

Сегодня: *

Лекция №6. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора.



Курбанисмаилов В.С.¹

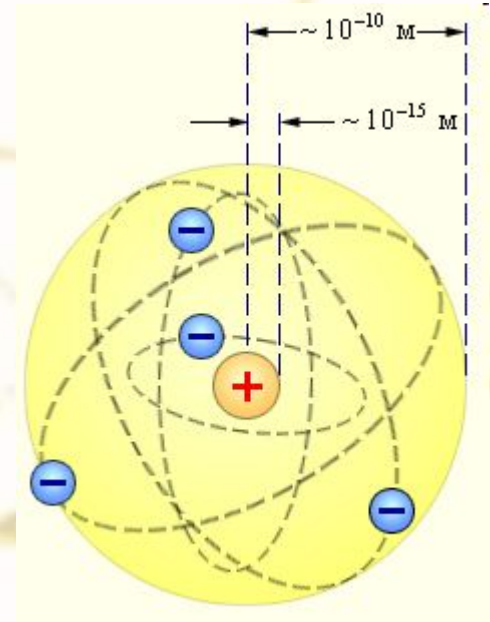
Тема 1. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора.

1.1. Закономерности в атомных спектрах.

1.2. Ядерная модель атомов.

1.3. Элементарная теория Бора.

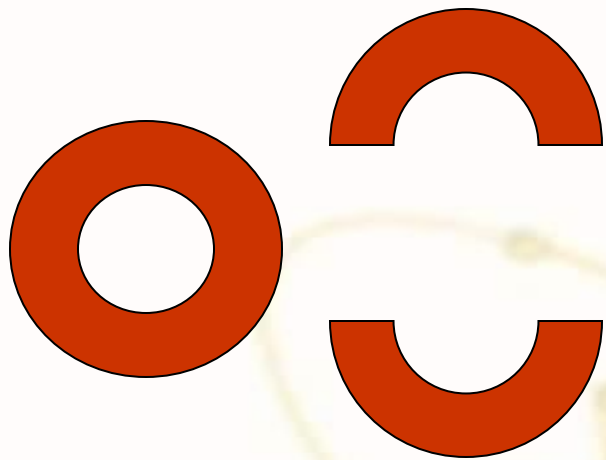
1.4. Опыт Франка и Герца.



Концепция атомизма



1. Дихотомия Демокрита



Легенда о яблоке

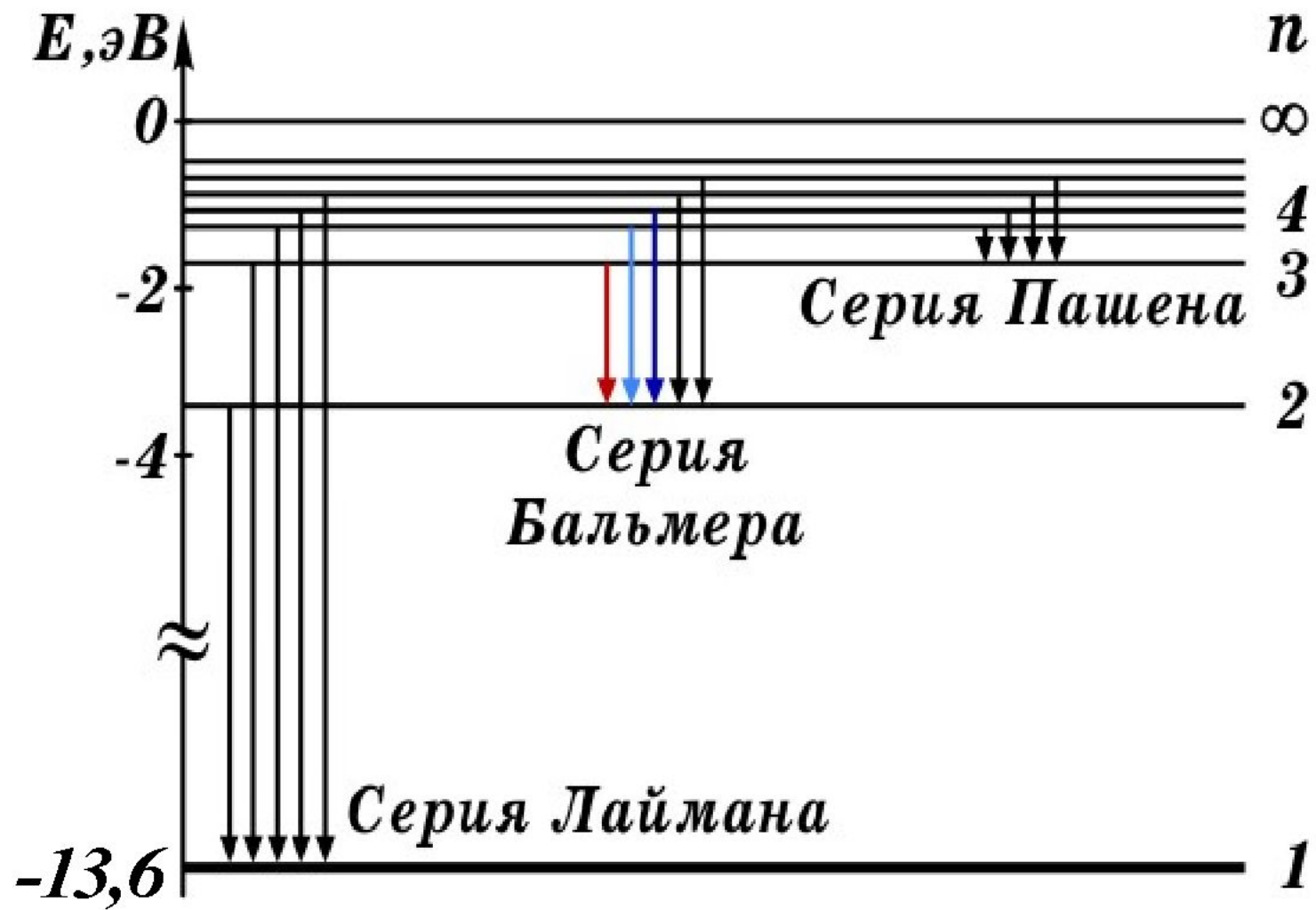


1.1. Закономерности в атомных спектрах.

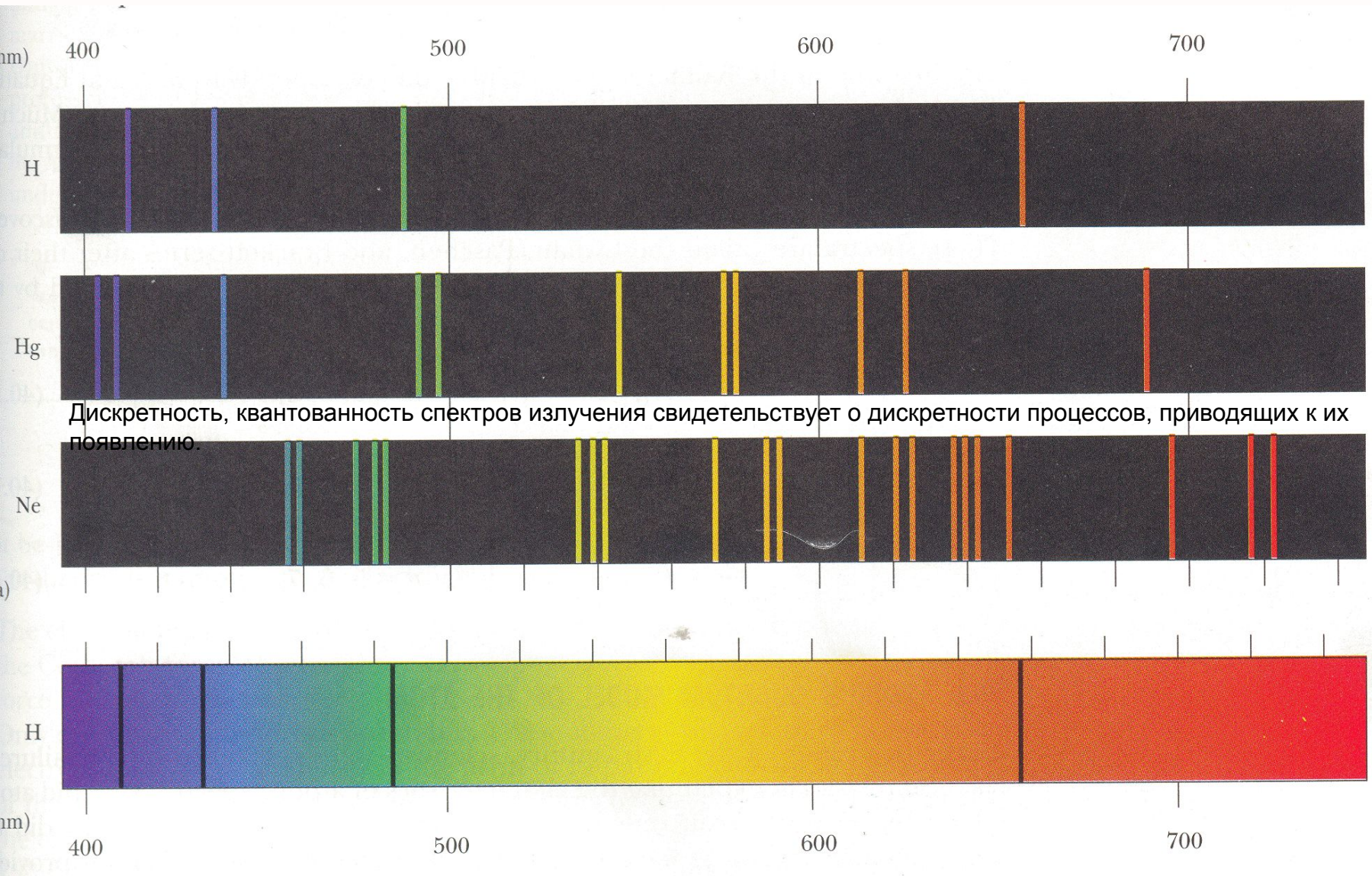
Итак, что же такое атом?

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.



H



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*

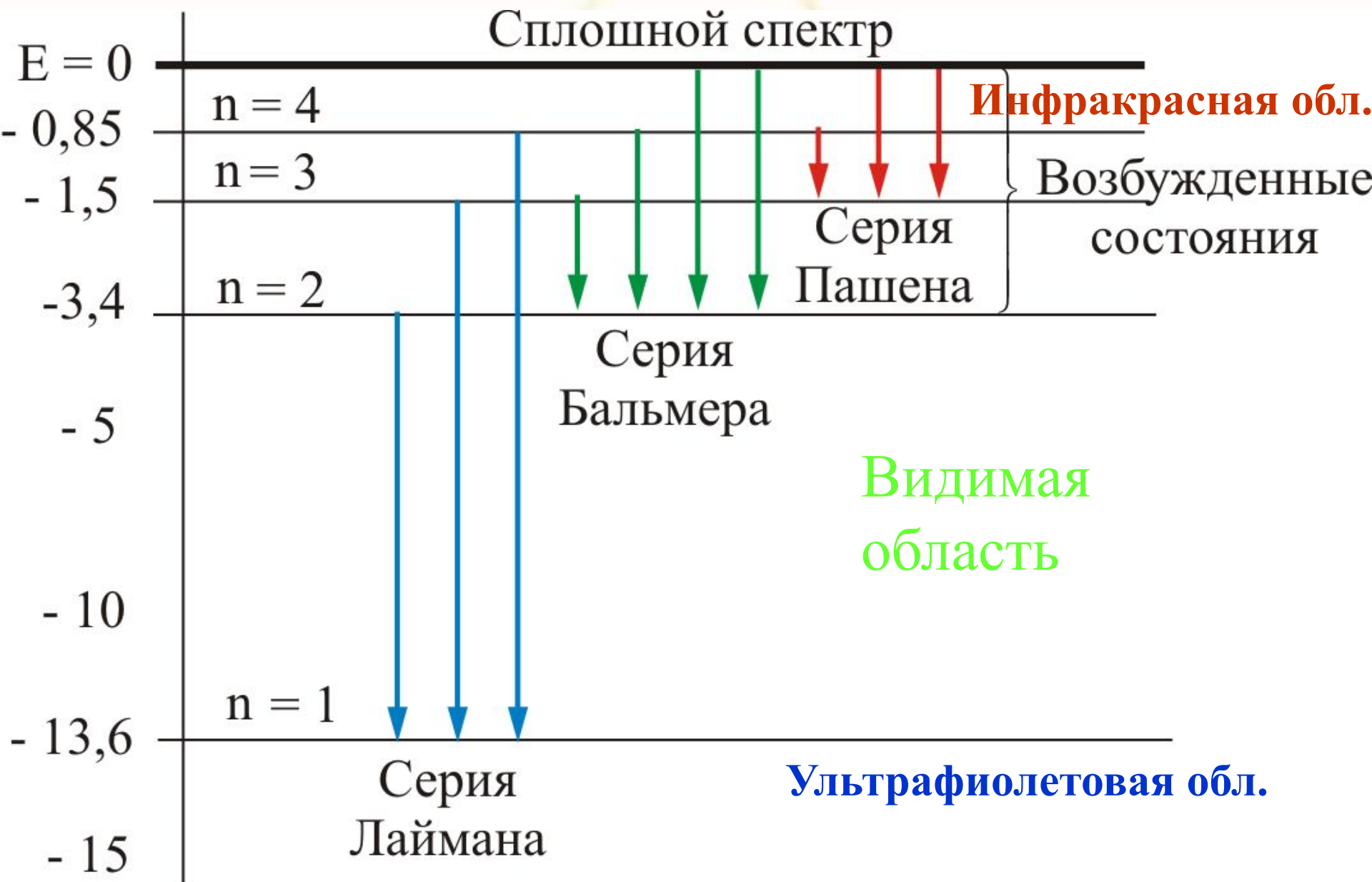
$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

или

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

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

Атом сложная система, имеющая сложный спектр



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

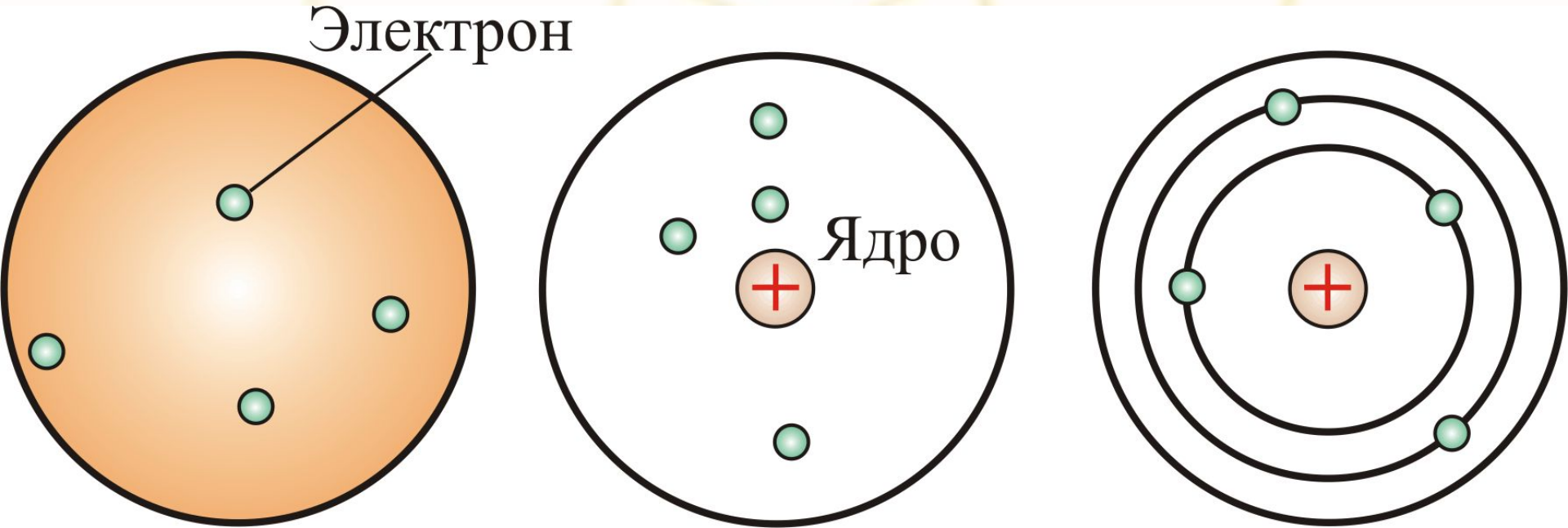
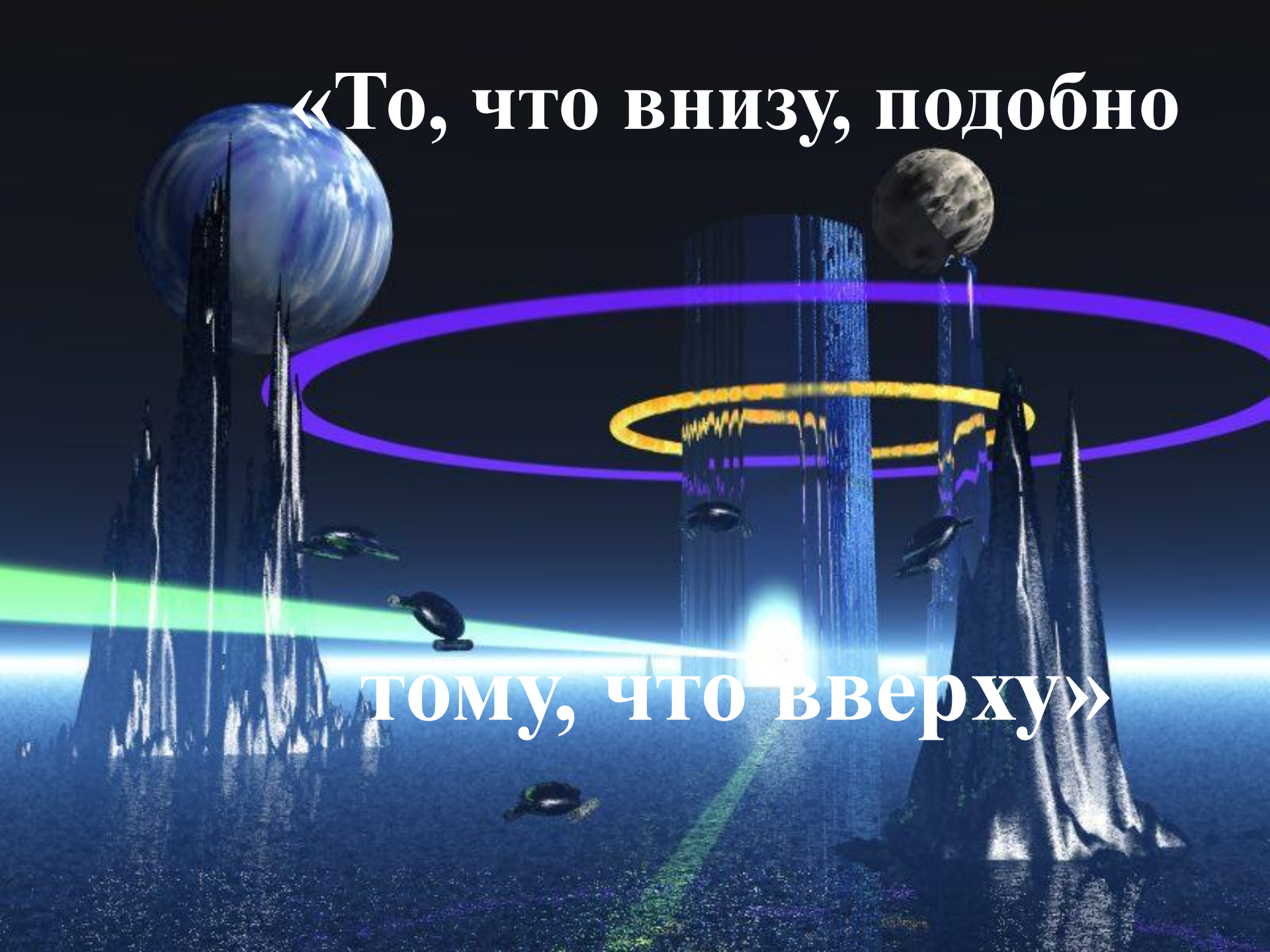


