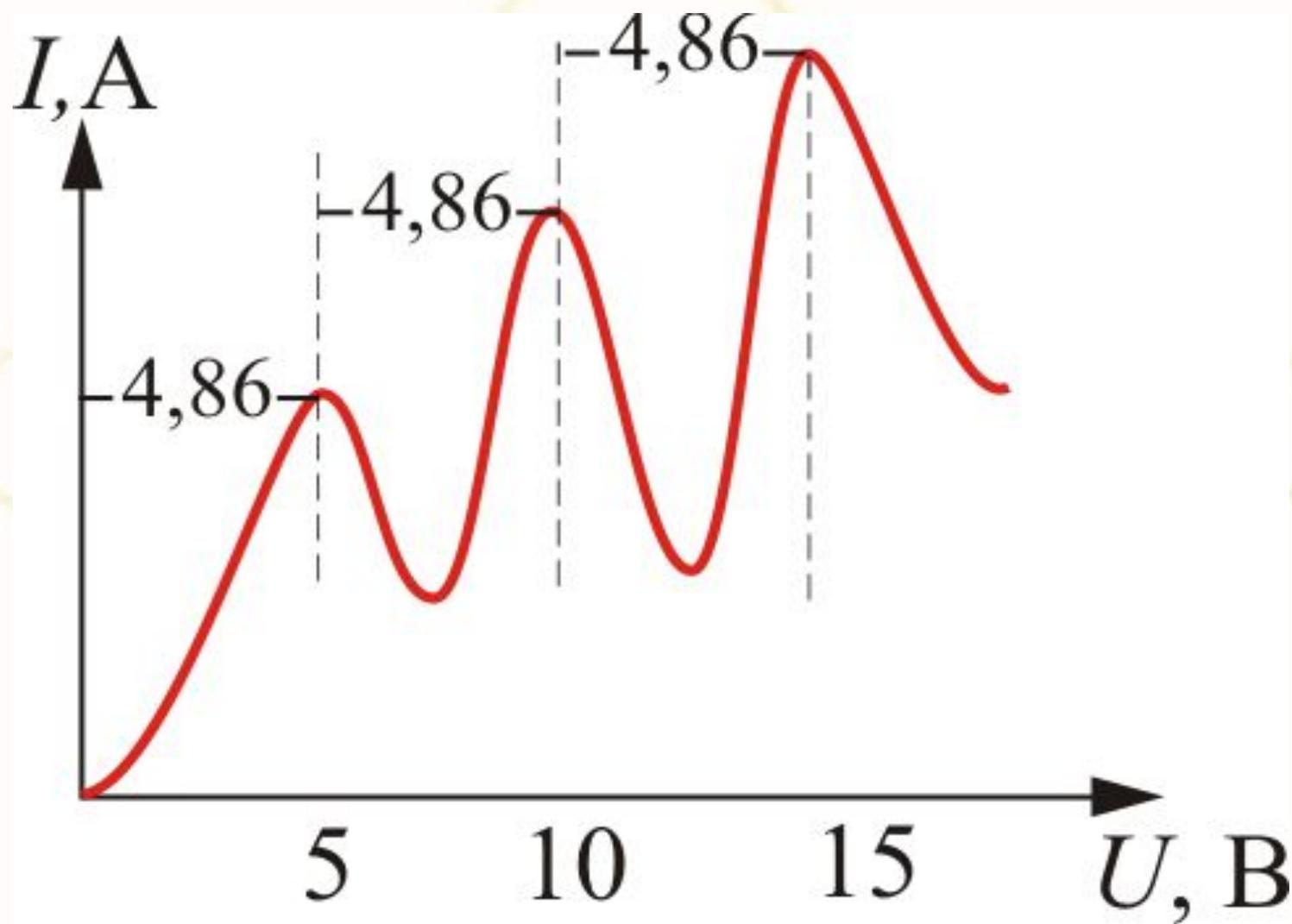
Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц, за экспериментальные исследования дискретности энергетического уровня получили Нобелевскую премию в 1925 г.

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.

