

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The metal spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight drop shadow.

Физика колебаний и волн. Квантовая физика.

Лекция № 10

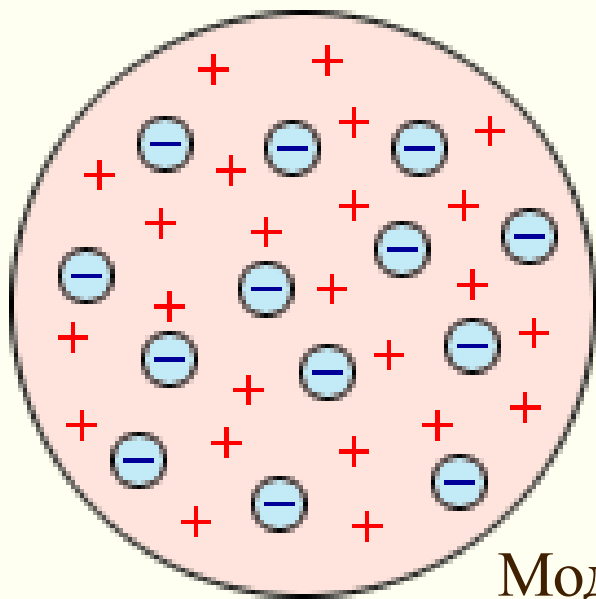
Теория Бора для атома водорода.

1. Постулаты Бора.

2. Энергетический спектр атома водорода. Спектр излучения и поглощения.

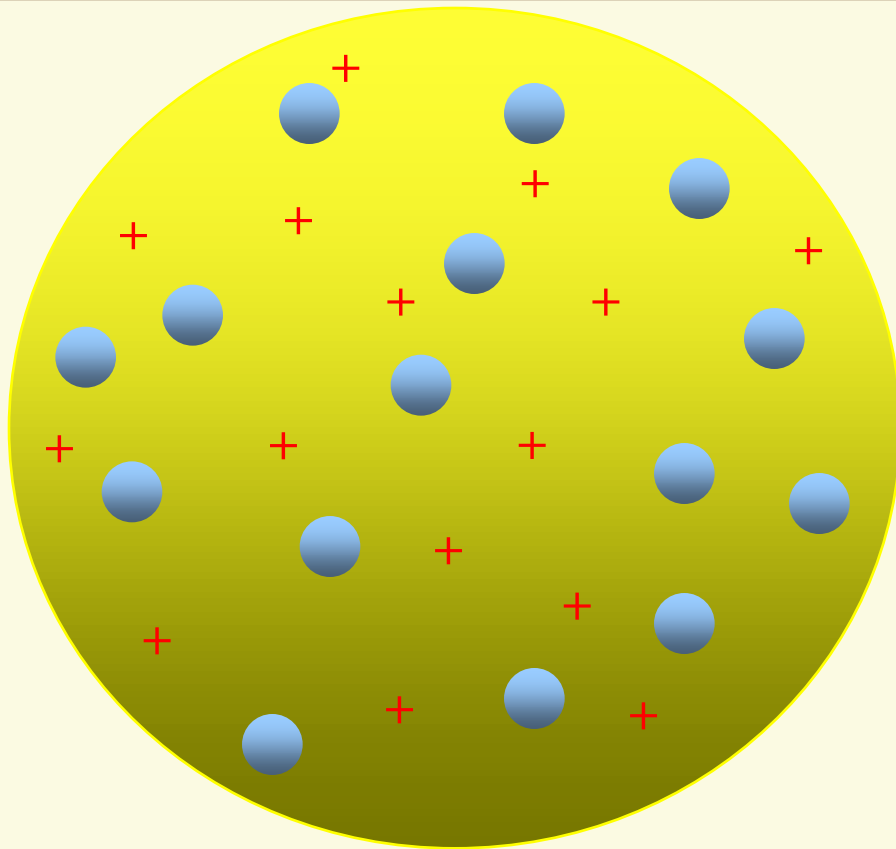
3. Опыт Франка и Герца. Дискретность энергетического спектра атома.

В 1897 году Дж. Томсон открыл **электрон** и измерил отношение e/m заряда электрона к массе. Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов, причем носителями **отрицательного заряда** атомов являются легкие электроны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.



Модель атома
Дж. Томсона

Модель Томсона



Томсон предложил модель атома (модель «Пудинг с изюмом», англ. Plum pudding model) в виде положительно заряженного шара радиусом 10^{-10} м, в котором плавают электроны, нейтрализующие положительный заряд.

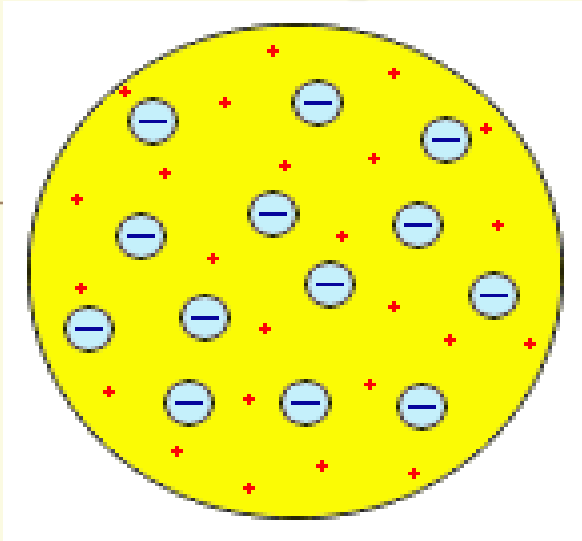
● - электрон



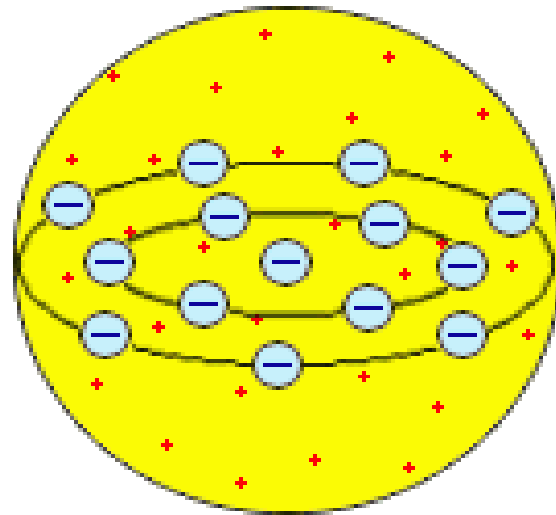
Сэр Джозеф Джон Томсон (1856 — 1940) -английский физик, член Лондонского королевского общества. Занимаясь изучением газового разряда, совместно с сотрудниками выполнил серию классических работ, приведших его к открытию электрона (впервые измерил отношение заряда элек-

трона к массе, 1897; Нобелевская премия, 1906). Дал объяснение непрерывного спектра рентгеновского излучения, установил природу положительных ионов, предложил первую модель строения атома. Возглавляемая им Кавендишская лаборатория превратилась в ведущий научно-исследовательский физический центр, в котором под его руководством работали крупнейшие английские физики (Э. Резерфорд, Ч. Вильсон, Ф. У. Астон, У. Ричардсон и др.).

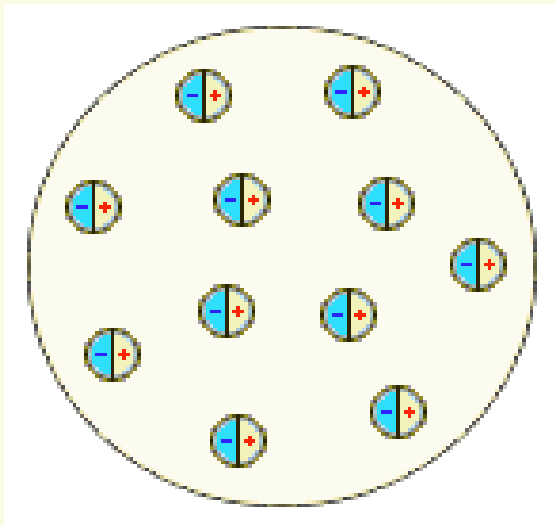
Первые модели строения атома:



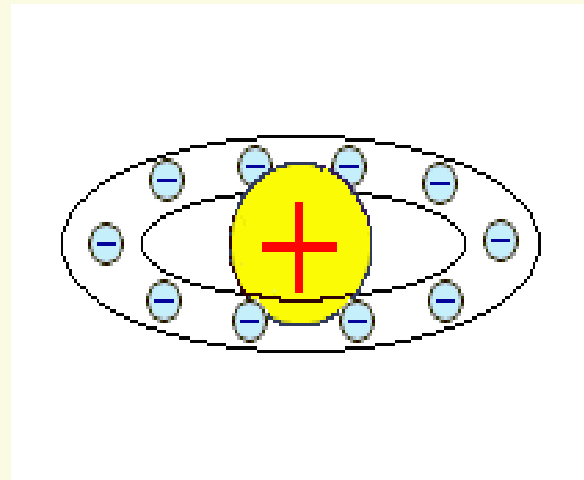
Уильям Томсон, 1902 г.



Джозеф Джон Томсон, 1903 г.