Рисунок 1.2

«То, что внизу, подобно

тому, что вверху»



Планетарная модель строения



атома








Конец XIX -



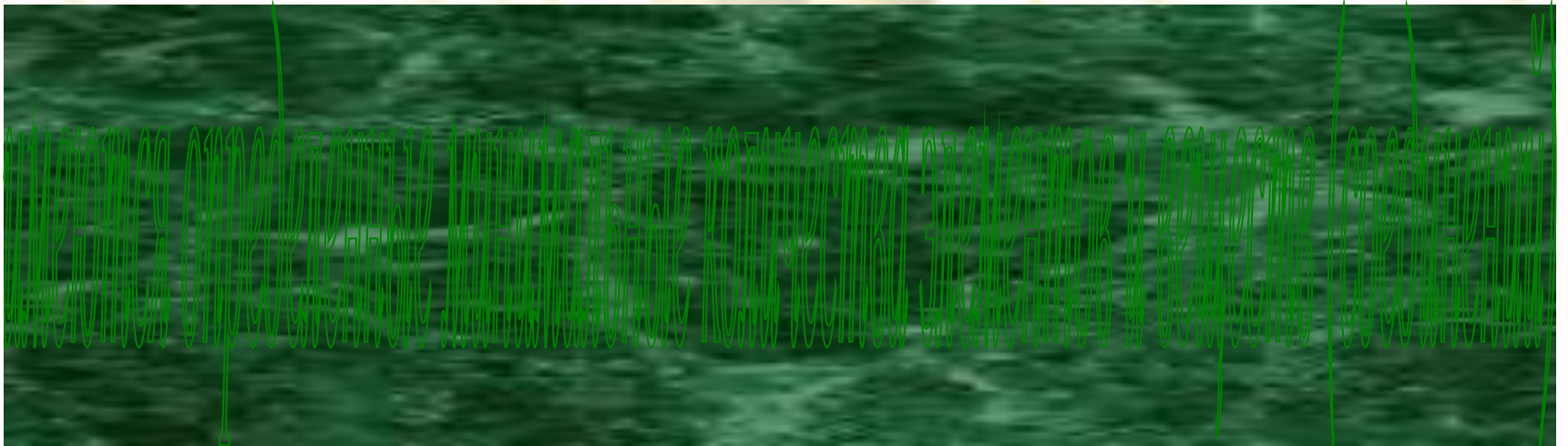
- начало XX века

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:

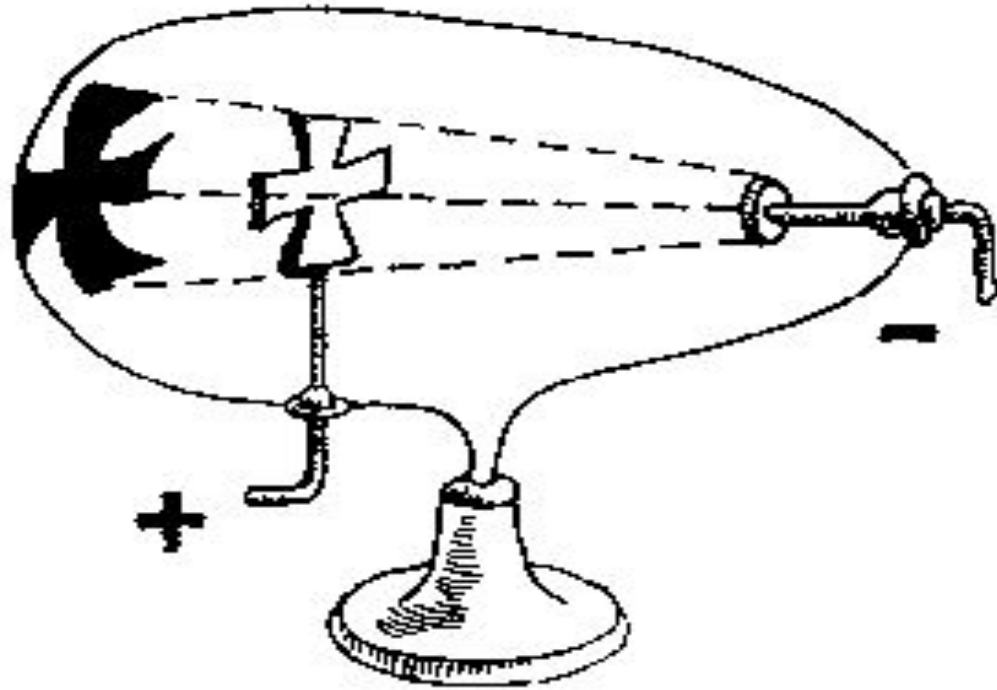


Проблема внутреннего строения атома

Открытие электрона

Исследование тока в разреженных газах

Трубка Крукса



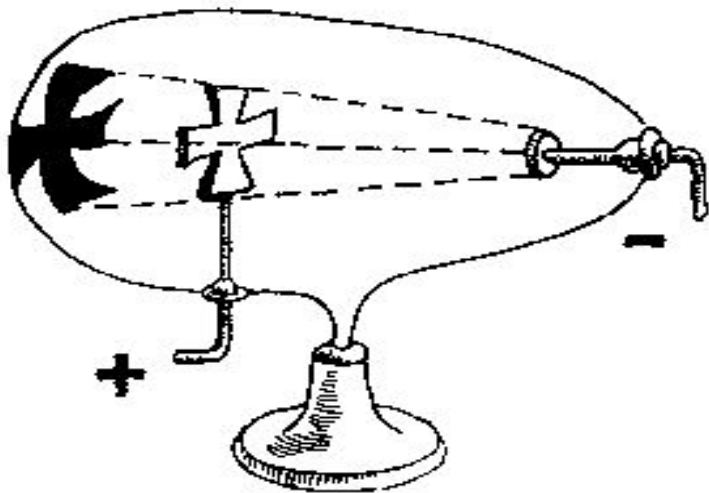
катодные лучи ("лучистая материя", "4 состояние")

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**



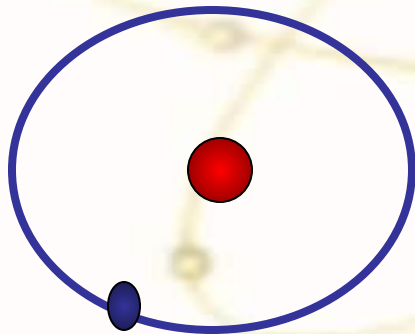
**1896 - основание
ТШУ!**

**1897 - открытие
электрона**

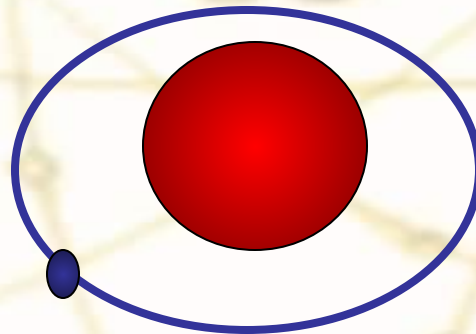


**Физики
«отобрали»
атом у
ХИМИКОВ**

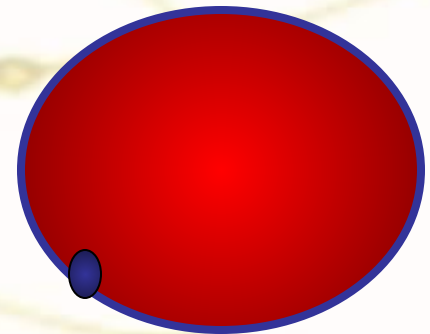
**Были предложены
различные модели
строения атома.**



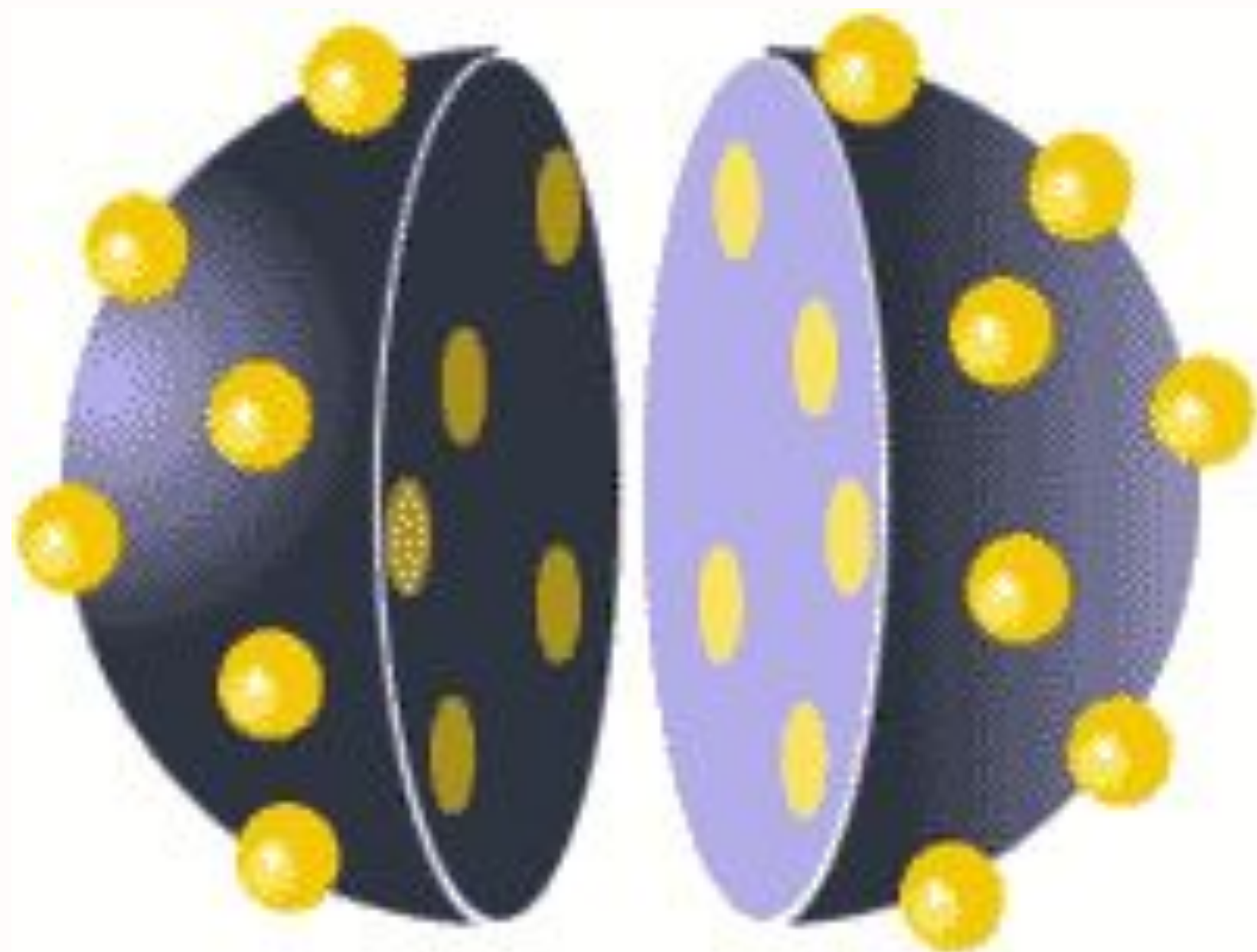
1



2



3



Пудинговая модель

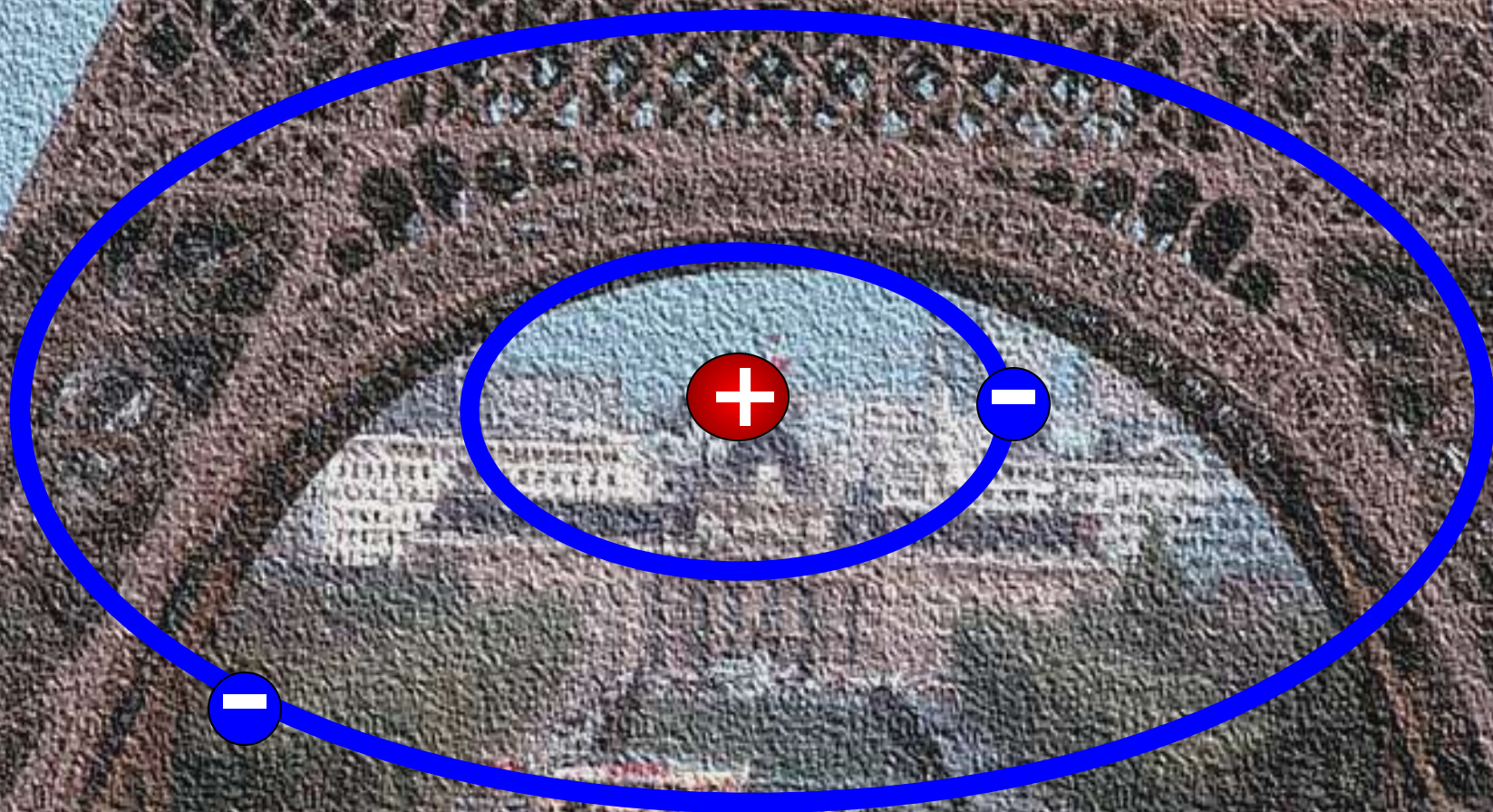
An ancient Egyptian stone relief depicting two figures, likely Hermes Trimegistos, standing and facing each other. The figures are shown in profile, wearing traditional Egyptian clothing. The background is filled with hieroglyphs and other smaller figures, suggesting a complex scene or narrative. The relief is carved into a dark, textured stone surface.