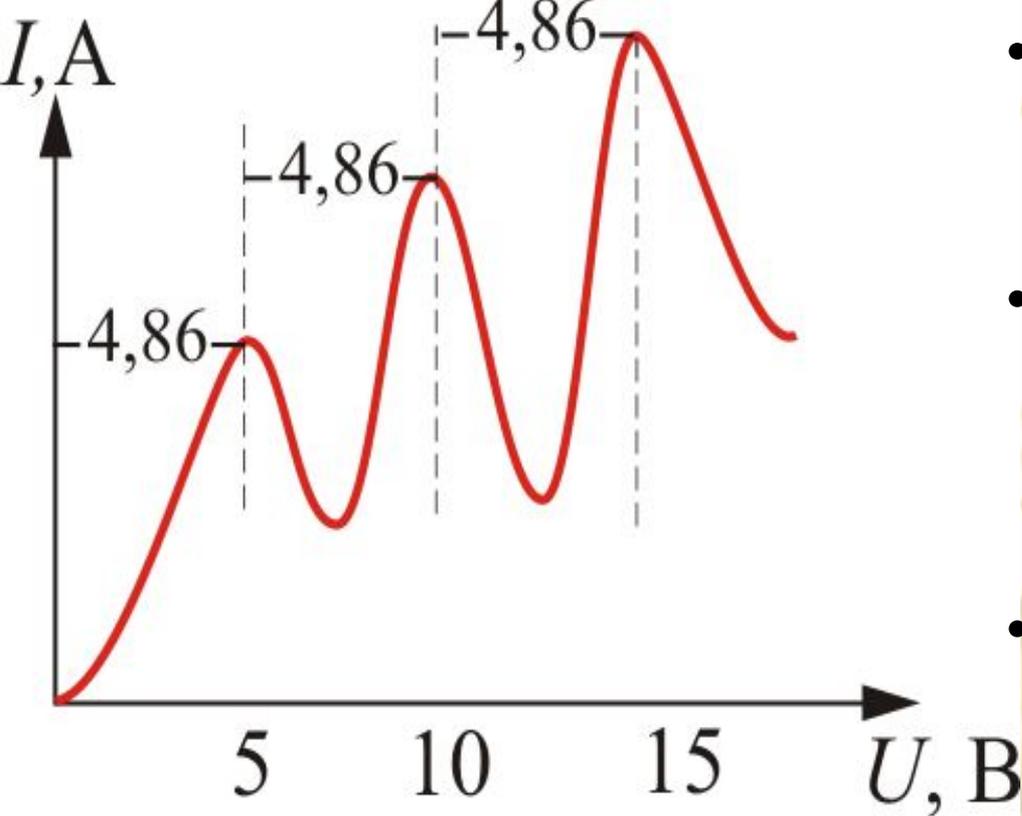


Между сеткой и анодом тормозящее поле ($\approx 0,5\text{В}$)

Зависимость тока через гальванометр (I) от разности потенциалов между катодом и сеткой (U):



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



- при увеличении U вплоть до 4,86 В 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 A , 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):**

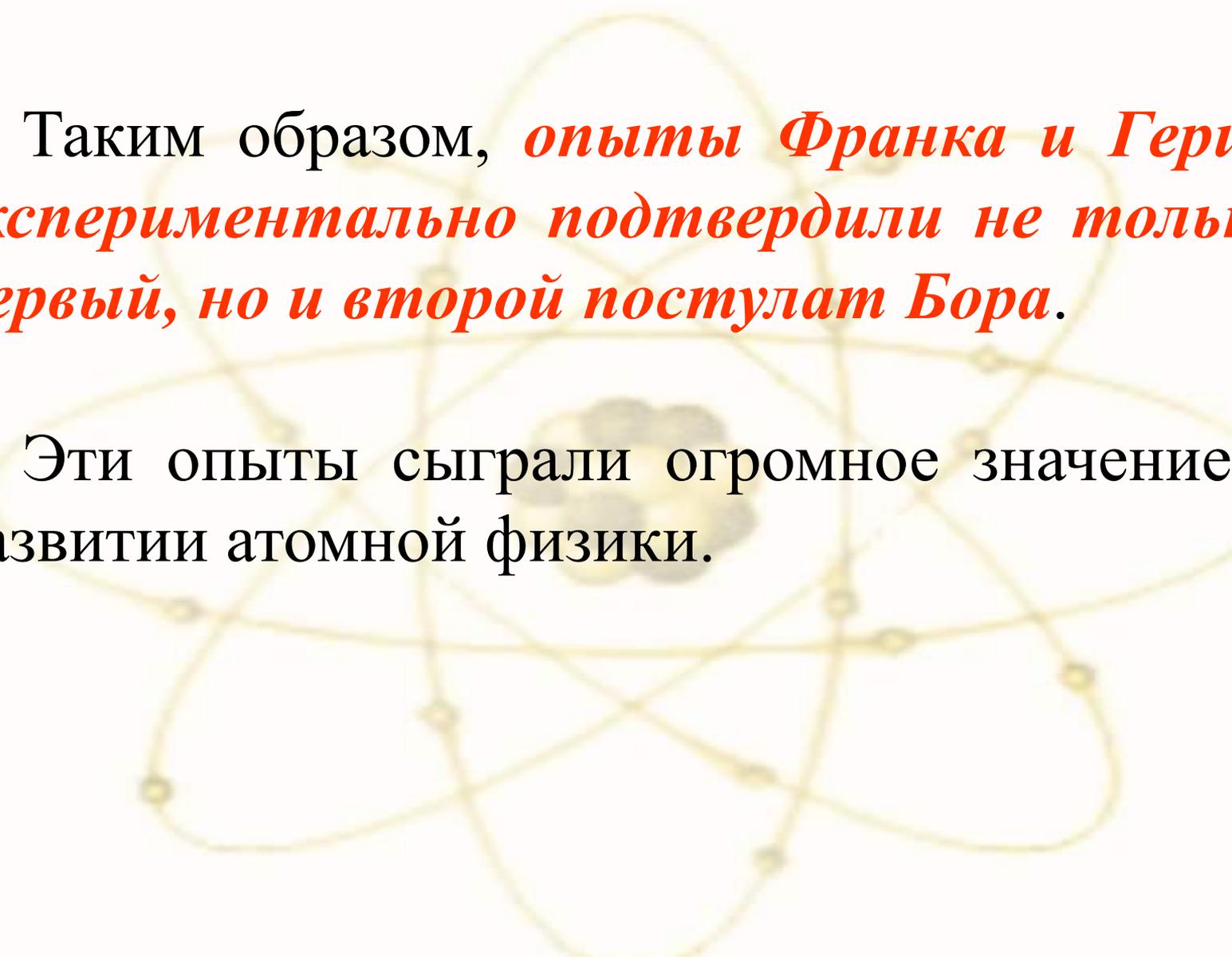
$$\nu = \frac{\Delta E_1}{h}$$

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.