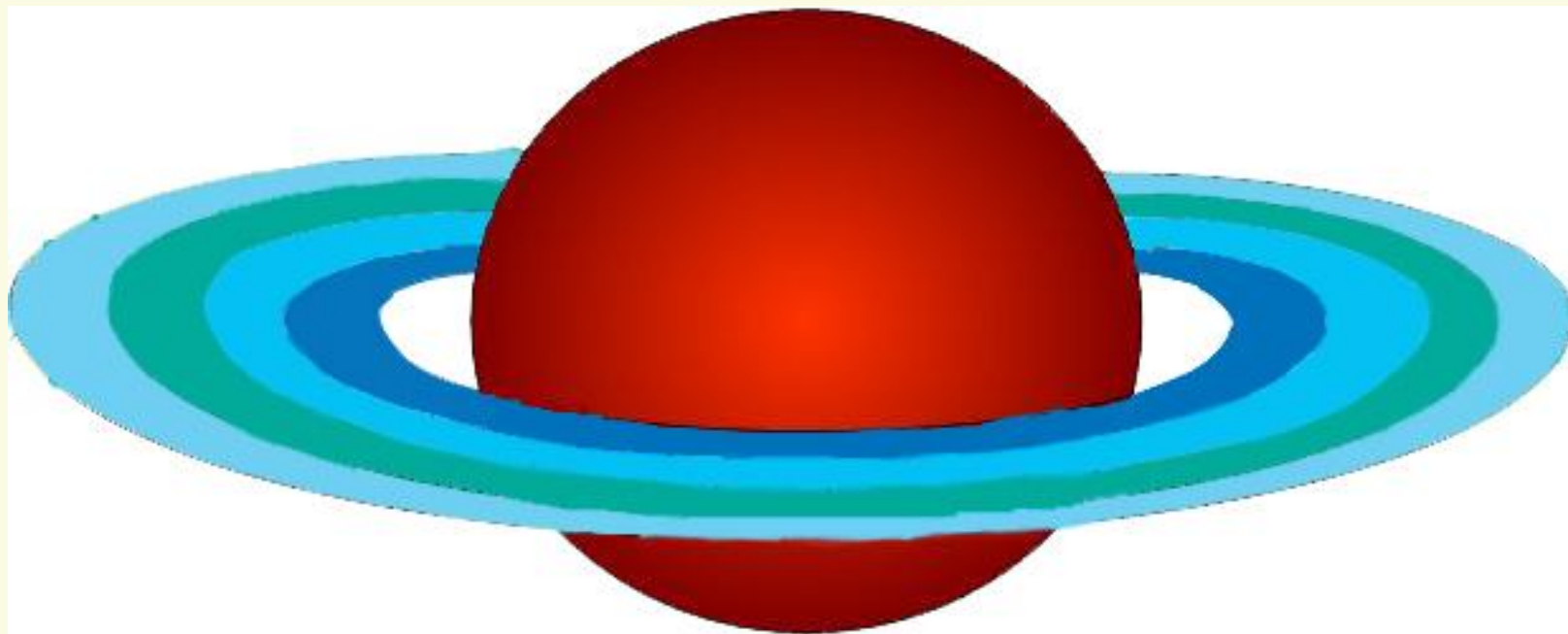


Филипп Ленард, 1904 г.

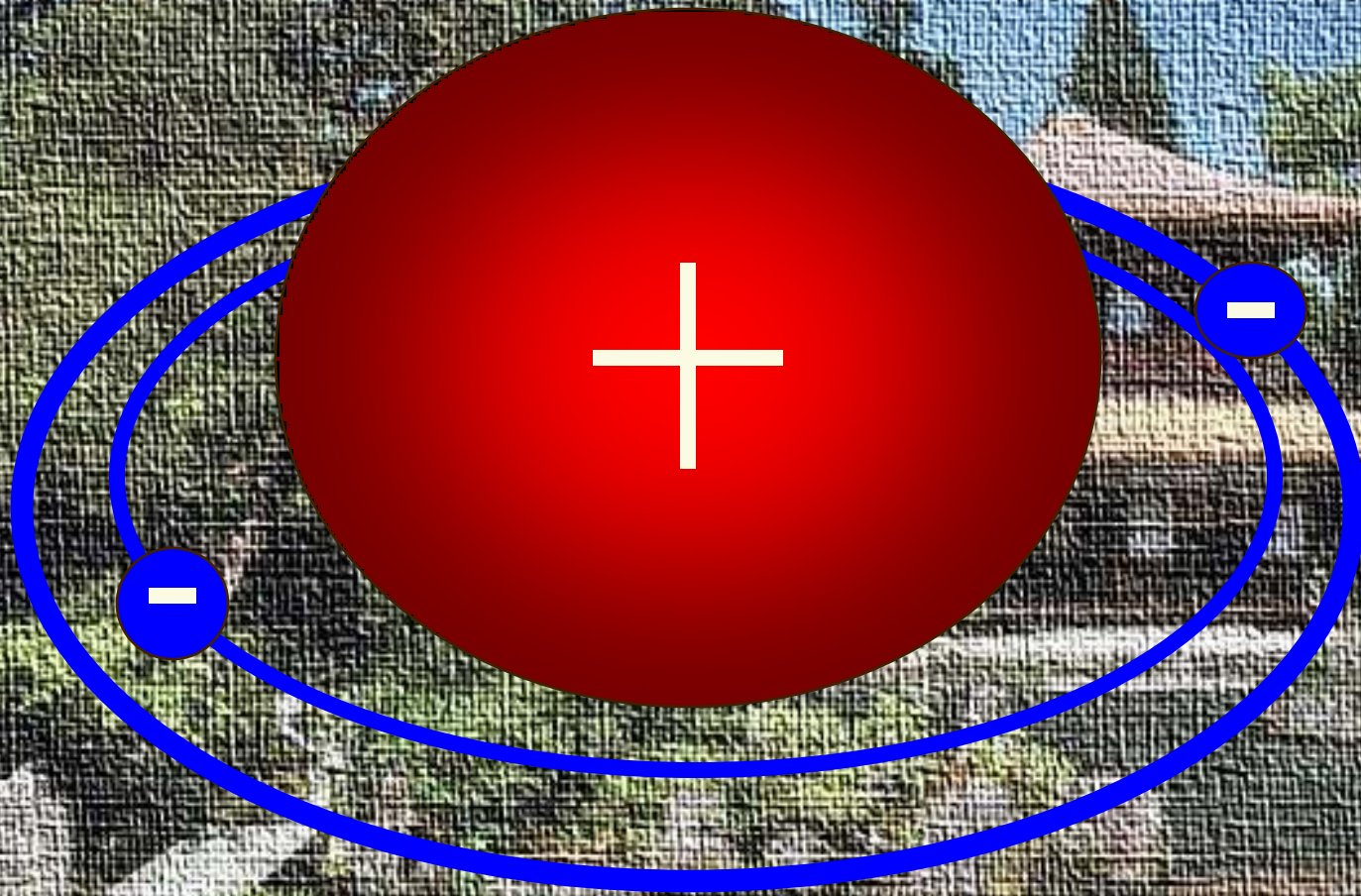


Хантаро Нагаока, 1904 г.