«То, что находится внизу,

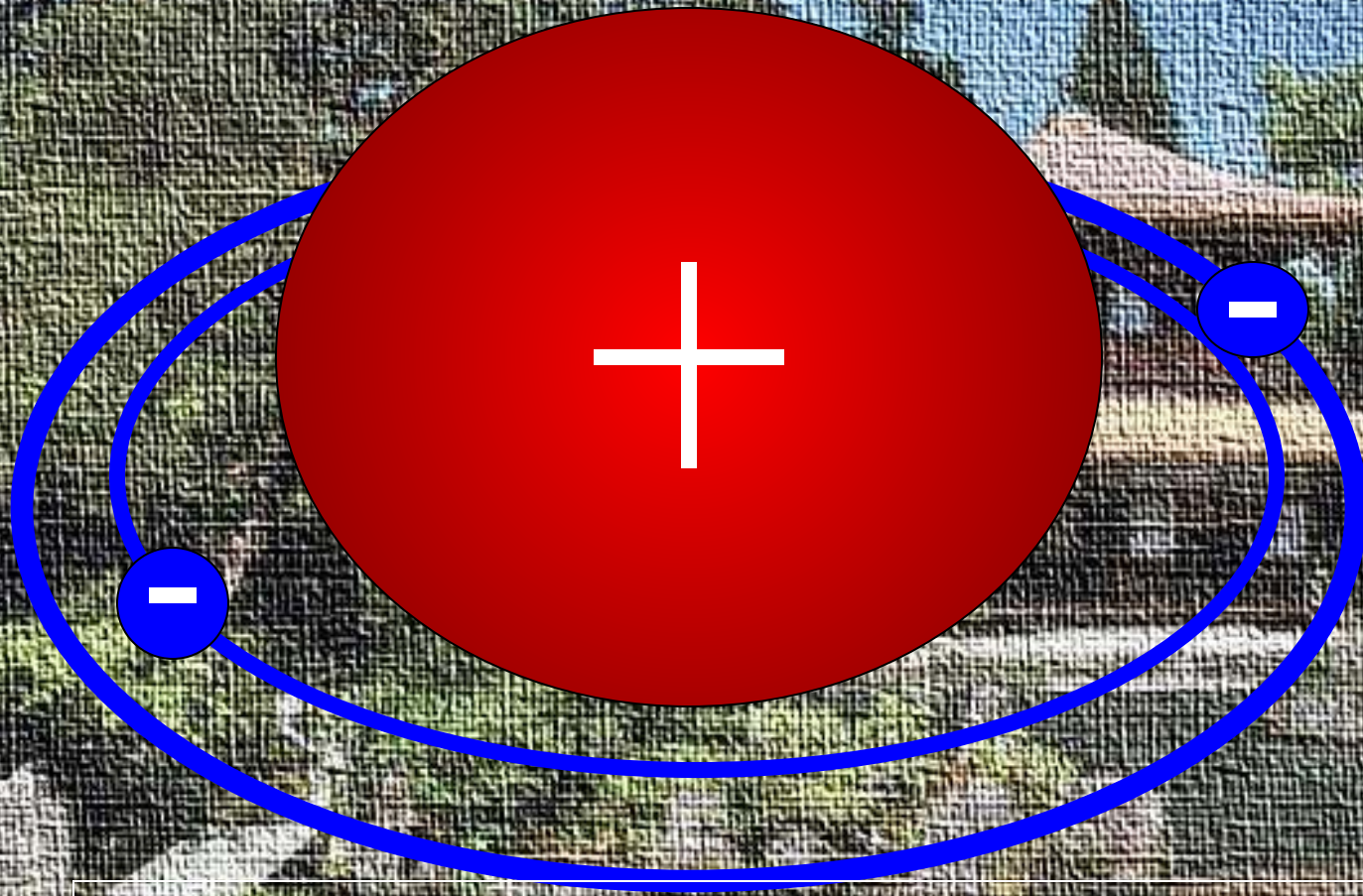
подобно тому,

что находится вверху»

**Гермес Тримегист
(древний Египет)**

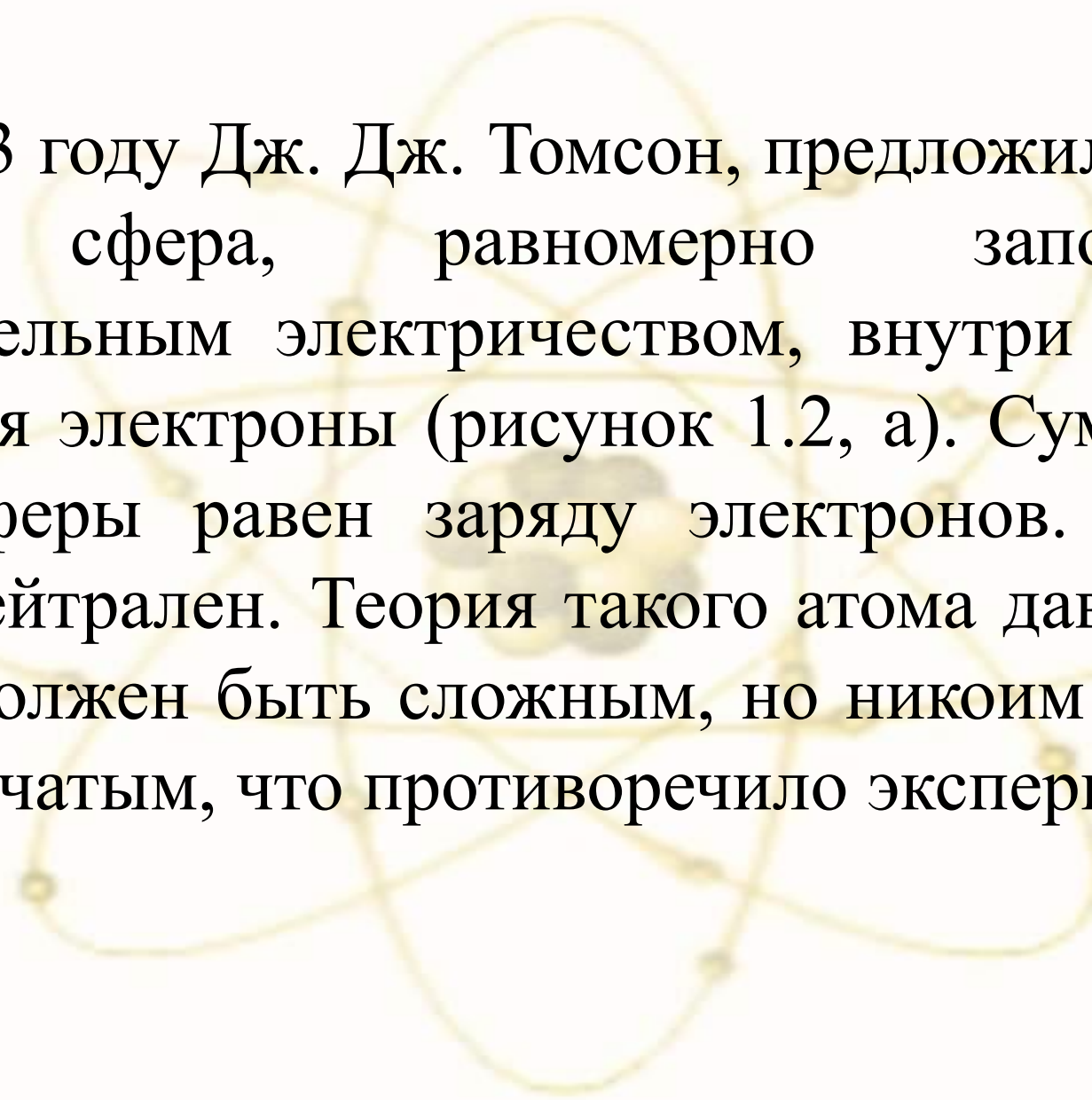


**Модель Ж. Перрена
(1901)**

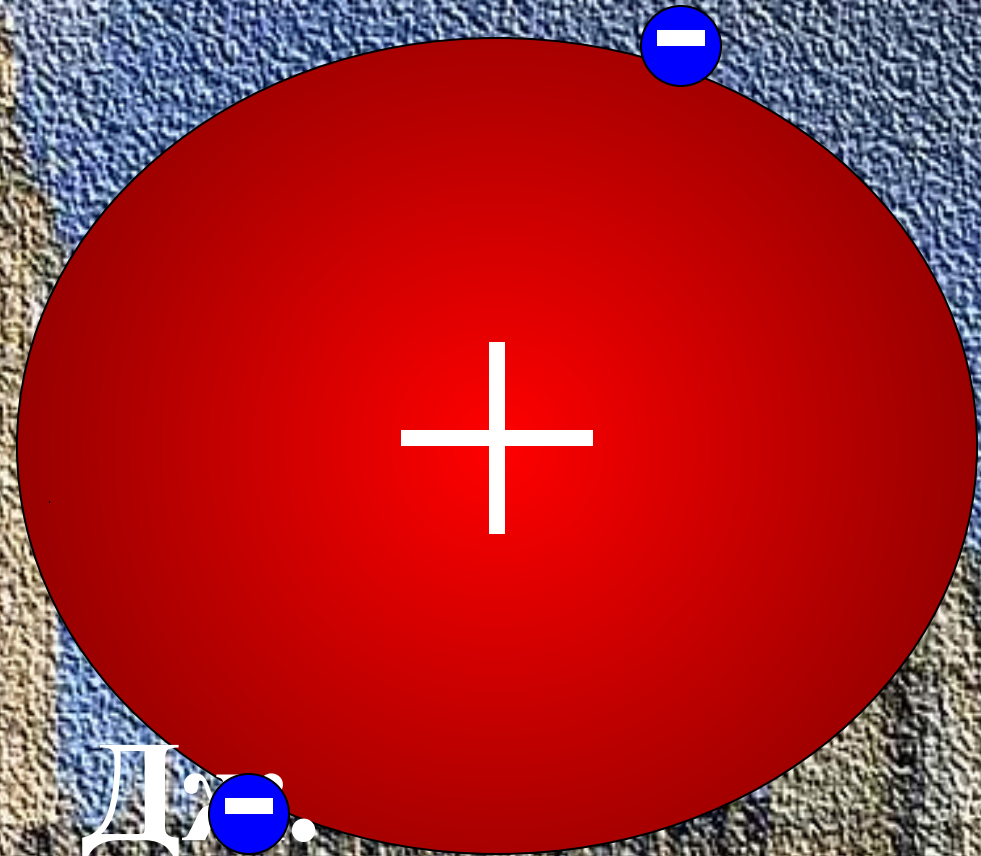


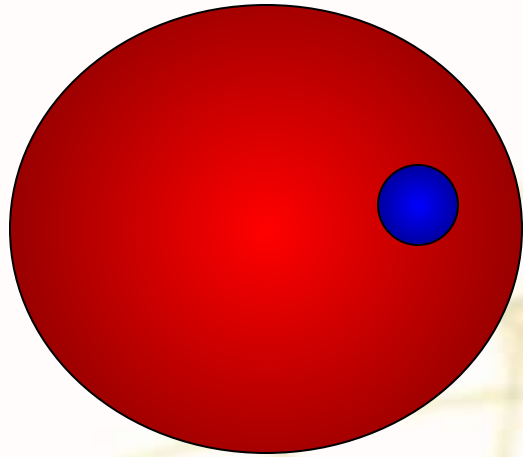
Модель Х. Нагаока
(1904)

В 1903 году Дж. Дж. Томсон, предложил модель атома: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны (рисунок 1.2, а). 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.

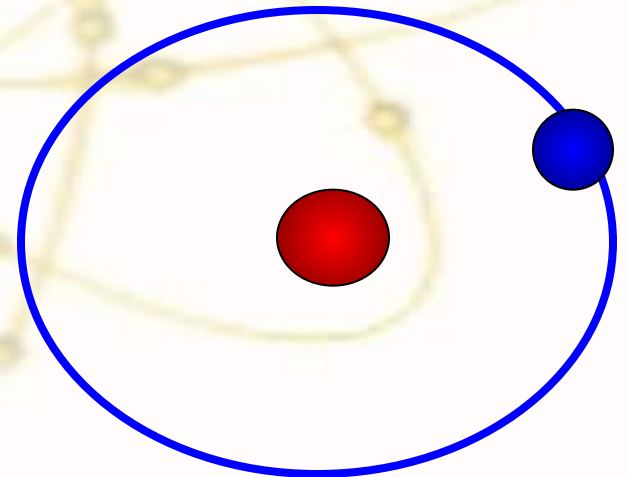


Модель Д.
Дж Томсона
(1904)





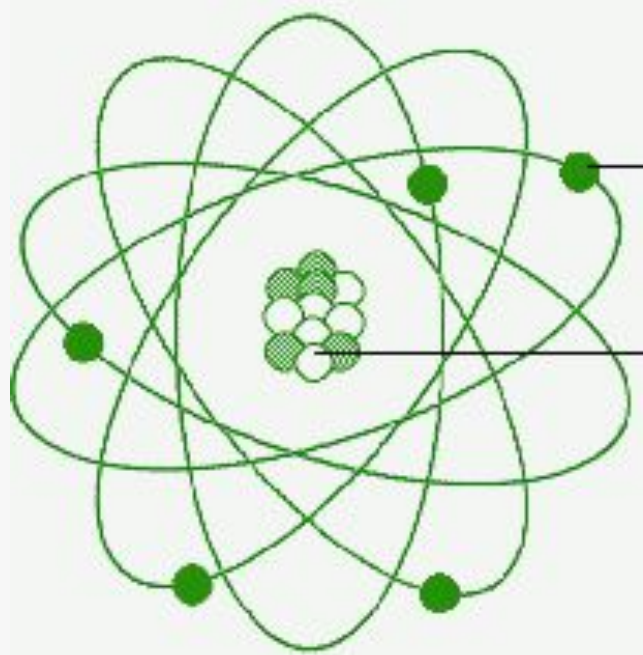
**Какая
из моделей
верна?**



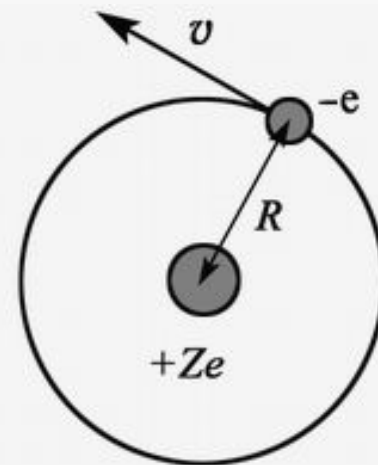
Планетарная модель строения



атома



a



б

Рис. 19. *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.

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.

RUTHERFORD

Ernest, Lord

of NELSON

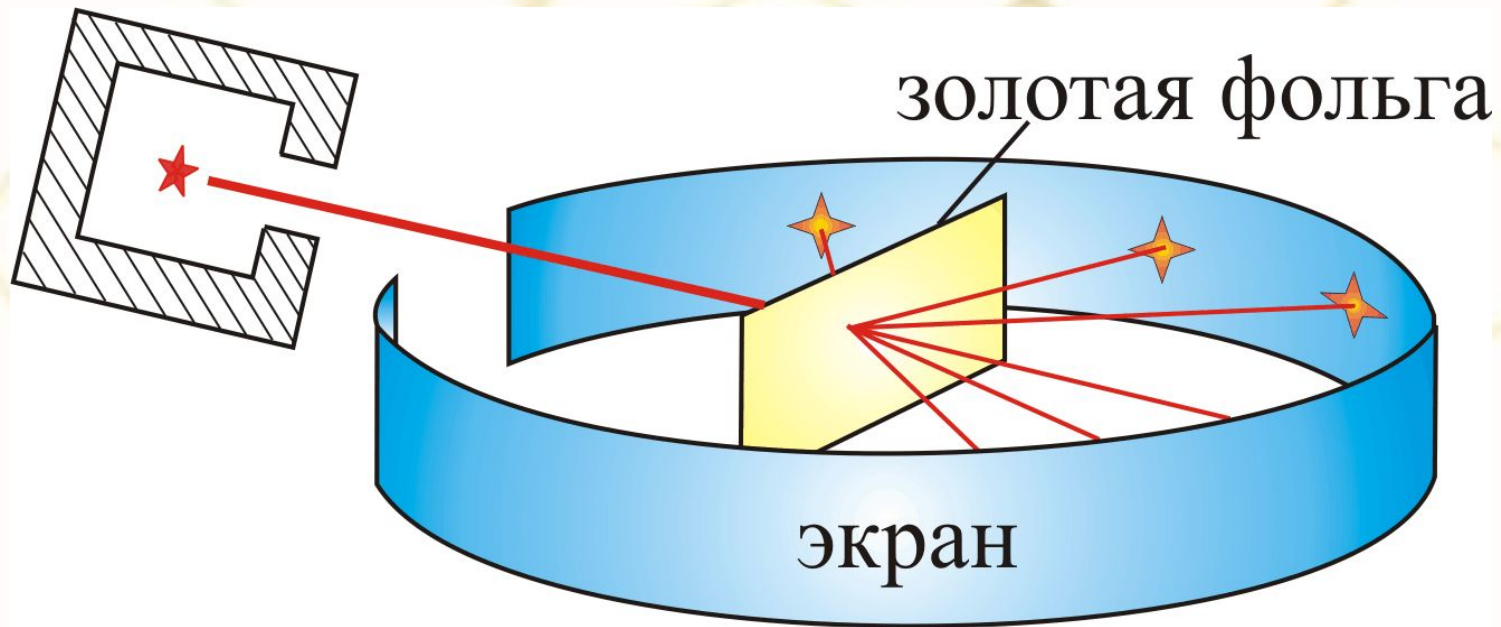
(1871-1937)

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

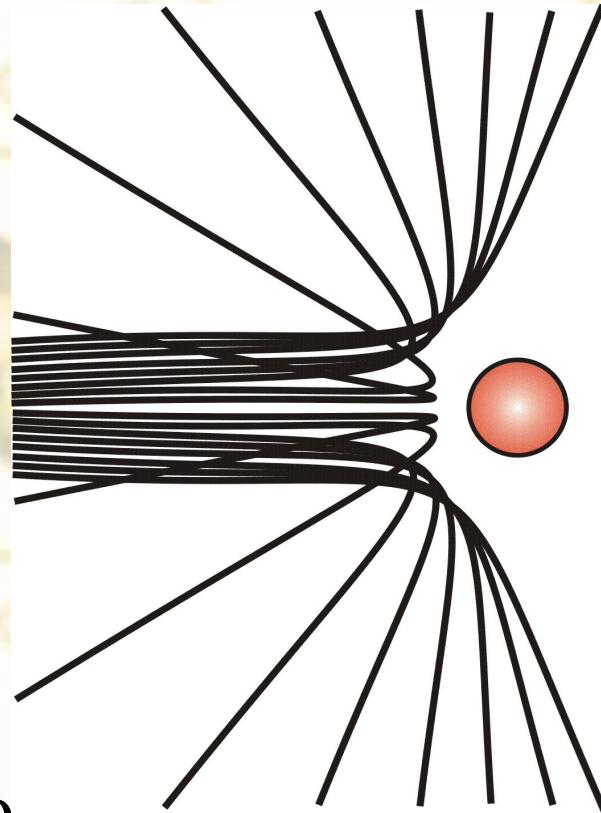
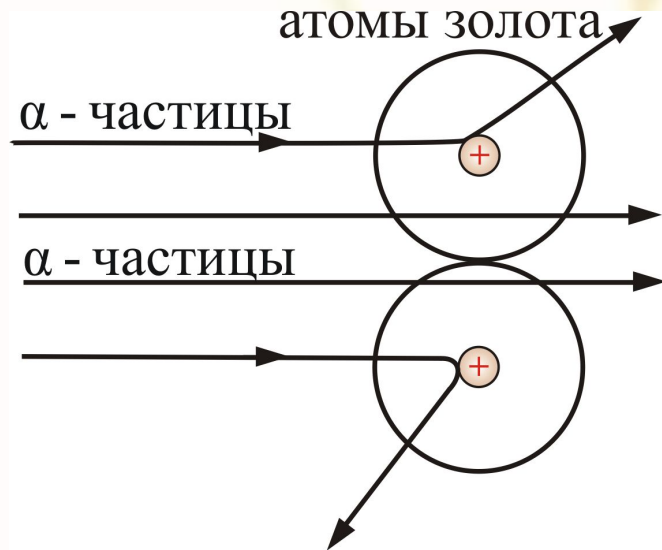


Рассеянные частицы ударялись об экран из сернистого цинка, вызывая **сцинтилляции** – вспышки света.

Количество вспышек в темноте фиксировалось через микроскоп

Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3°

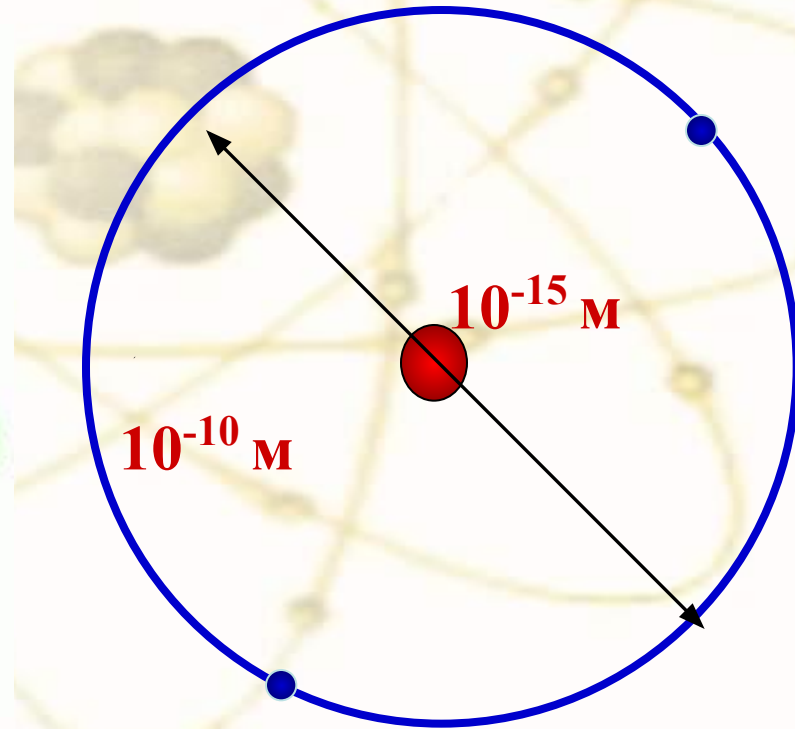
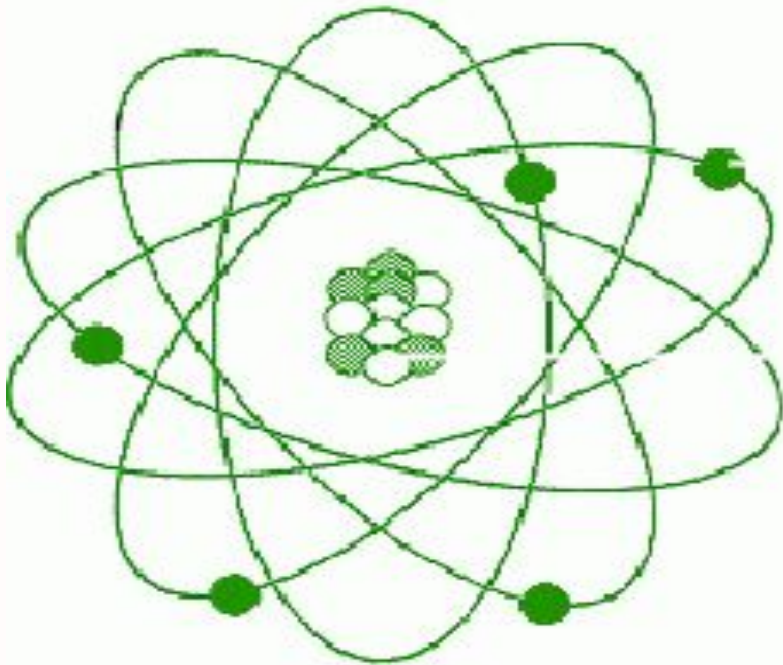
Отдельные α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)



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;

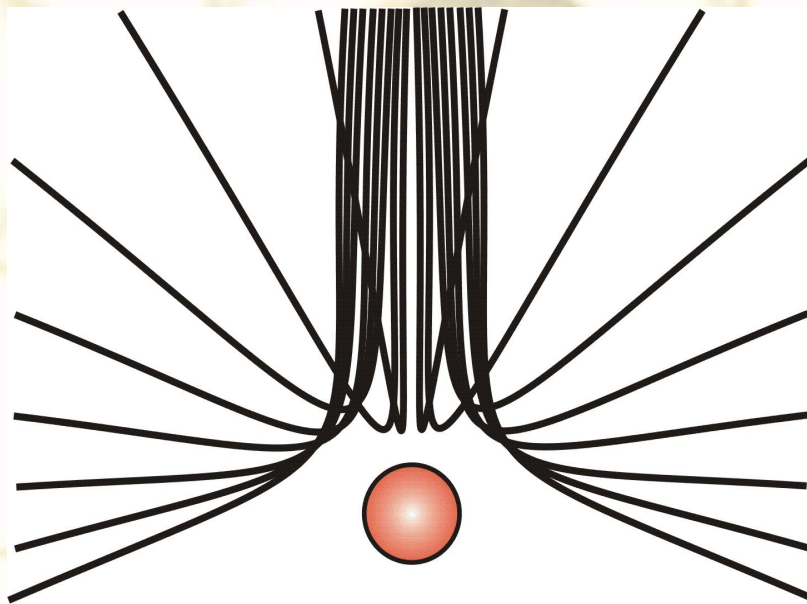
Ze – заряд ядра;

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

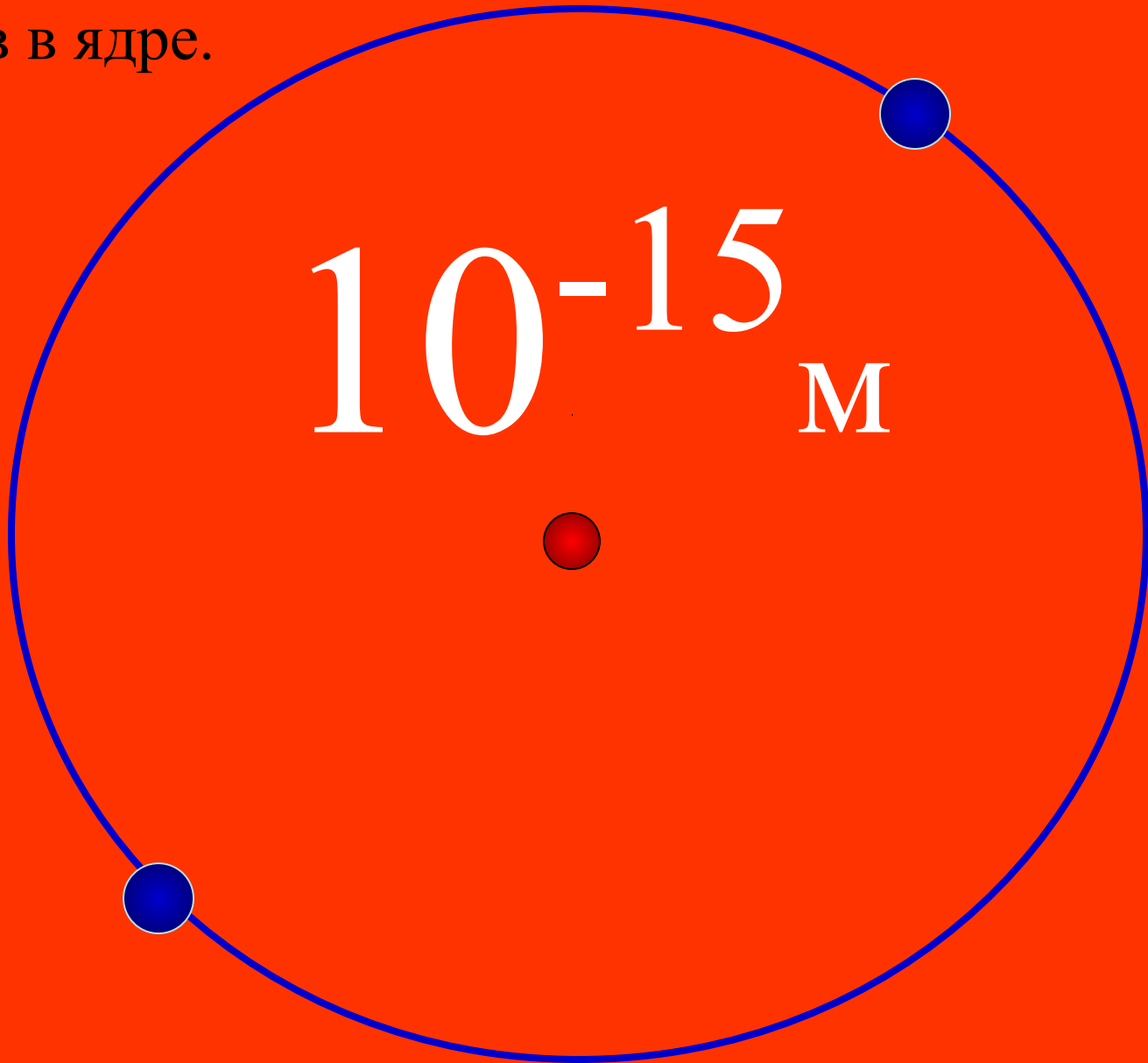


Частицы с разными прицельными параметрами отклоняются на разные углы.