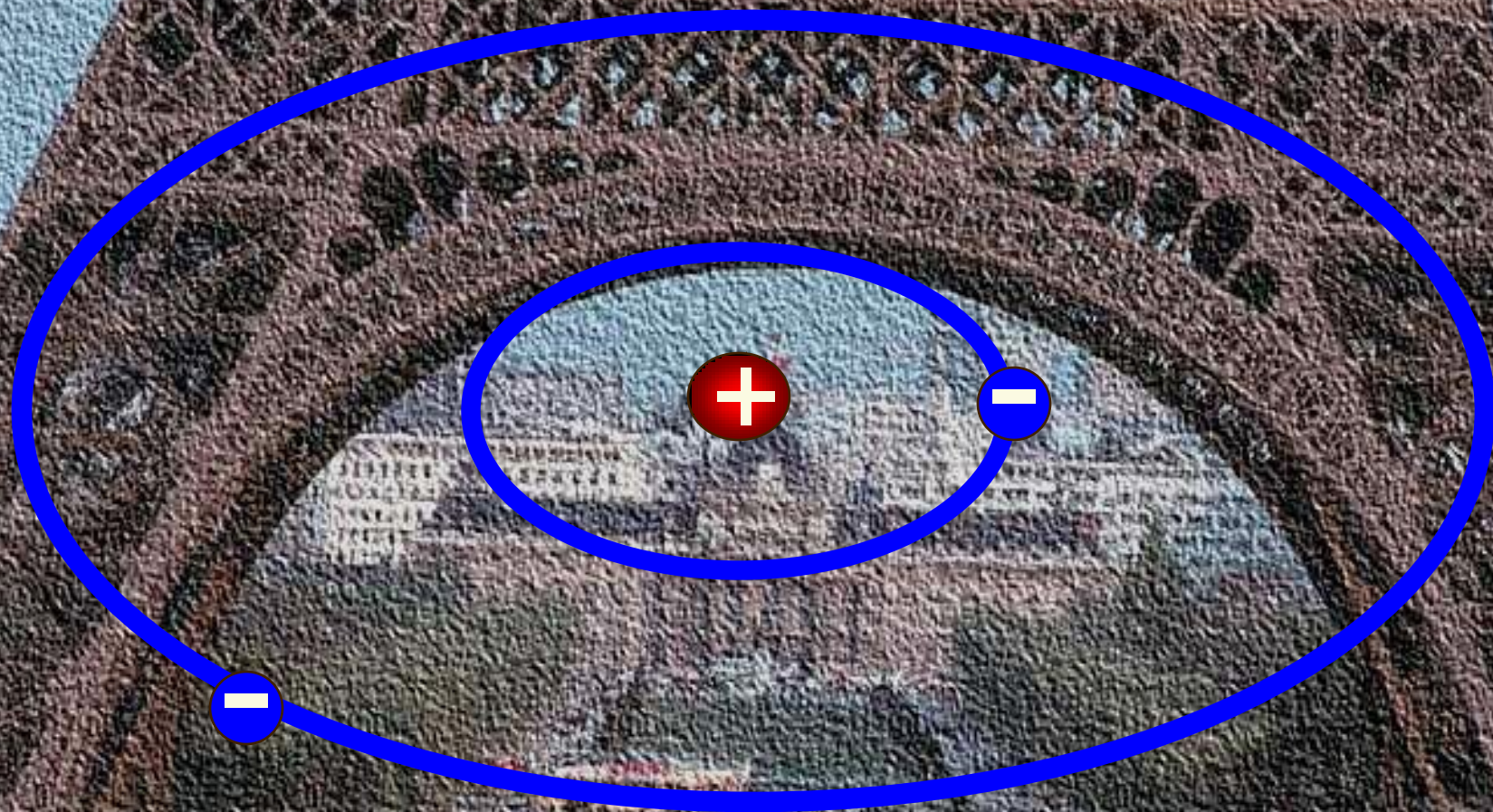
Модель атома Нагаоке



«Сатурноподобная» модель Нагаоке. Здесь электроны - кольца вокруг положительно заряженного тела. Но размеры центрального атомного тела почти те же, что и в модели Томсона.

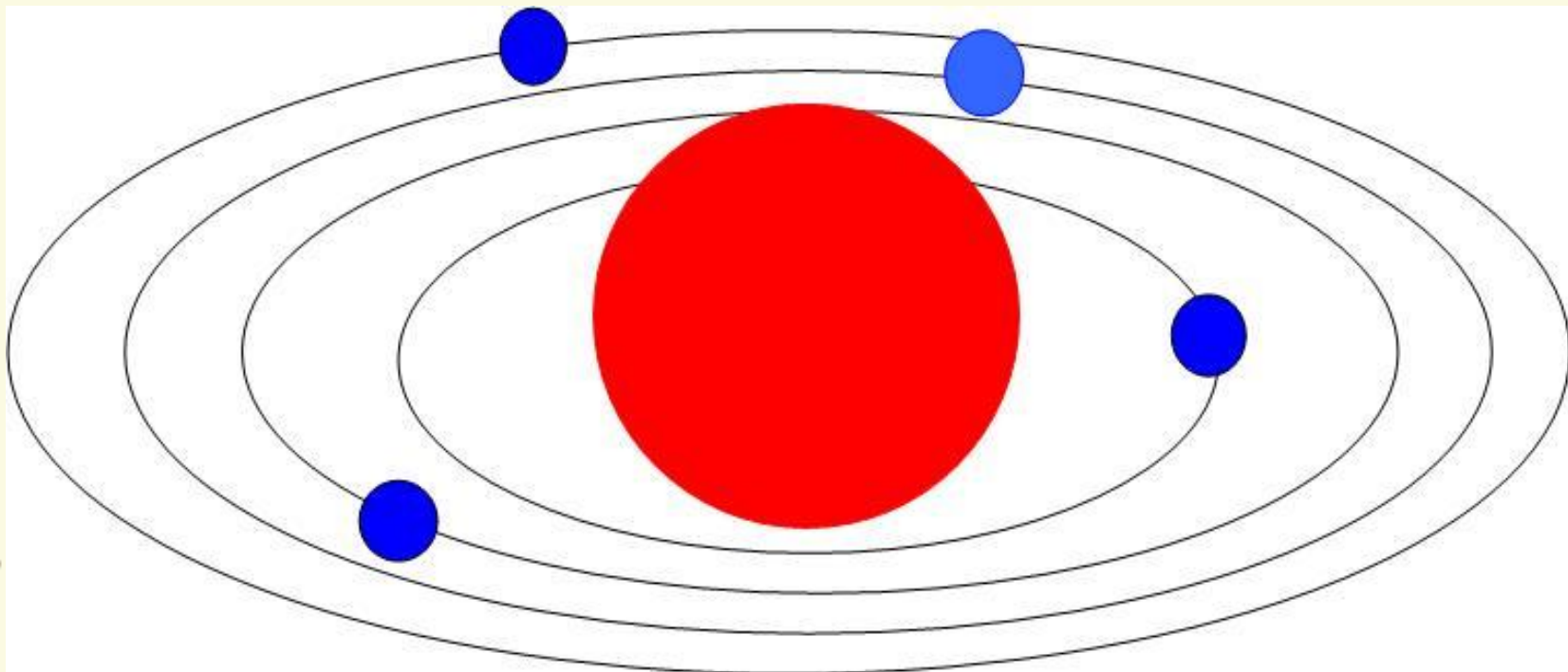


**Модель Хантаро Нагаока
(1904)**



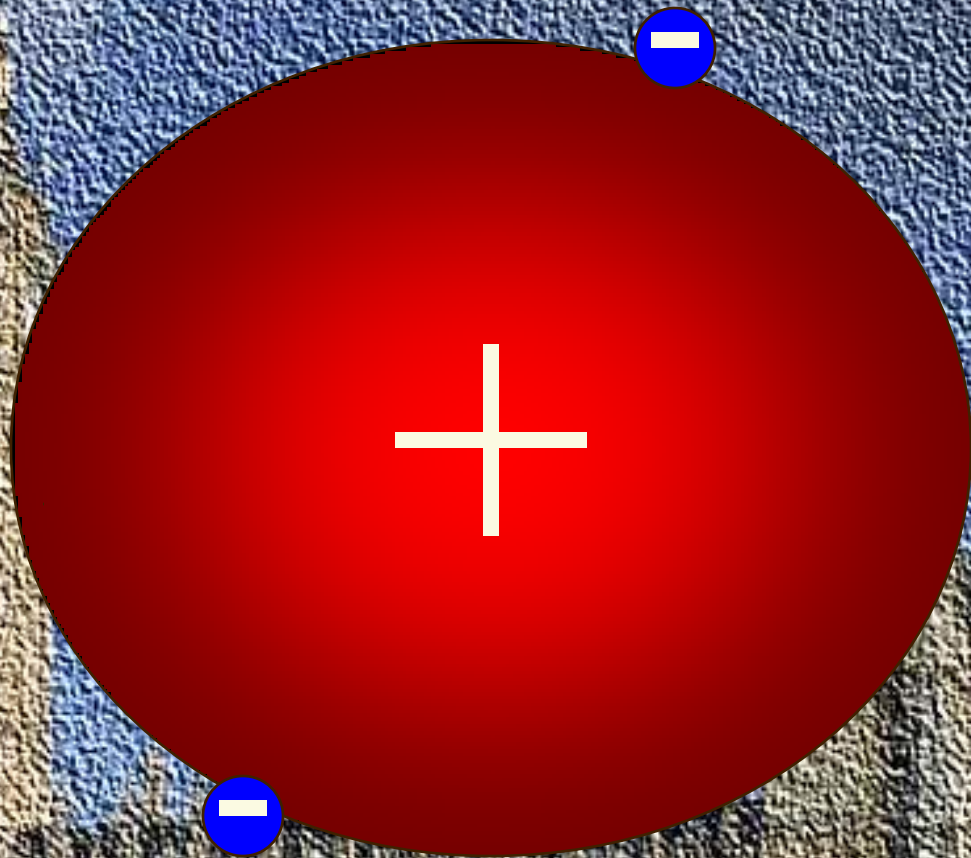
**Модель Жана Батиста
Перрена (1901)**

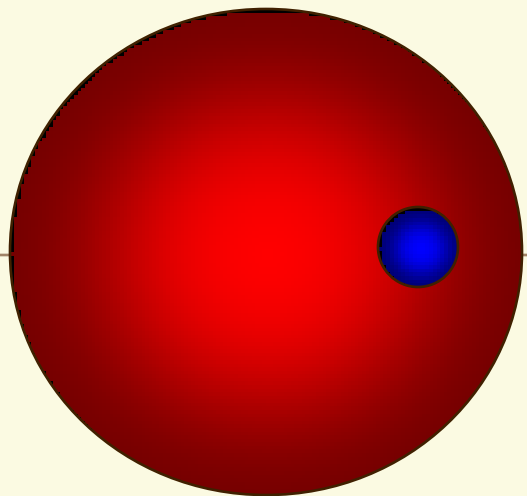
Планетарная модель атома



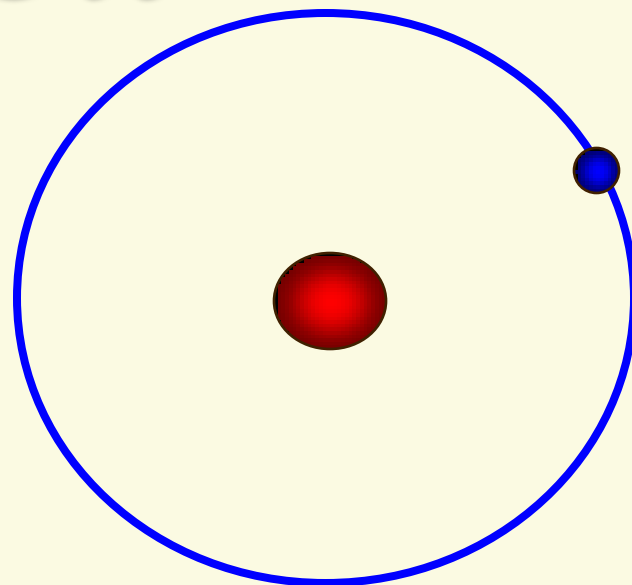
На самом деле старейшая модель атома - планетарная. Но никаких физических обоснований она не имела. Многие учёные (чаще - не физики) высказывались в пользу такой модели атома. Но в основе их предположений была, скорее, философская вера в единство мира, чем какие-либо доказательства.