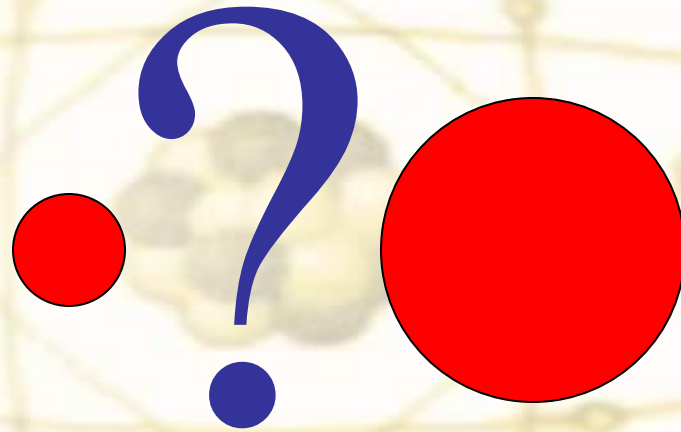
planetatom.swf

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





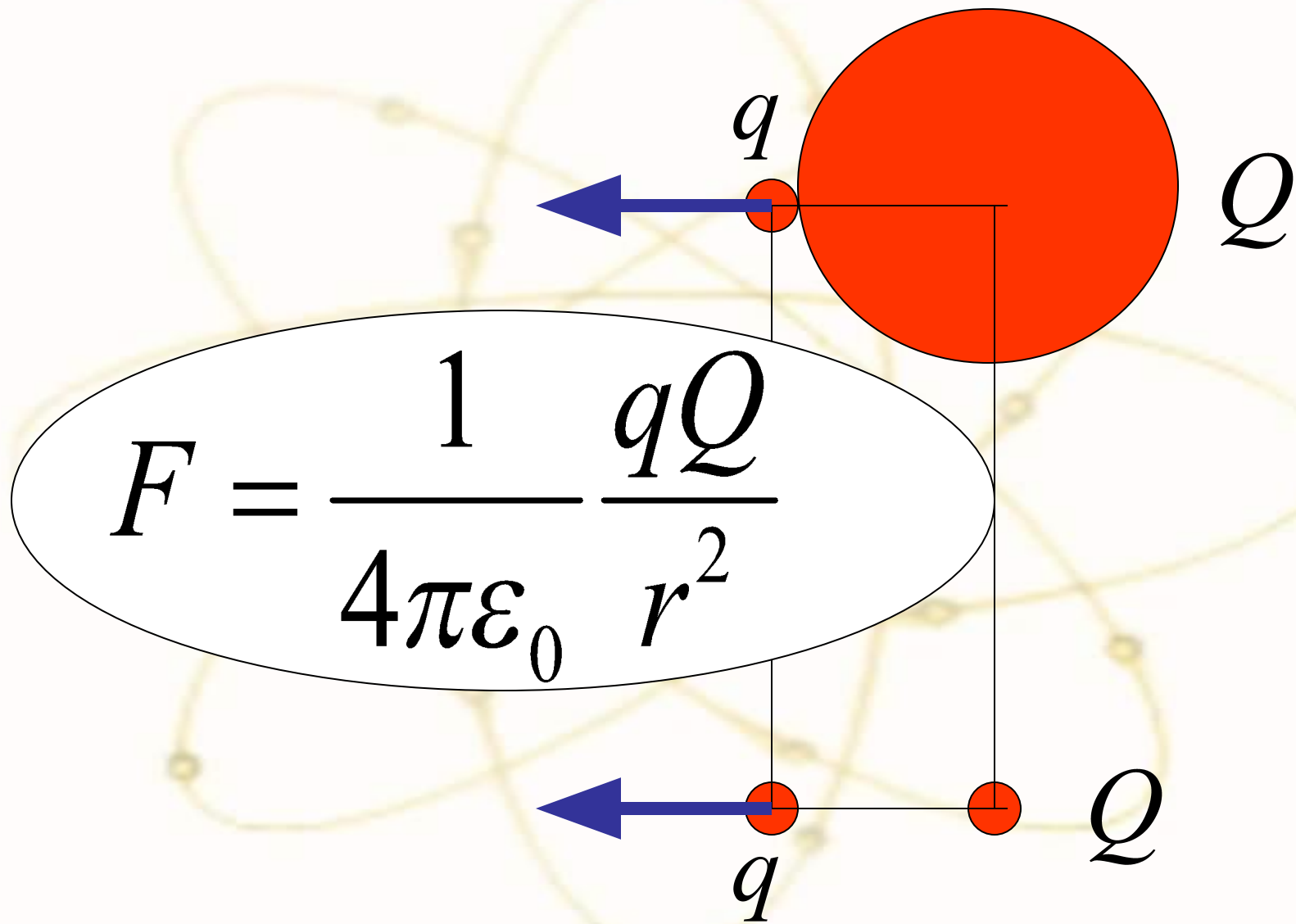
АТОМ ЗОЛОТА



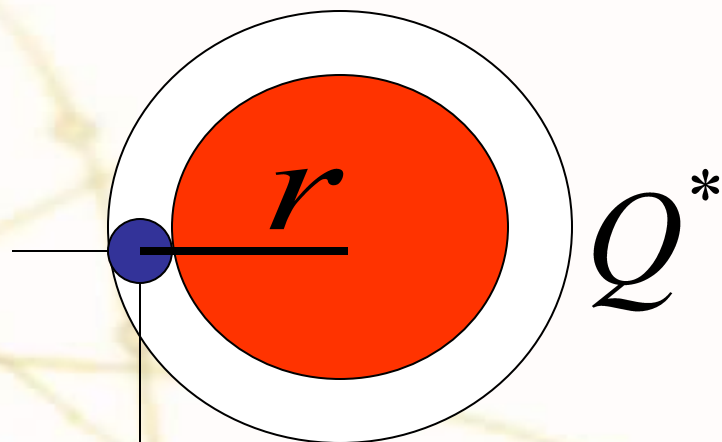
Альфа - частица



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

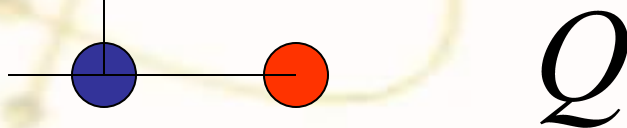


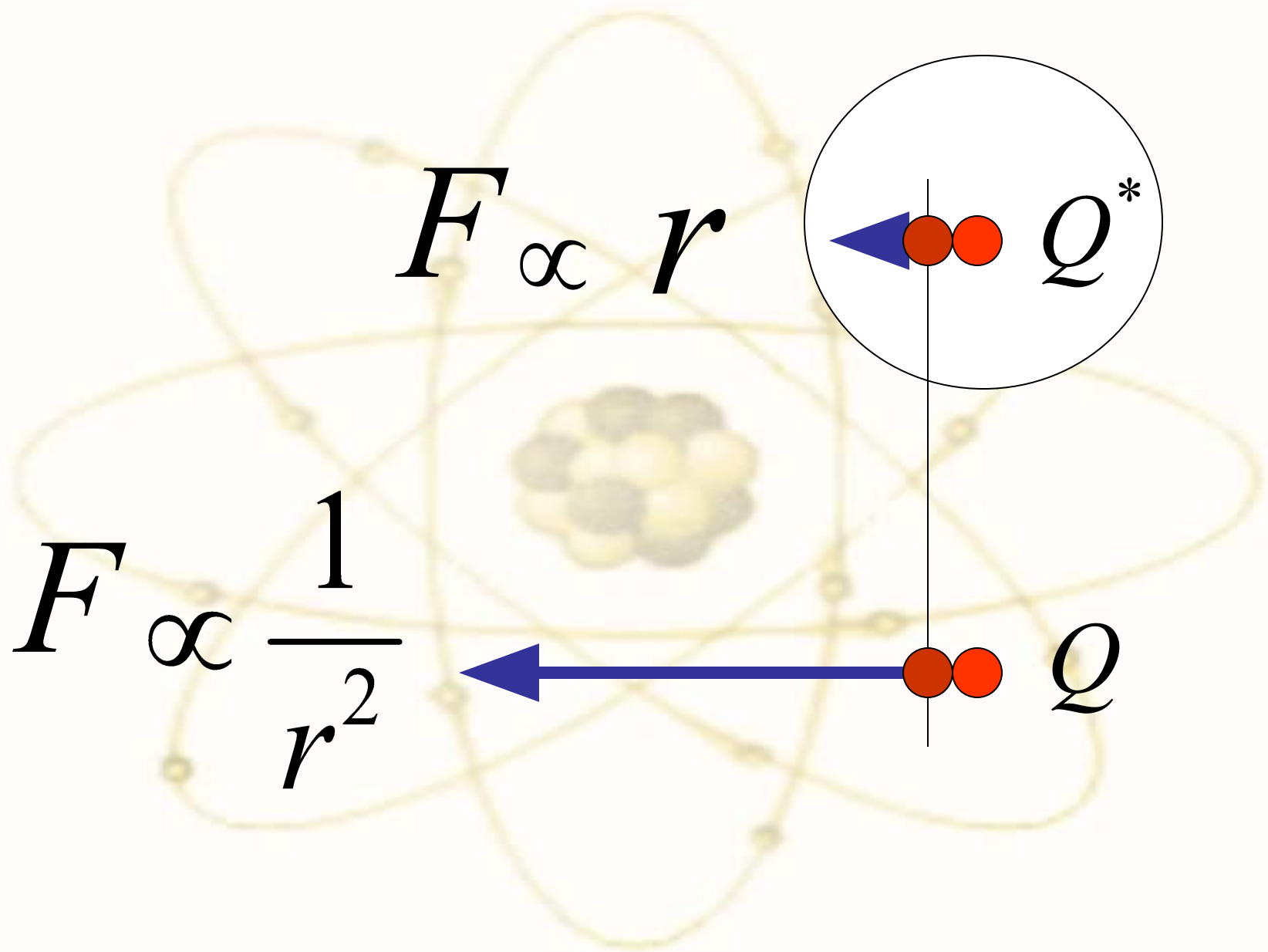
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ^*}{r^2} \propto r$$



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

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

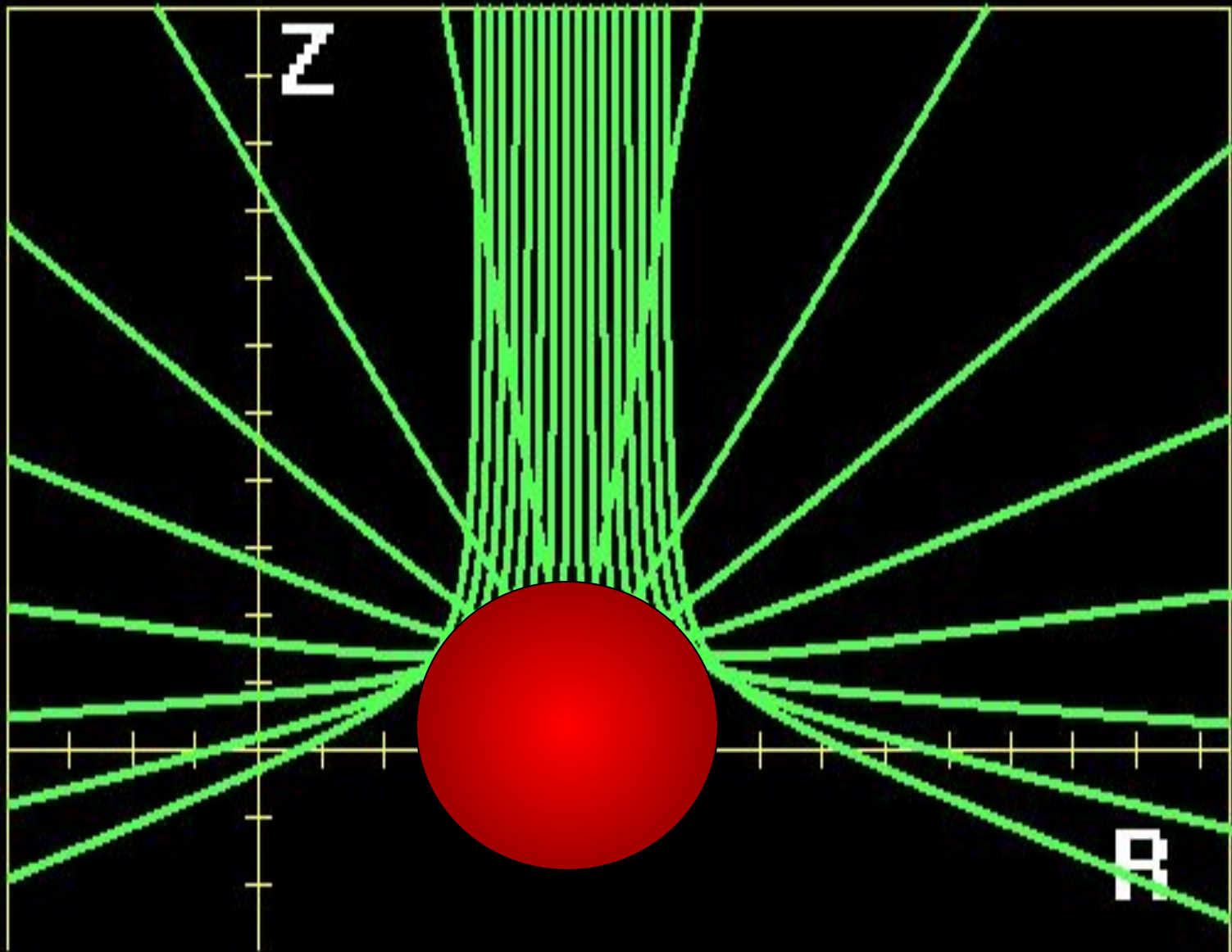




**С
ПОМОЩЬЮ**

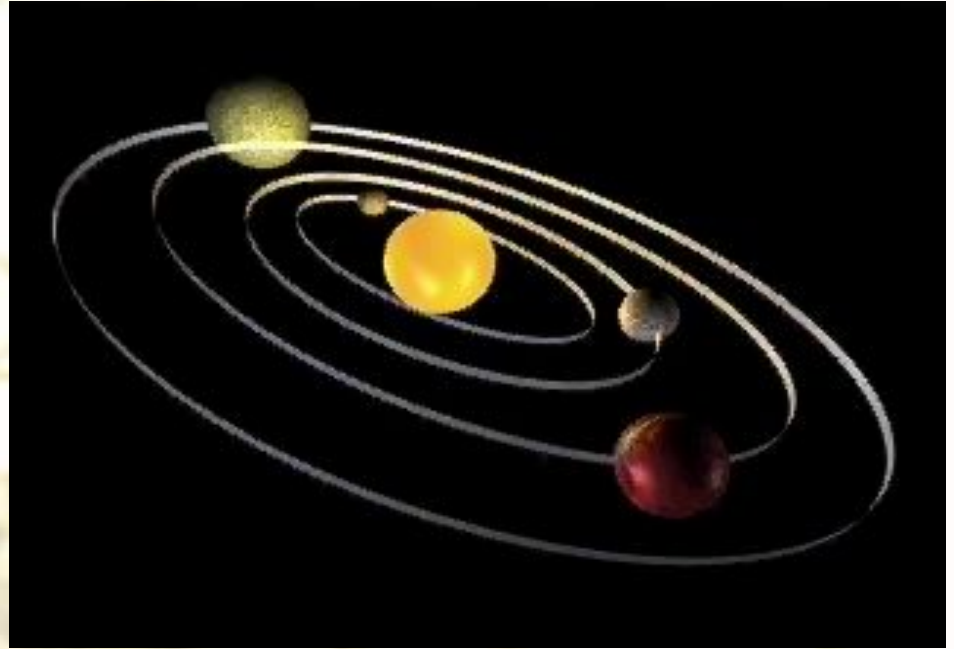
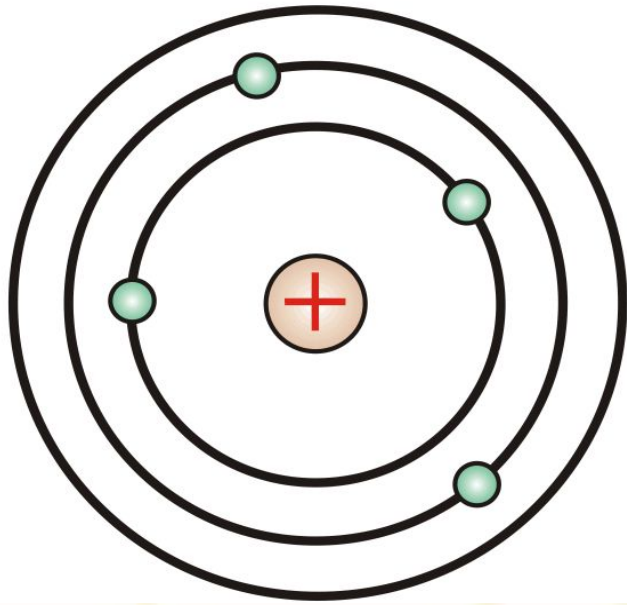
КОМПЬЮТЕРА ...





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.



***... излучать
и падать...***

Падать на ядро!

Нестабильный атом?!



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

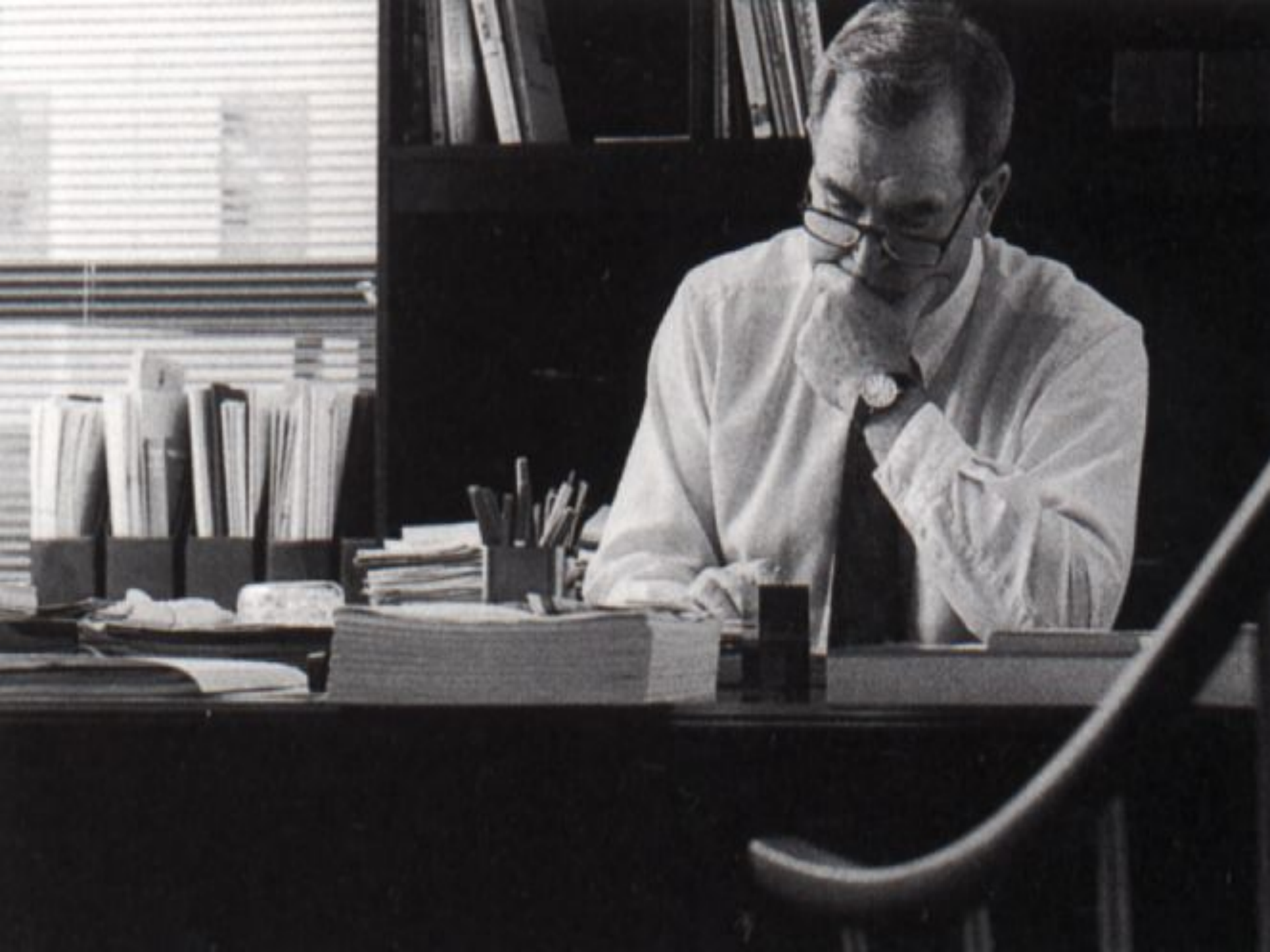
1.3. Элементарная теория Бора.




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.

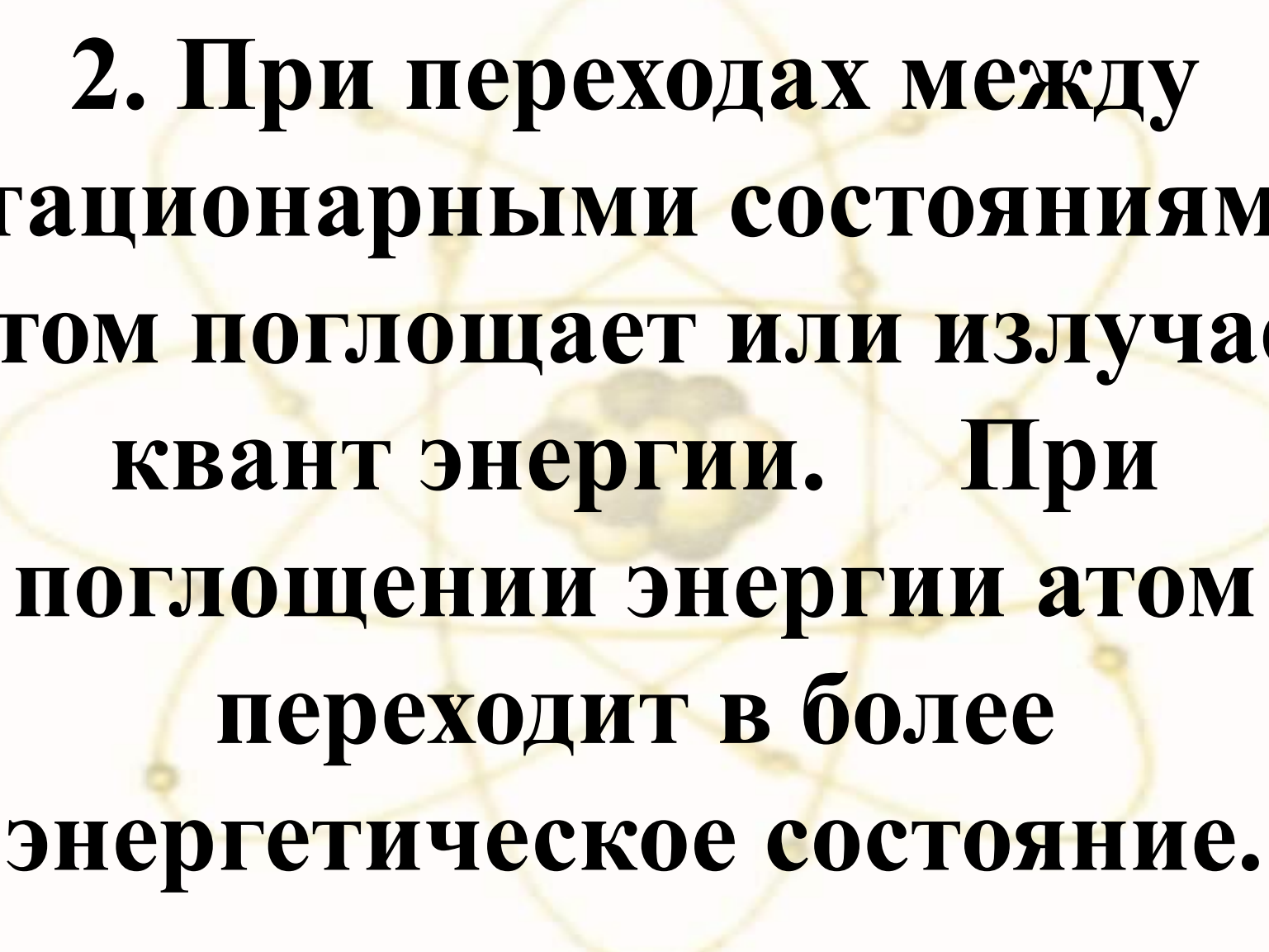




**1. Атом следует описывать
как «пирамиду»
стационарных
энергетических состояний.
Пребывая в одном из
стационарных состояний,
атом не излучает энергию.**



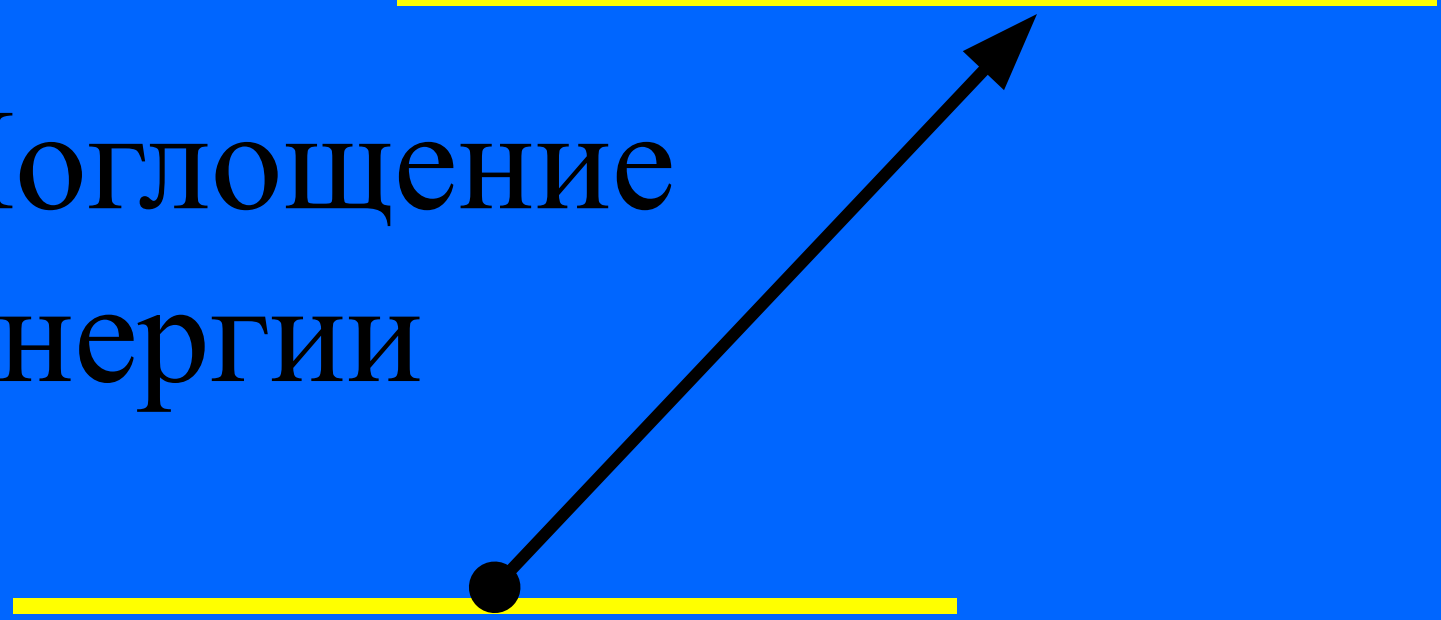
|A|
|B|
|E|



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

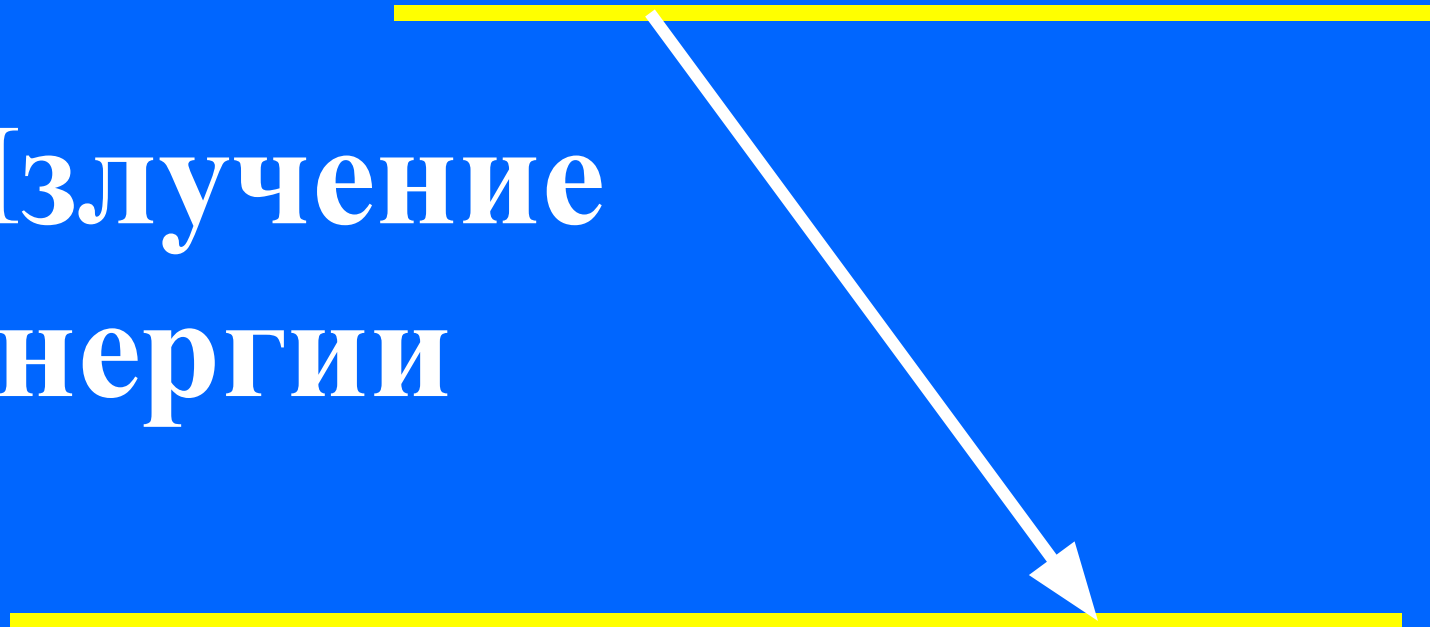


$$E_n$$

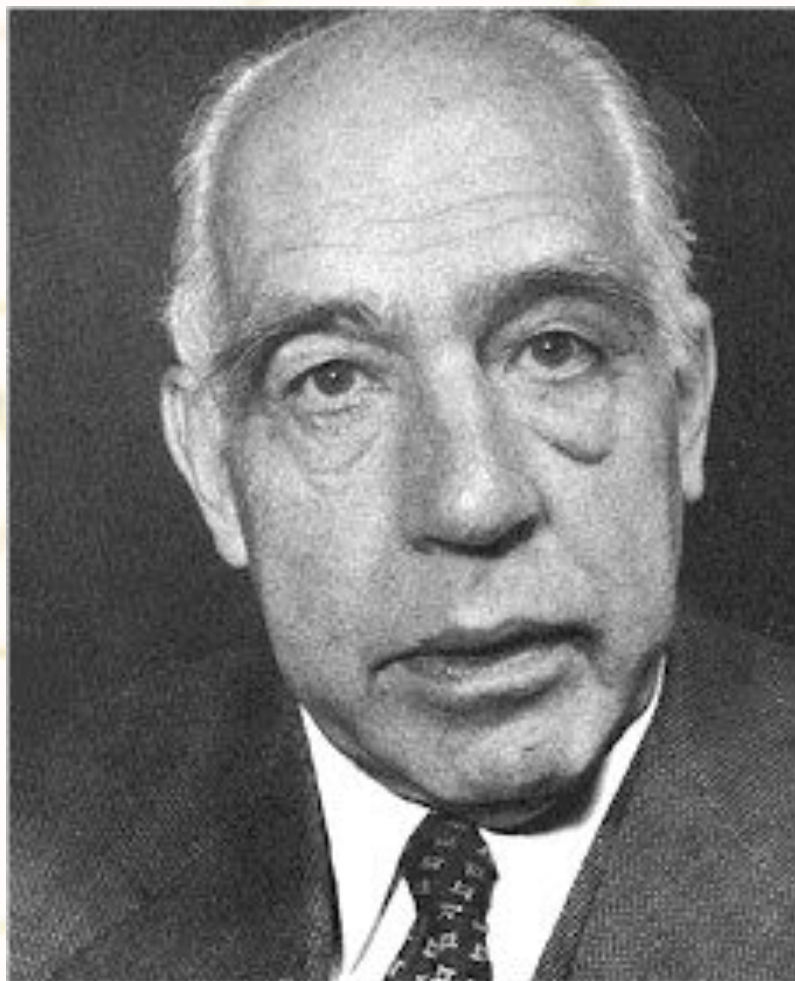
$$E_m > E_n$$

Излучение
энергии

$$E_n$$



Теория Бора

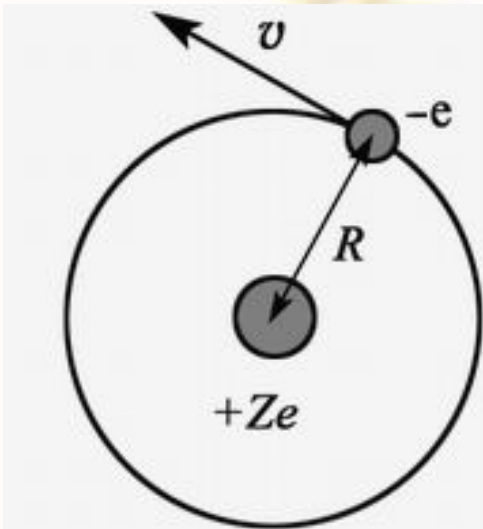


Постулаты Бора

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:*



$$m_e v r = n \hbar$$

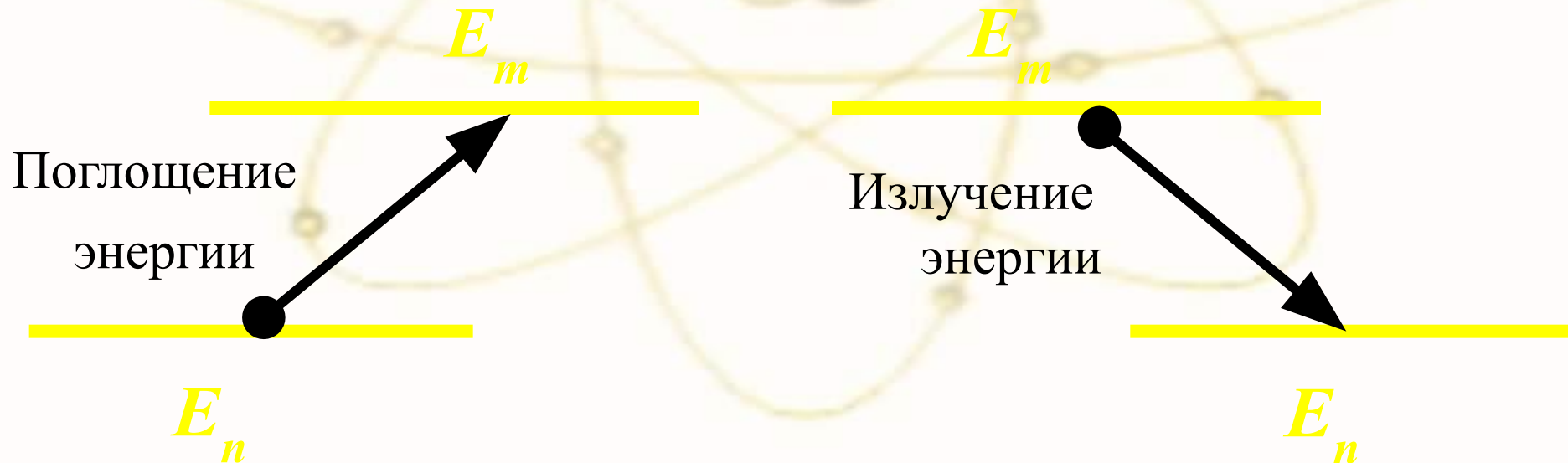
$n = 1, 2, 3, \dots$ главное квантовое число.

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

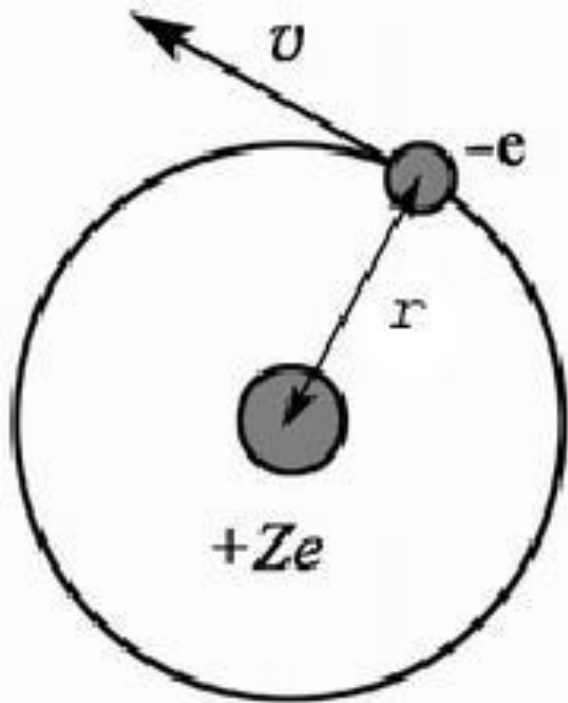
Световой квант равен разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

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

m, n – номера состояний.



Уравнение движения электрона получим из равенства центробежной силе кулоновской силе:



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

$$m_e v r = n\hbar$$

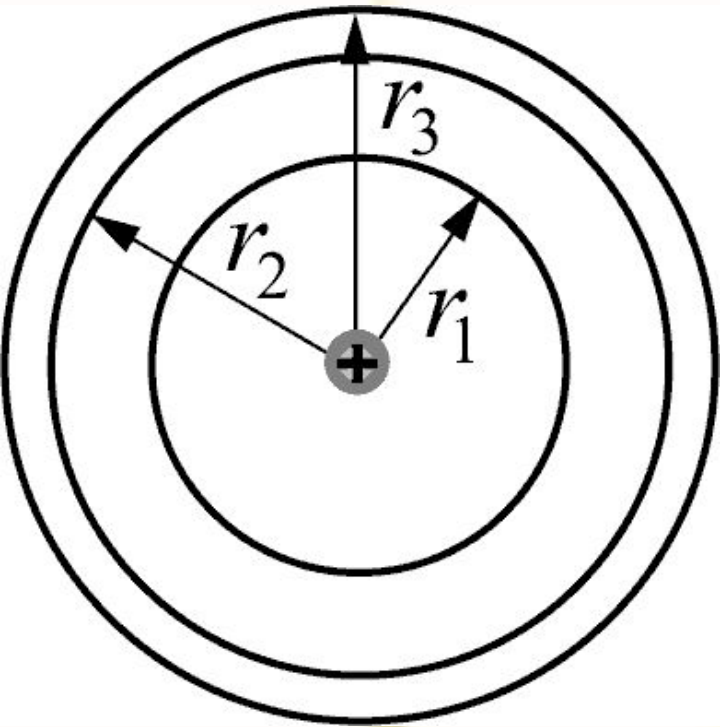
Отсюда найдем **радиус стационарных орбит:**

\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:

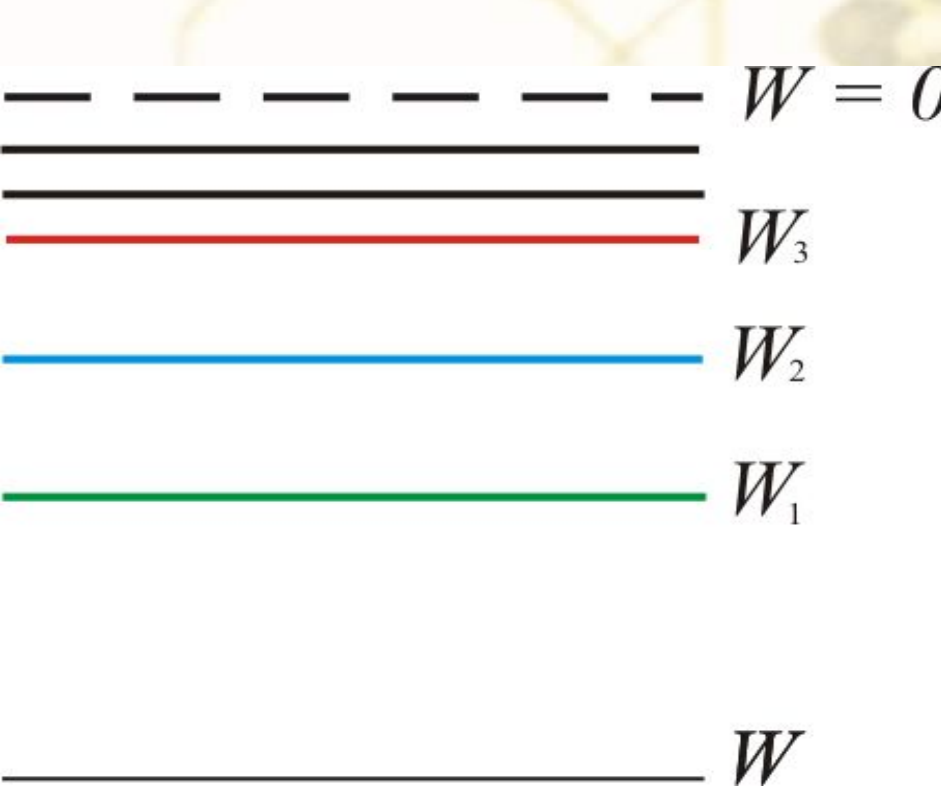


$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h^2}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} = \\ = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