Модель
Дж.Дж
Томсона (1903)





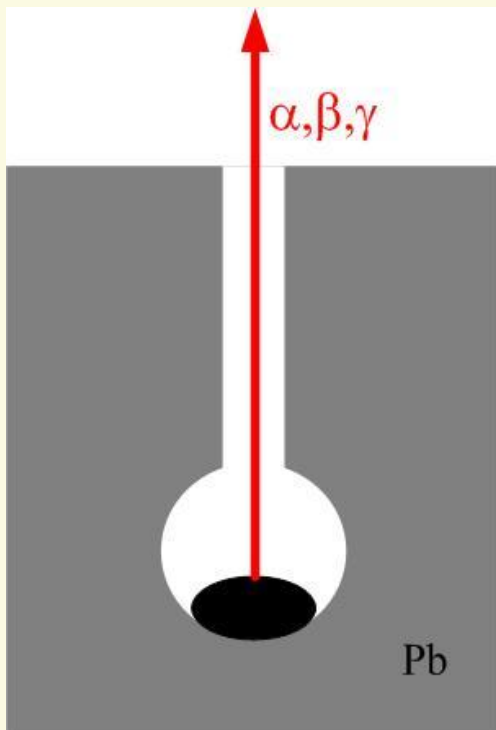
*Какая
из моделей
верна?*



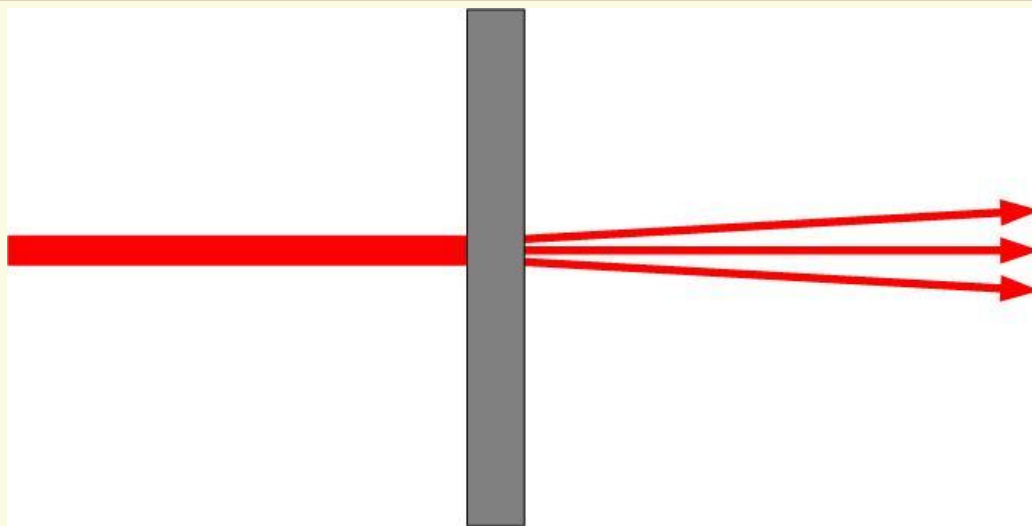
В 1906-1909 гг. Ганс Гейгер, Эрнст Марсден и Эрнест Резерфорд, пытаясь найти экспериментальные подтверждения модели Томсона, провели свои знаменитые **опыты по рассеиванию α -частиц на золотой фольге.**

Они использовали α -частицы вместо электронов, т.к. благодаря своей большей массе (в 7350 раз больше массы электрона) α -частицы не претерпевают заметного отклонения при столкновении с электронами, что позволяет регистрировать только столкновения с положительной частью атома. В качестве источника α -частиц ими был взят радий, а частицы, претерпевавшие рассеяние в тонкой золотой фольге, регистрировались по сцинтилляционным вспышкам на экране из сульфида цинка, находящемся в затемнённой комнате.

Исследование α -частиц



Рассеяние α -частиц пластинкой слюды



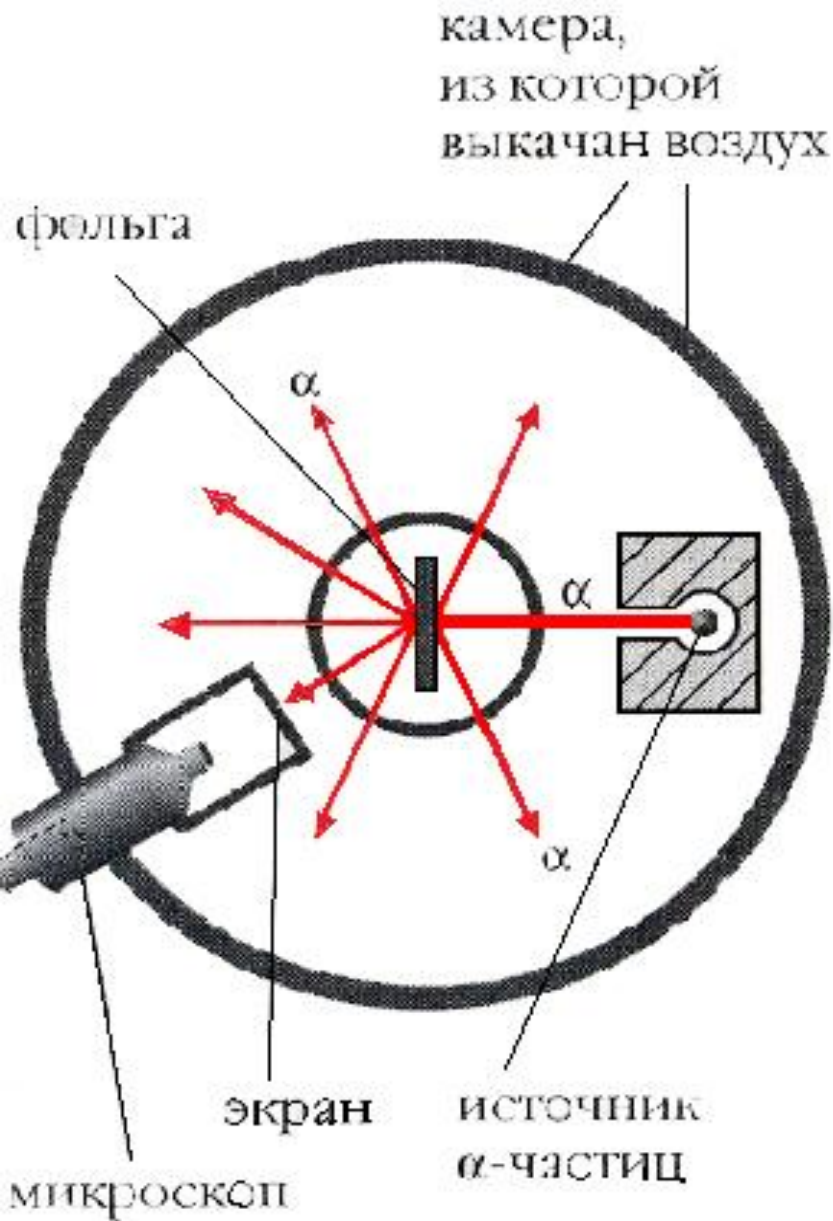
Резерфорд, 1906 г.

Источник радиоактивного излучения
Из такого источника вылетают α -частицы со скоростью 10 - 20 тысяч километров в секунду.

Отклонение α -частиц от прямой траектории составило около 2 градусов. Это означало, что внутри атома должны быть мощные электрические поля (напряженность не менее 100 кВ на 1 см).

Рассеяние α -частиц золотой фольгой

1909 г., Резерфорд, Марсден, Гейгер.



Установлено, что одна из примерно 8000 α -частиц рассеивается на угол, близкий к 180° .