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

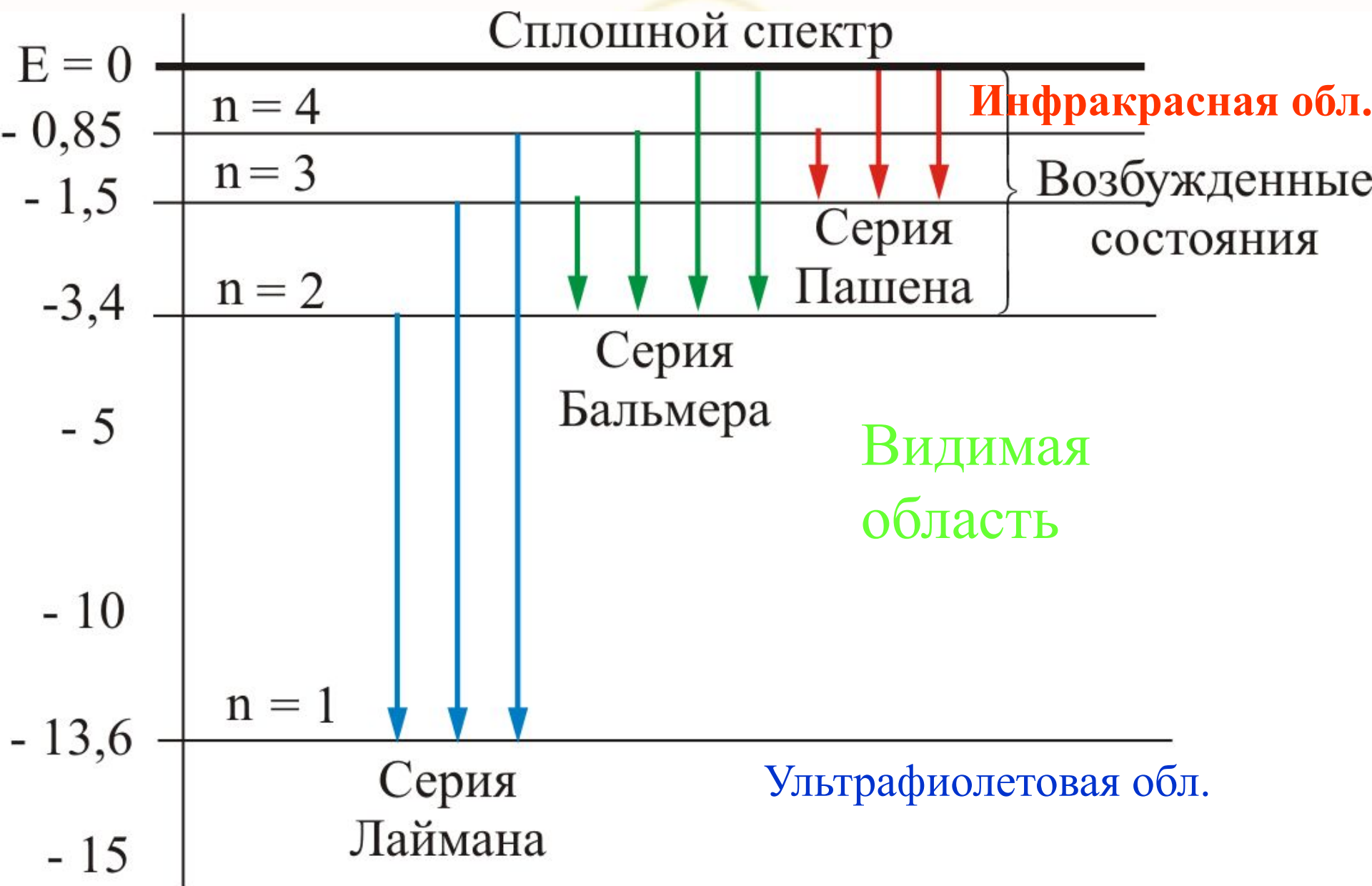
$$\frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Отсюда


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

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,

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

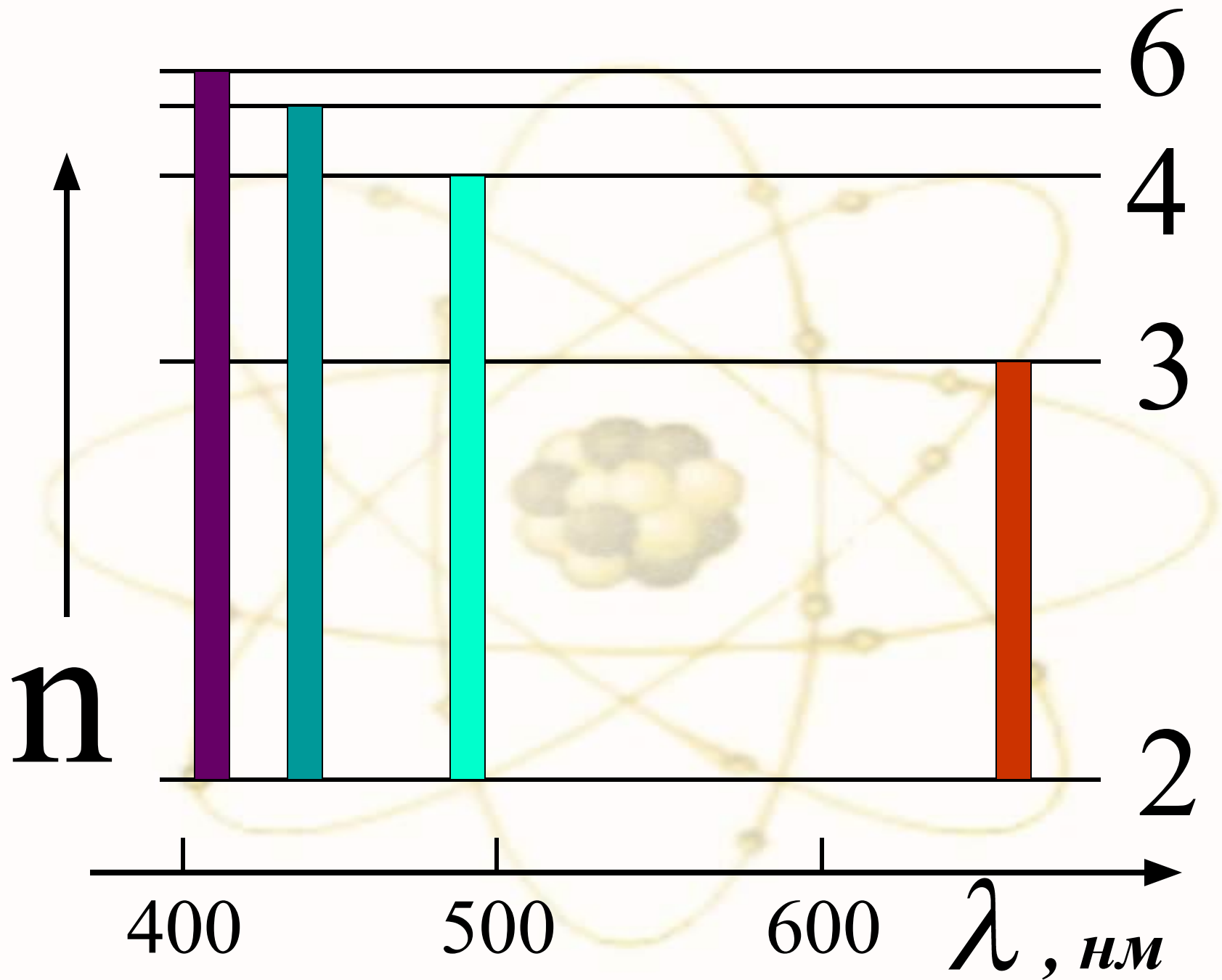
Мы получили обобщенную формулу Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом, где постоянная Ридберга

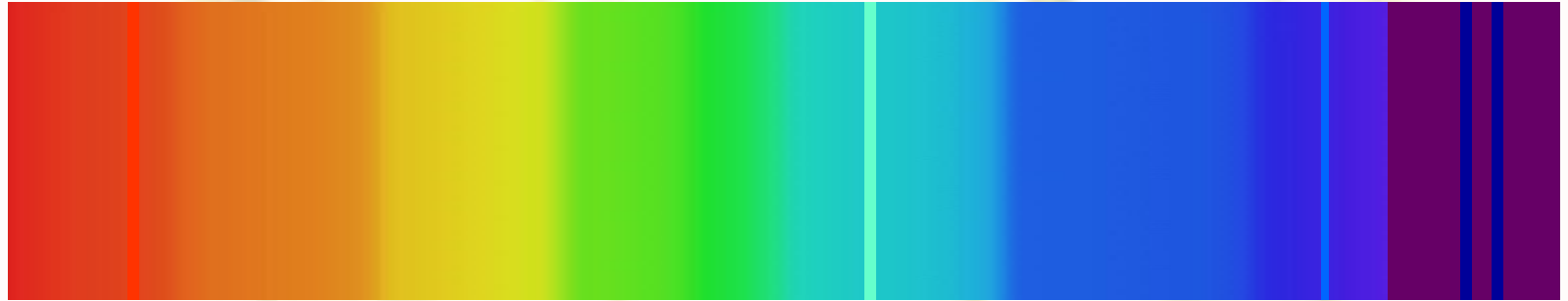
$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$$

*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}

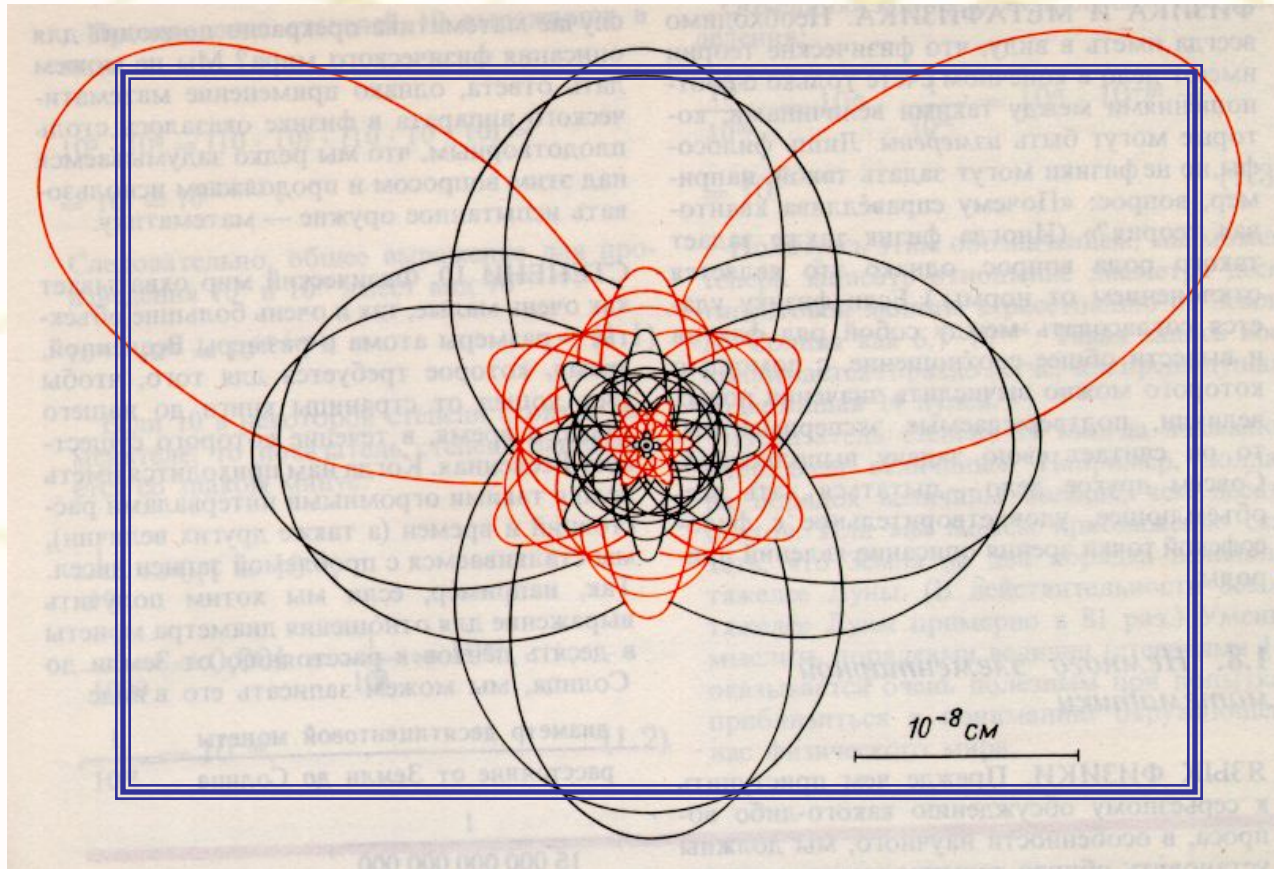
H_{γ}

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.

«Портрет» атома радия



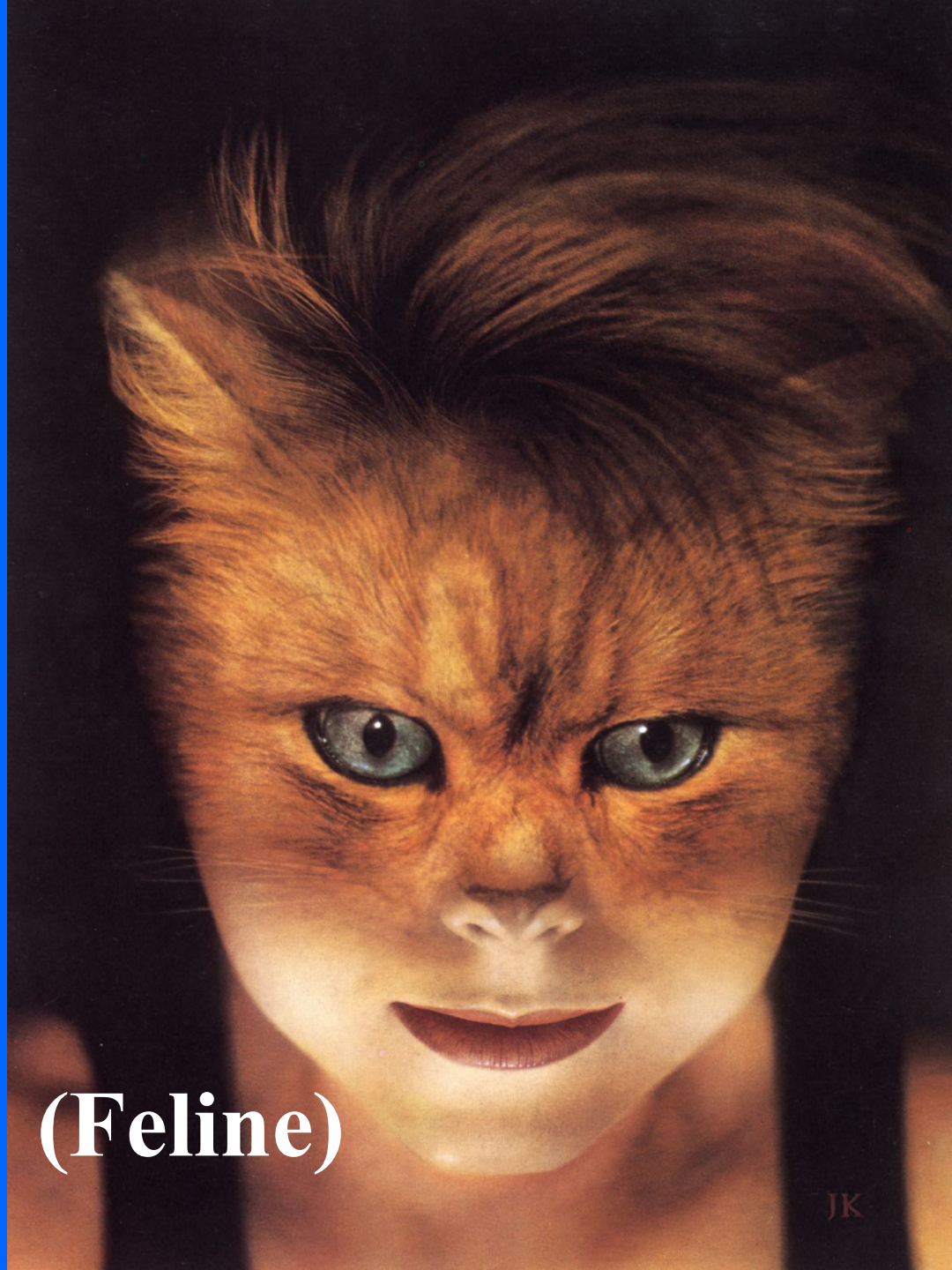
(Н. Бор, 1925)

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

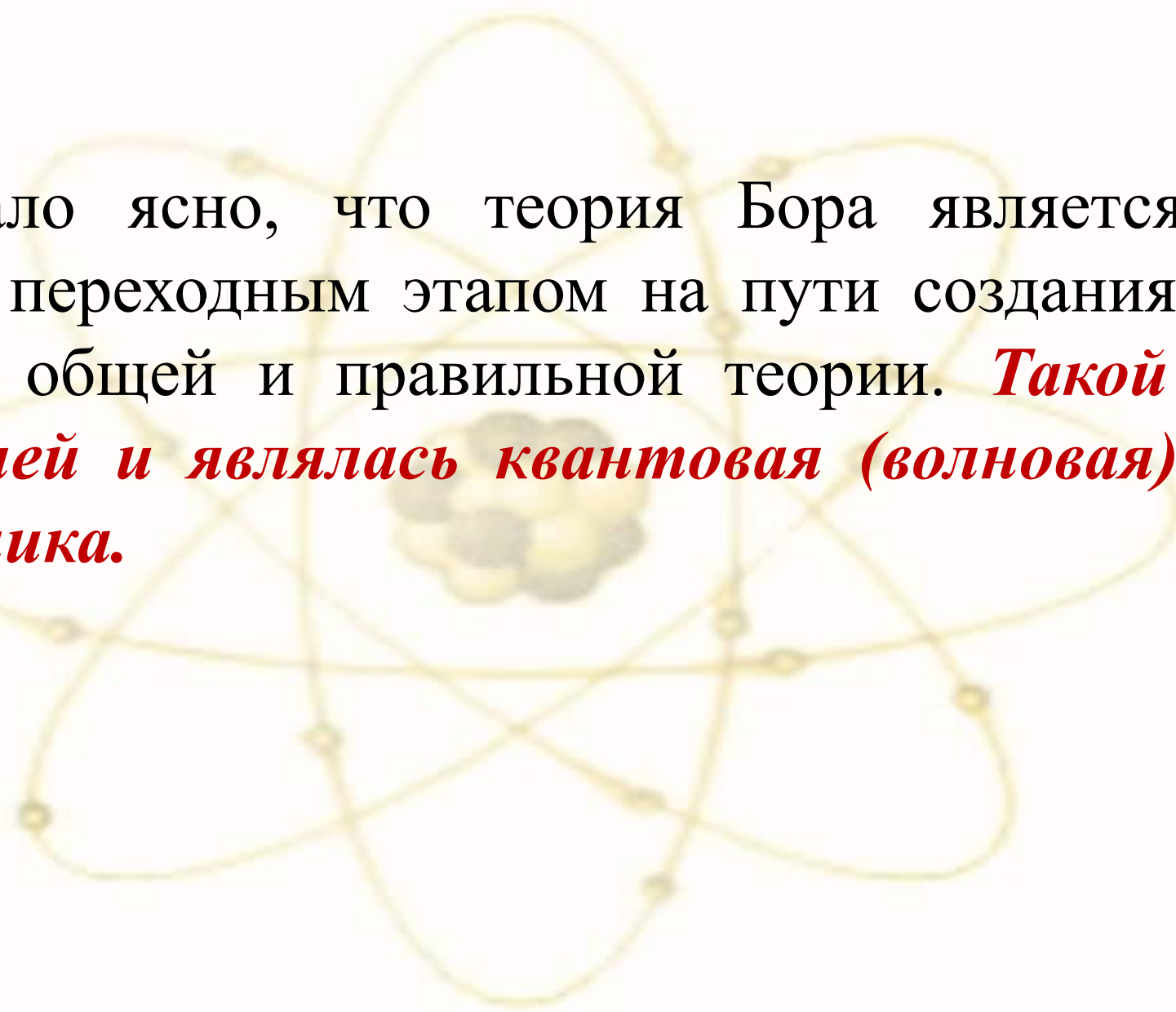
- Главнейшее – **внутренняя противоречивость теории: механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами**.
- Теория не могла объяснить **вопрос об интенсивностях спектральных линий**.
- Серьезной неудачей являлась **абсолютная невозможность применить теорию для объяснения спектров гелия (He) (два электрона на орбите, и уже теория Бора не справляется)**.

**Аналогия
теории Бора
как слияния
двух описаний
микромира**

(Feline)



Стало ясно, что теория Бора является лишь переходным этапом на пути создания более общей и правильной теории. *Такой теорией и являлась квантовая (волновая) механика.*





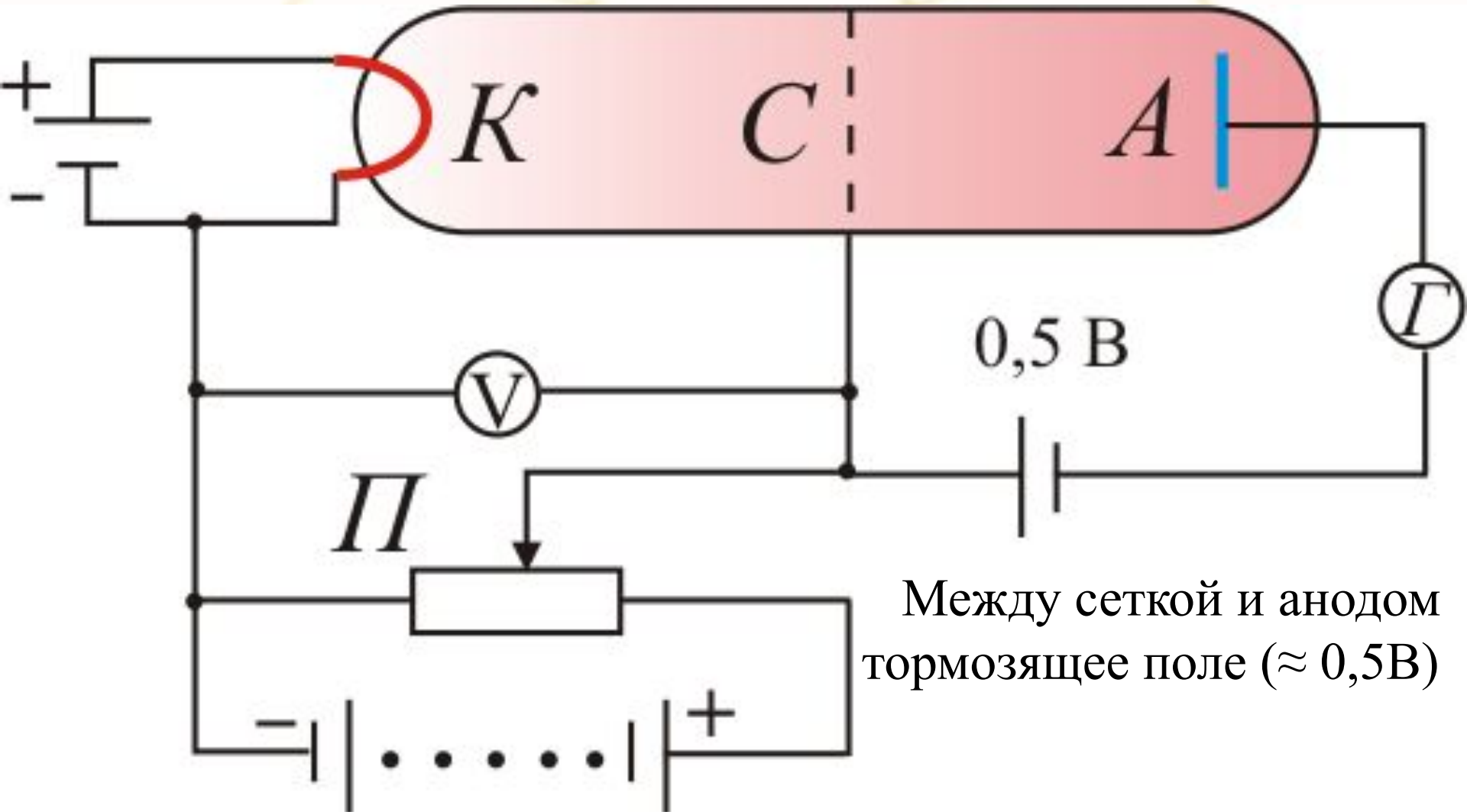
**Дальнейшее развитие
квантовой механики
привело к отказу от
механической картины
движения электрона в
поле ядра.**

1.4. Опыт Франка и Герца.

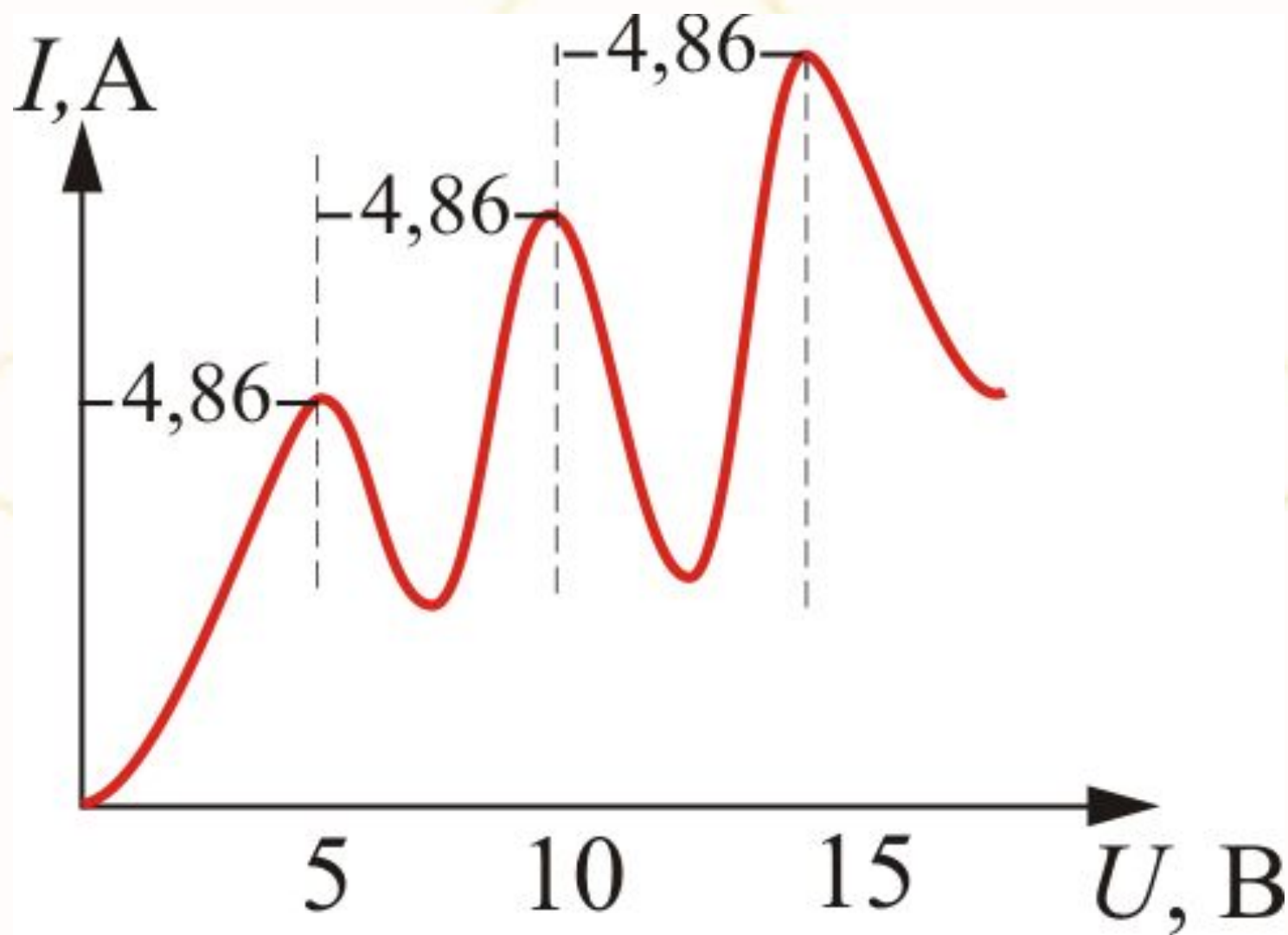
Существование дискретных энергетических уровней атома и доказательство правильности теории Бора подтверждается опытом Франка и Герца.

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

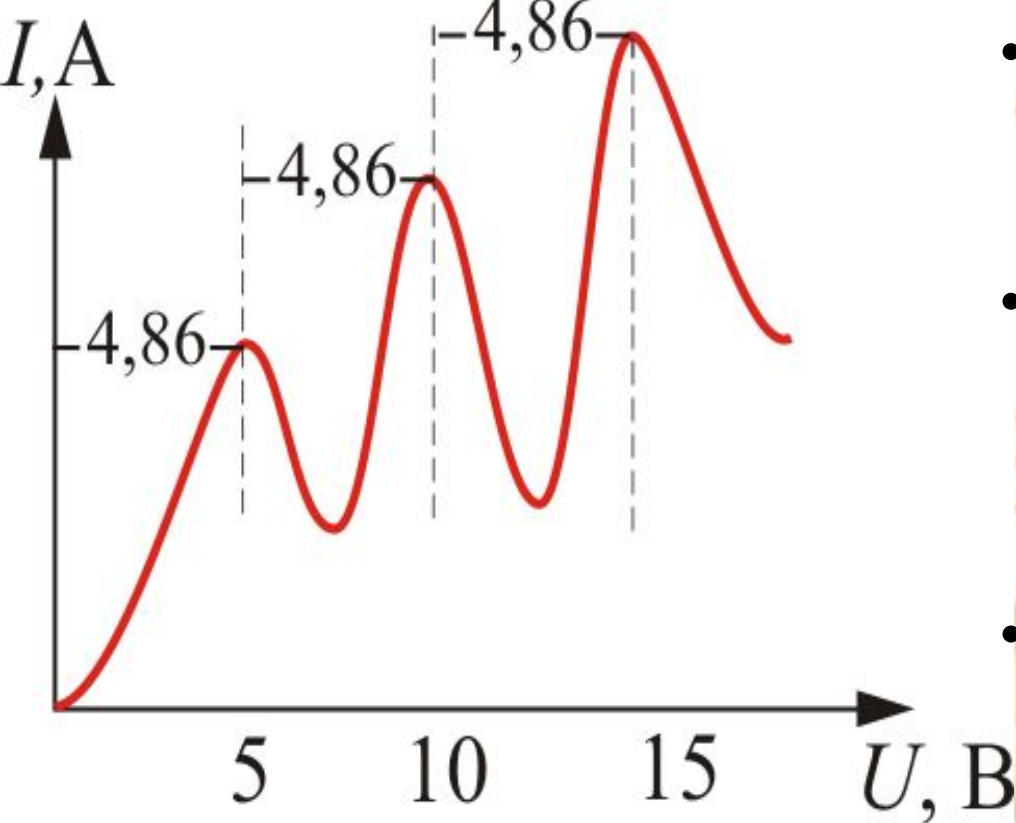
В трубке, заполненной парами ртути при давлении $p \approx 1$ мм рт. ст., три электрода, катод – сетка – анод. Электроны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой.



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):**

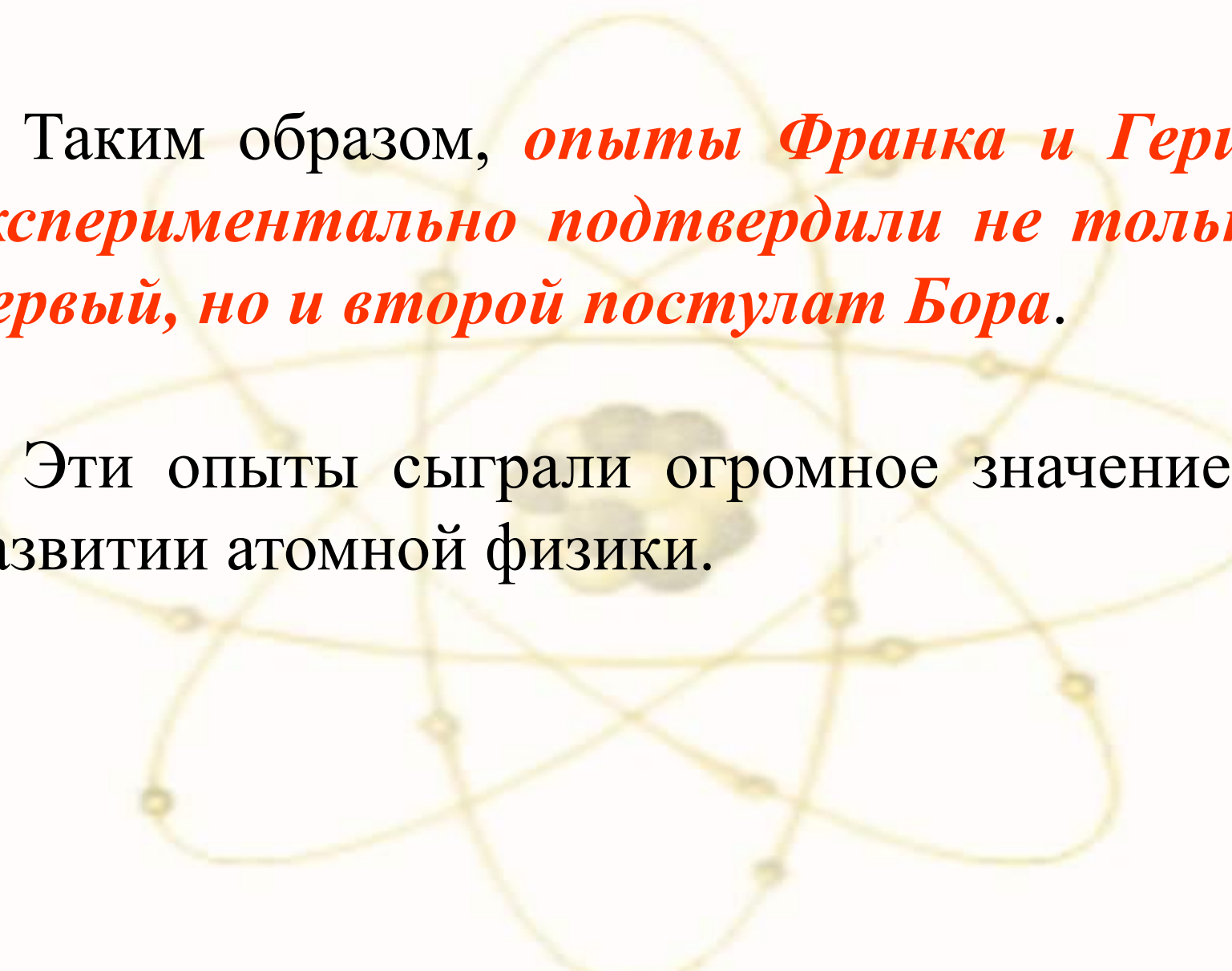
$$\nu = \frac{\Delta E_1}{h}$$

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.