Ганс Гейгер

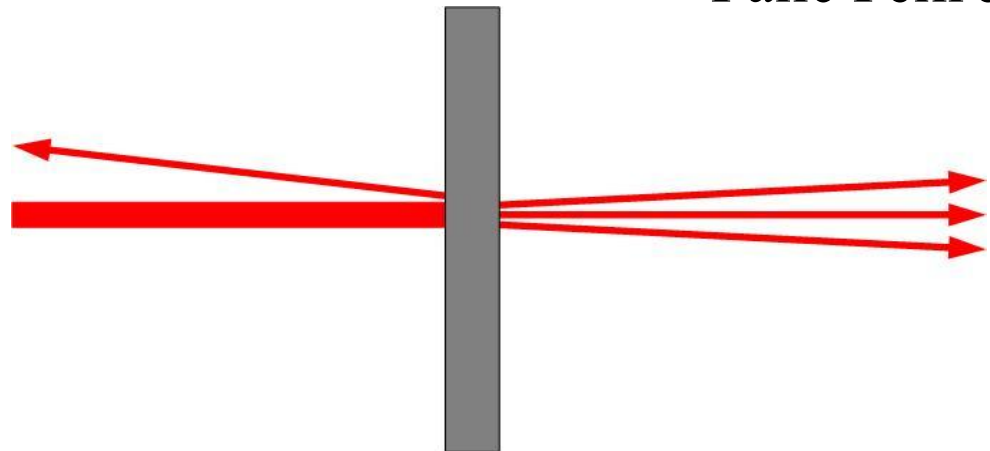


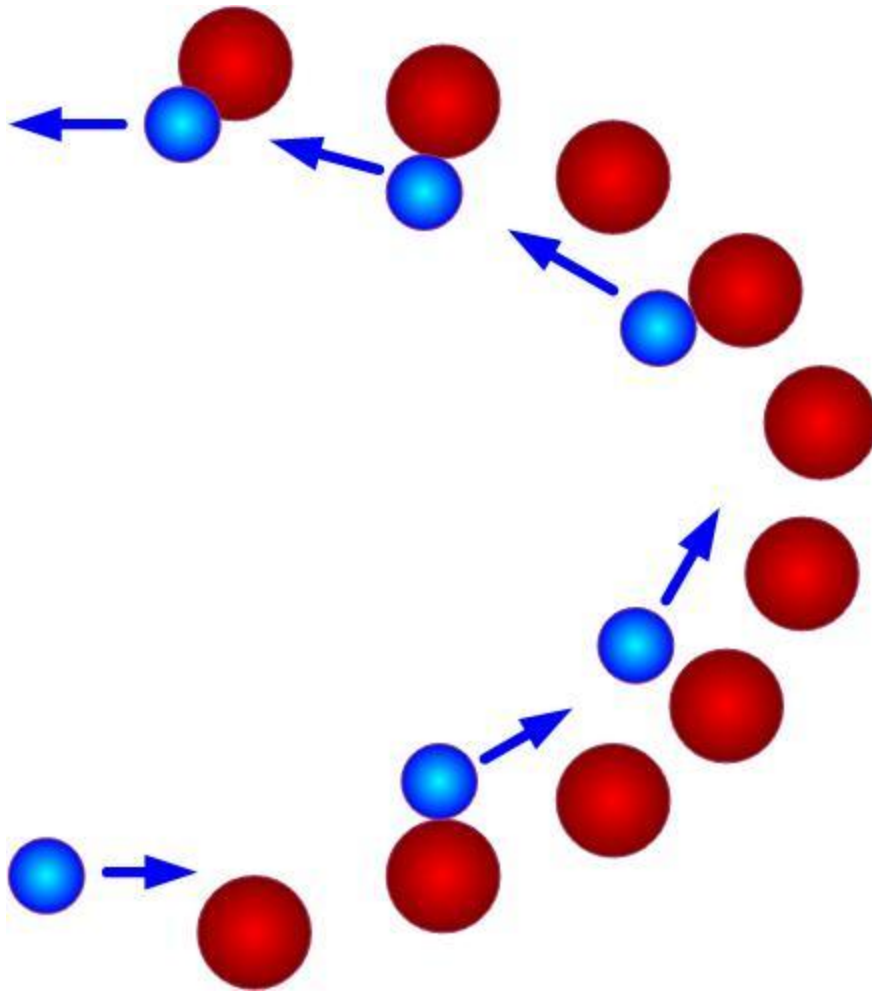
Схема опытов
Резерфорда, Гейгера
и Марсдена.

Рассеяние α -частиц золотой фольгой

Резерфорд писал: “Это столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд вернулся бы к вам и нанес удар.”



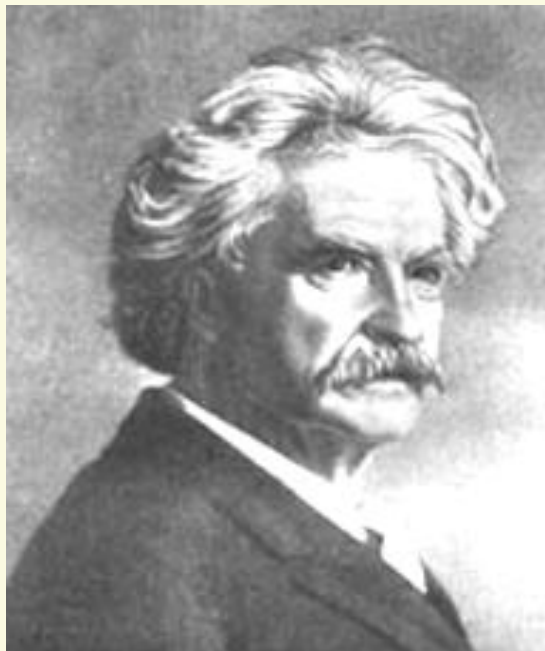
Рассеяние α -частиц золотой фольгой



Вероятность такого «разворота» α -частицы намного меньше $1/8000$. Она практически равна нулю.

Чтобы окончательно решить вопрос о распределении положительного заряда в атоме, Э. Резерфорд предложил изучить **рассеяние α -частиц** металлической фольгой. К этому времени был уже изобретён спинтарископ — прибор для визуального подсчёта α -частиц. Попадая на экран, покрытый сульфидом цинка ZnS , они вызывали маленькие вспышки света — сцинтилляции, которые можно было наблюдать через увеличительное стекло в микроскопе.

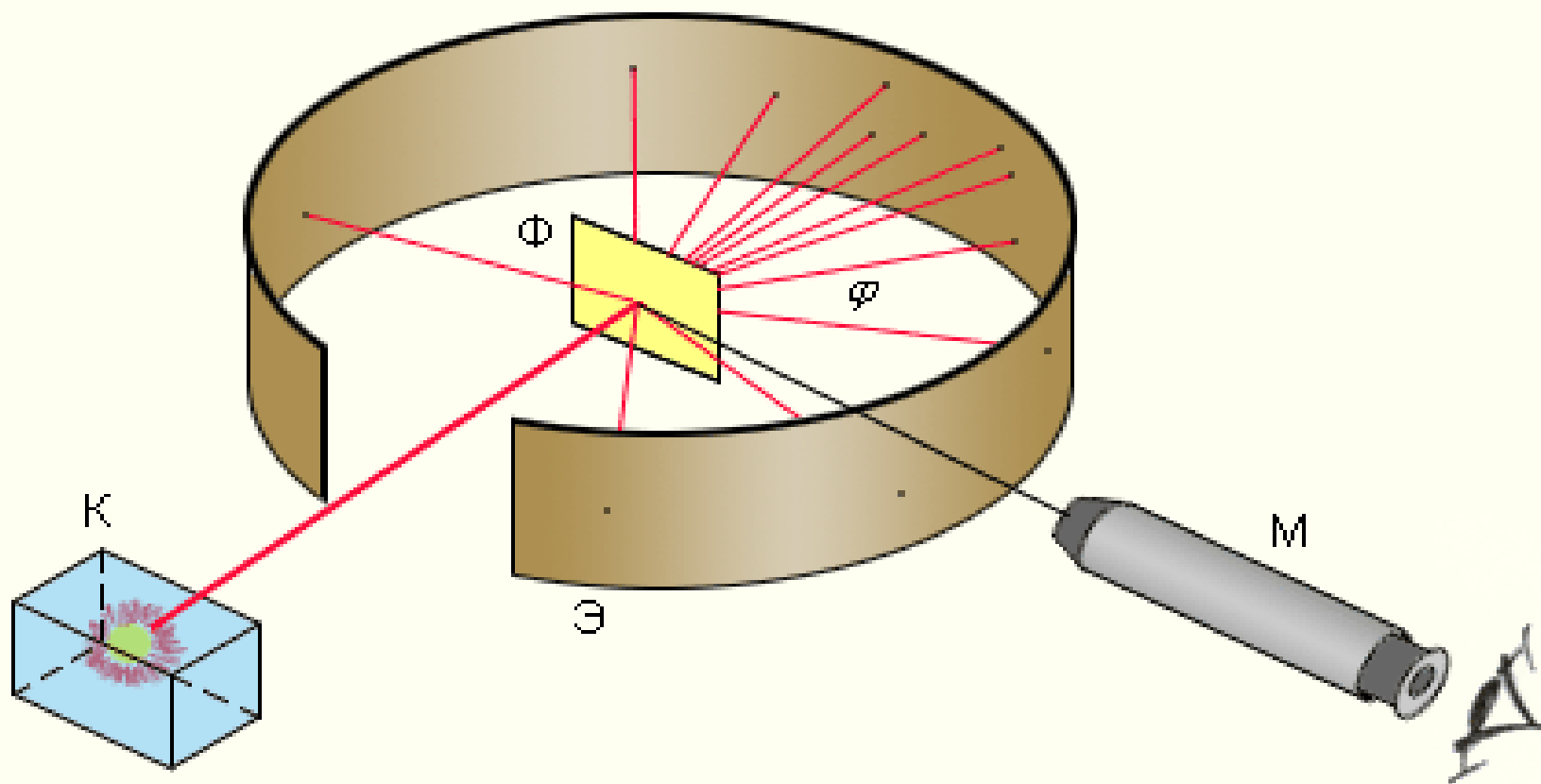




Резерфорд Эрнест (1871–1937) – английский физик, основоположник ядерной физики.

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.

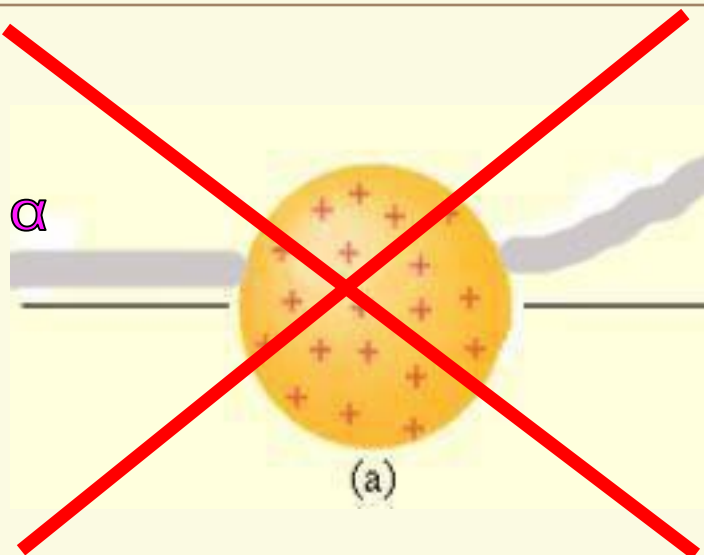
Схема опыта Резерфорда



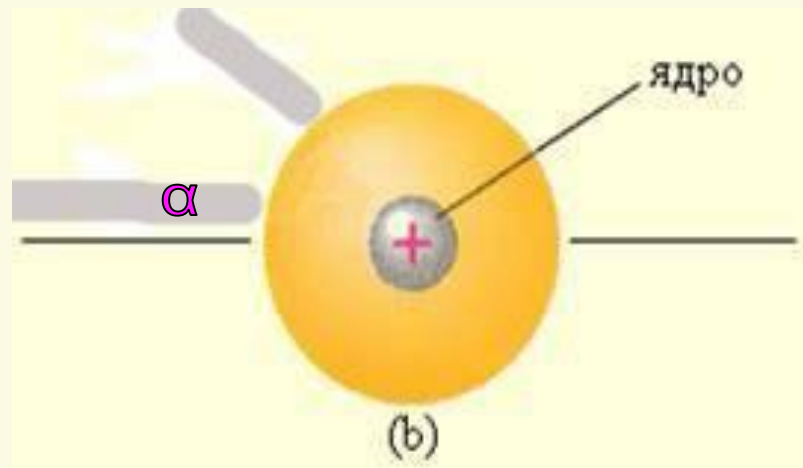
К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом
Ф – золотая фольга
Э – экран, покрытый сернистым цинком
М – микроскоп

Рассеяние α -частицы в атоме Томсона и в атоме Резерфорда

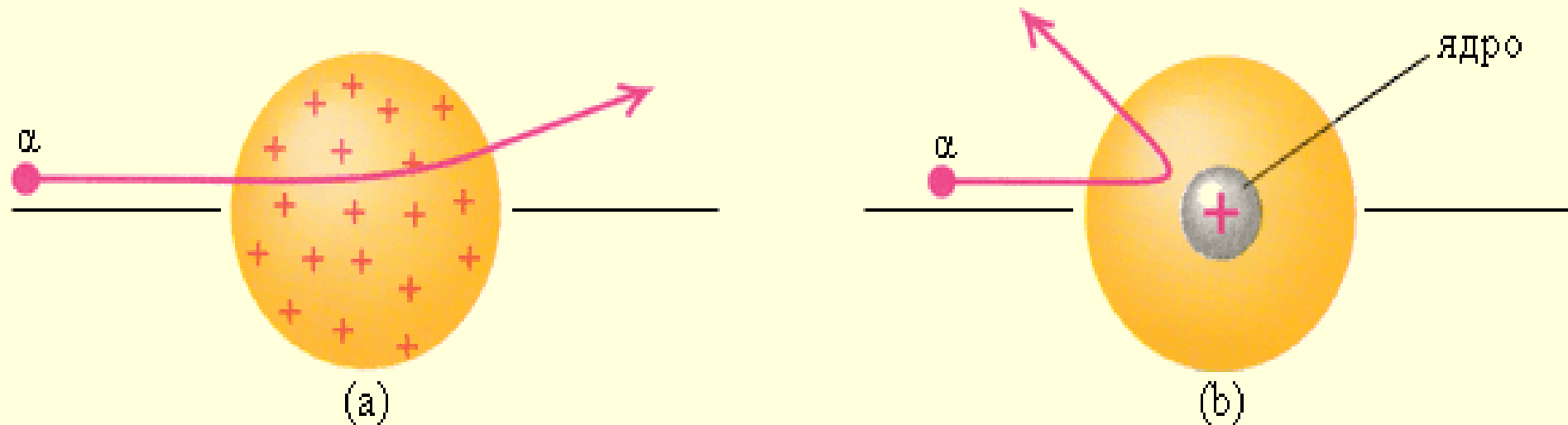
Атом Томсона



Атом Резерфорда



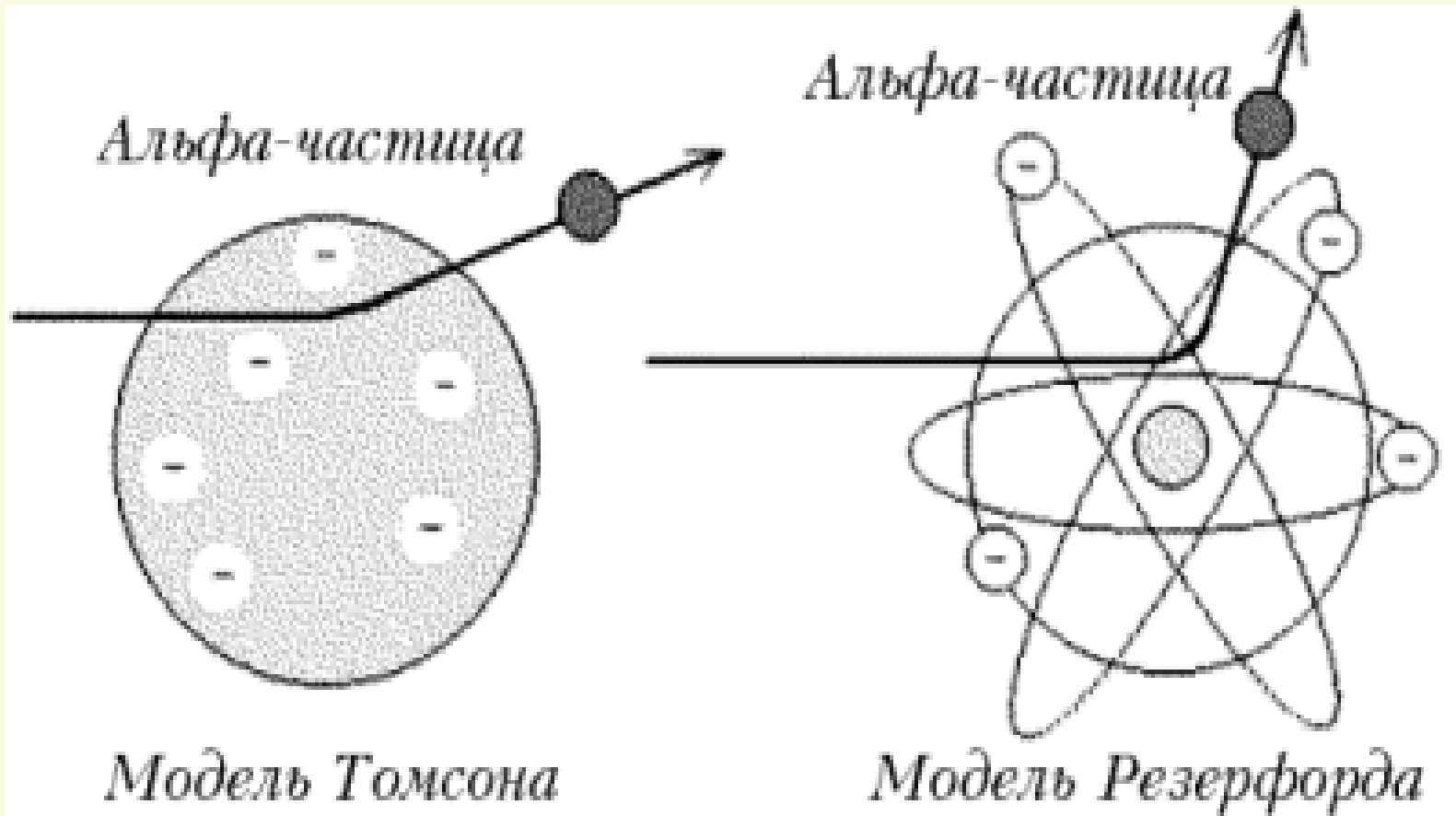
1. Большинство альфа - частиц отклоняются от прямолинейного пути на углы не более $1-2^\circ$
2. Небольшая часть альфа – частиц испытывала отклонение на значительно большие углы
3. В среднем одна из 8000 альфа- частиц рассеивается в направлении, обратном направлению первоначального движения



Рассеяние α -частицы в атоме Томсона (a) и в атоме Резерфорда (b)

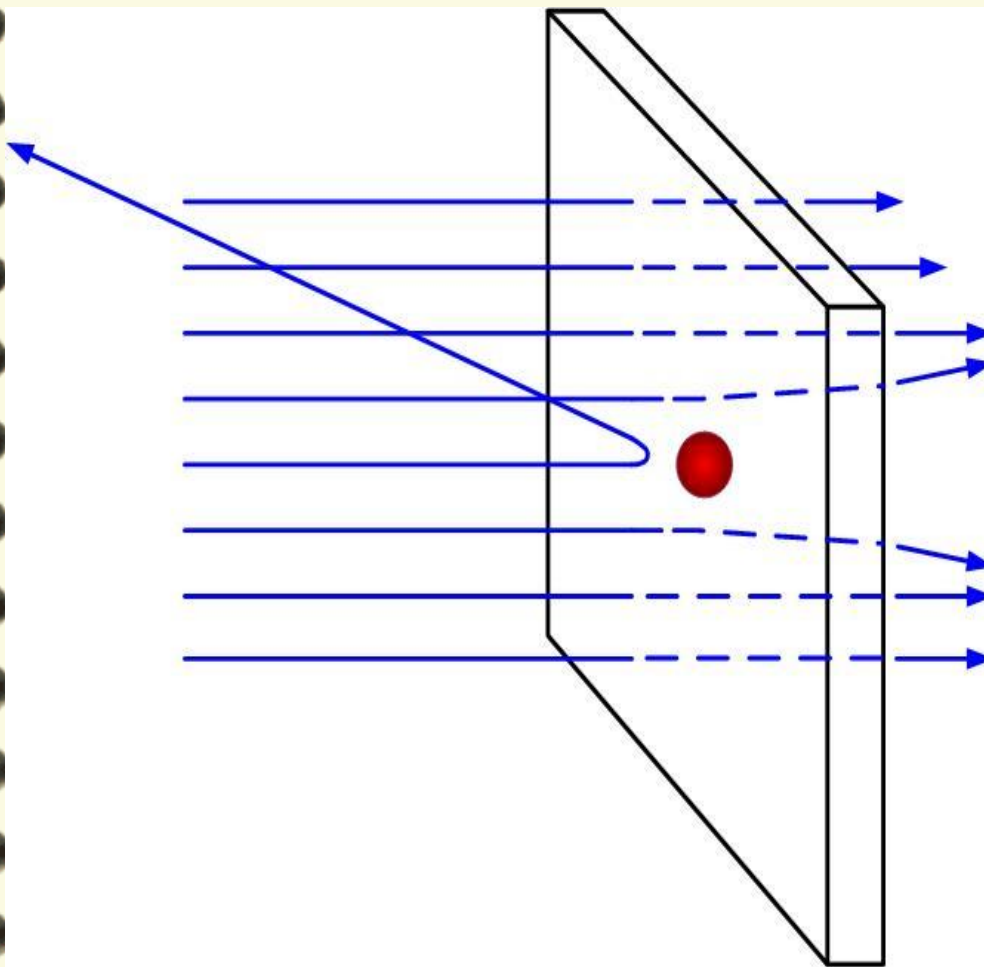


VTS_94_1VOB



Модели атома по Томсону (слева) и Резерфорду (справа)

Рассеяние α -частиц золотой фольгой



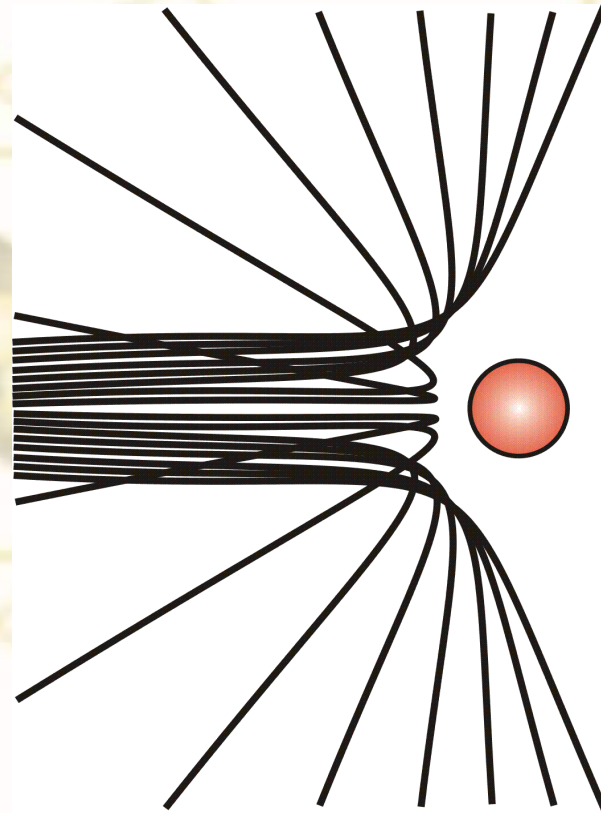
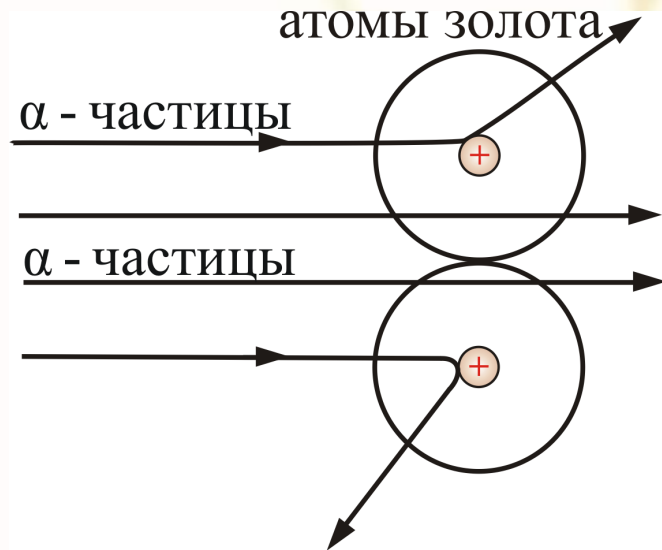
Единственным правдоподобным объяснением рассеяния - частиц на большие углы было наличие **массивного, хотя и очень малого положительно заряженного тела внутри атома.**

В конце 1910 года Резерфорд сказал Гейгеру: «Я знаю, как выглядит атом»: в центре атома находится положительно

заряженное ядро, объём которого ничтожно мал по сравнению с размерами атома; вокруг ядра вращаются электроны, число которых приблизительно равно половине атомной массы элемента.

Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3°

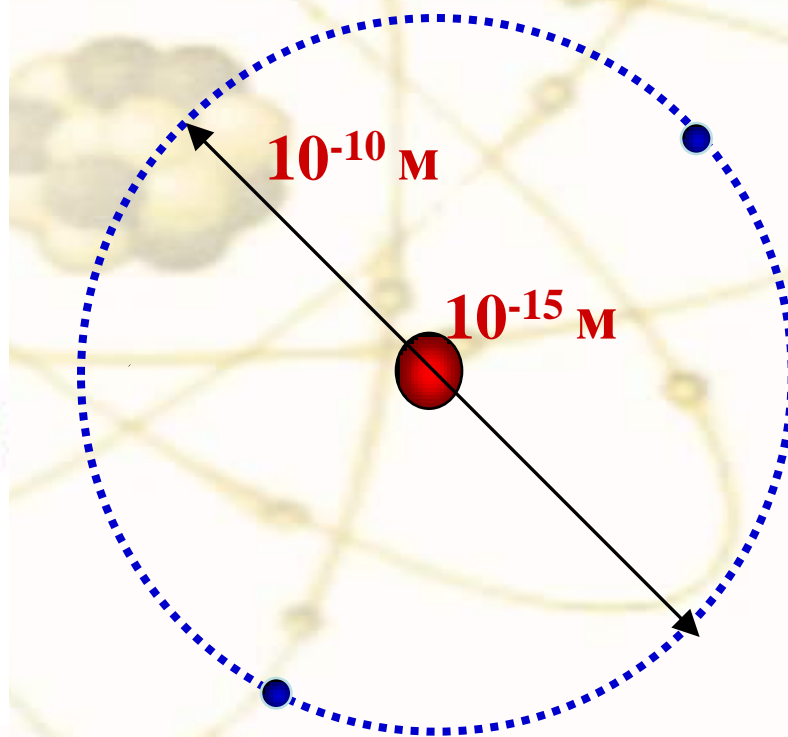
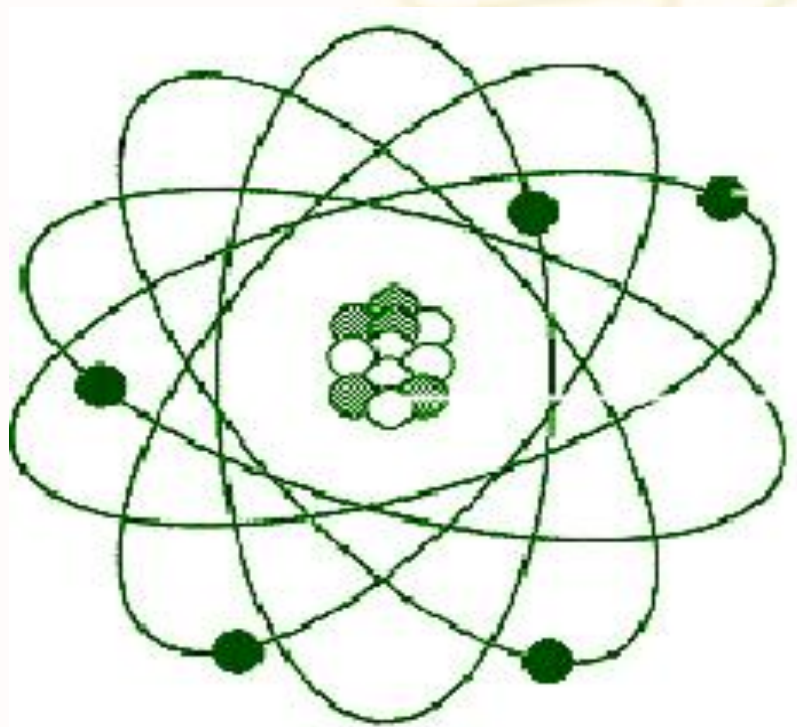
Отдельные α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)

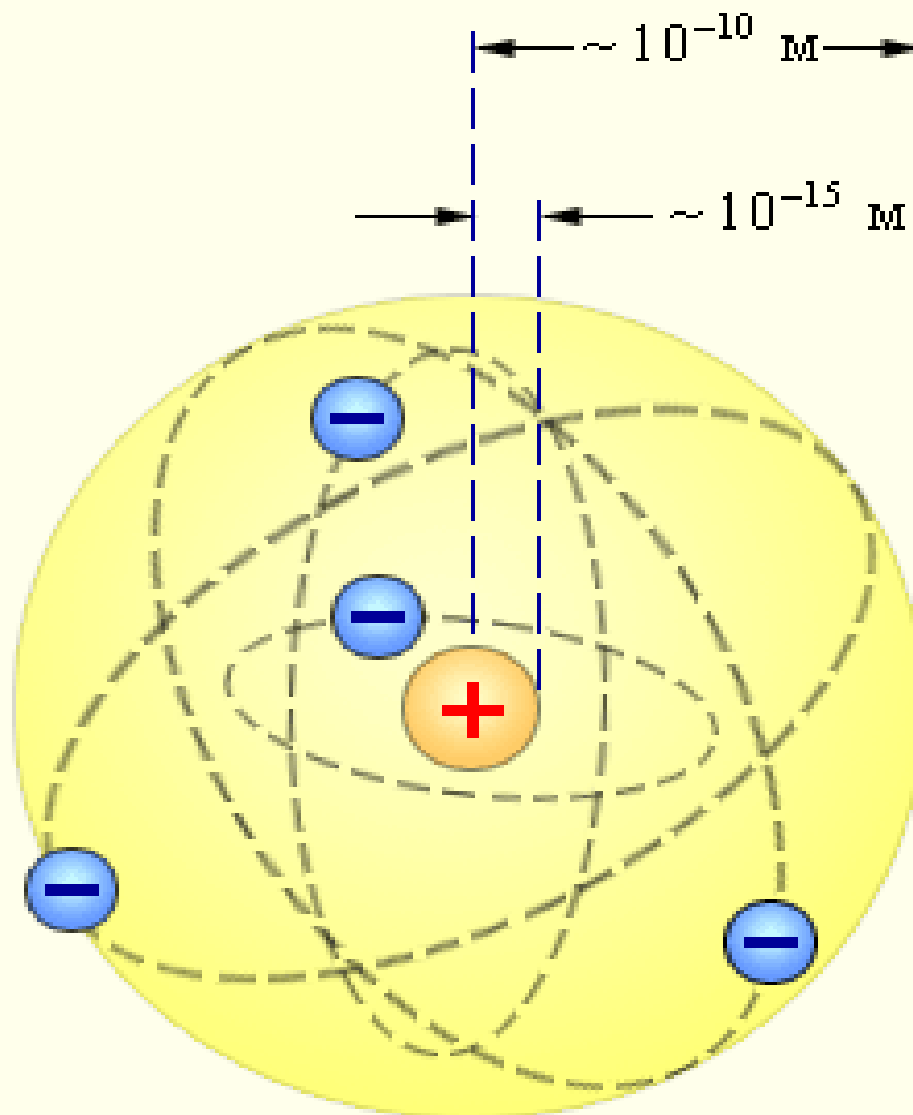


Такое отклонение возможно лишь при взаимодействии практически точечного положительного заряда – **ядра атома** – с близко пролетающей **α -частицей**.

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

99,95% массы атома сосредоточено в ядре.





Планетарная модель атома Резерфорда. Показаны круговые орбиты четырех электронов

Планетарная модель атома Резерфорда.

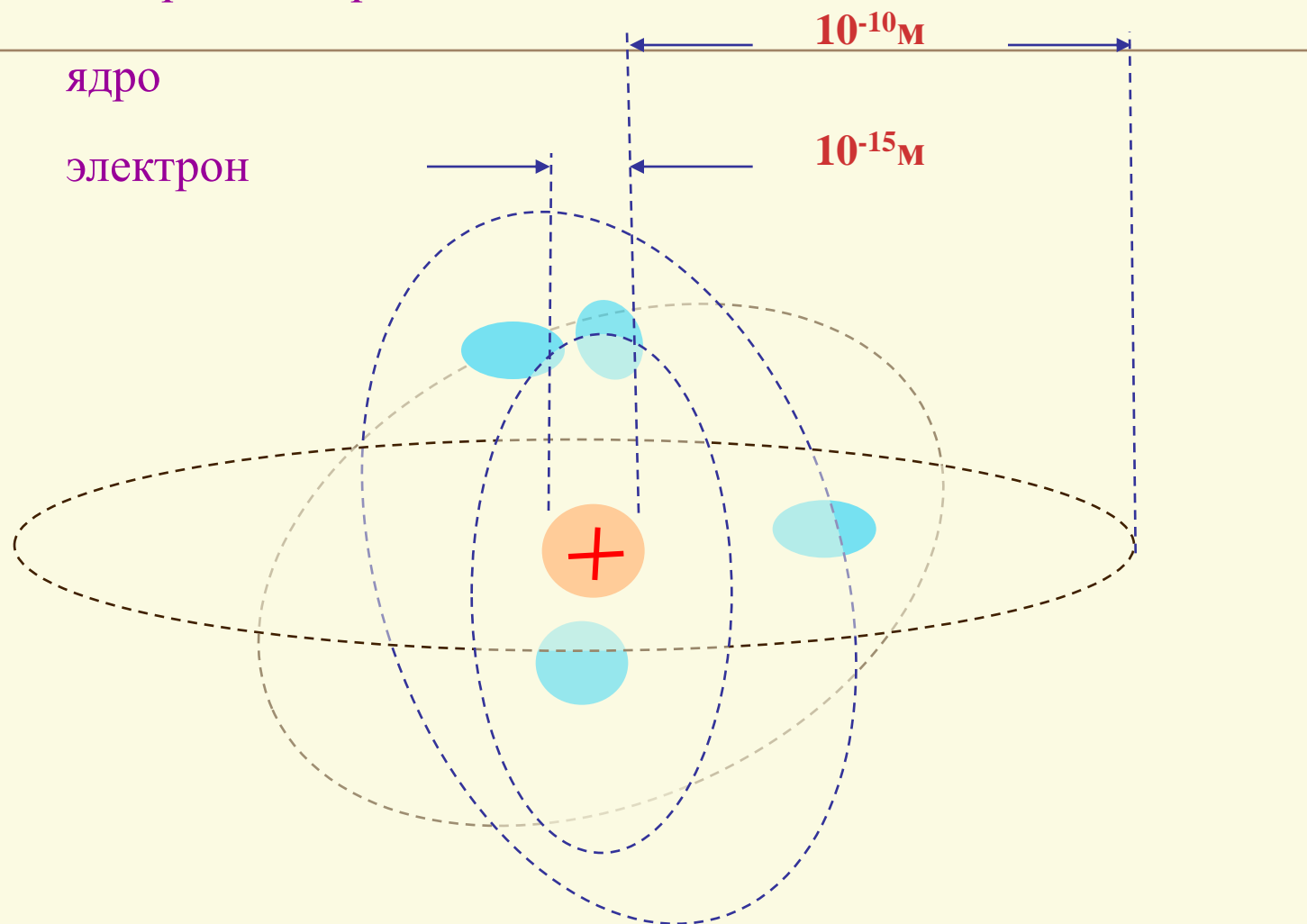
электронные орбиты



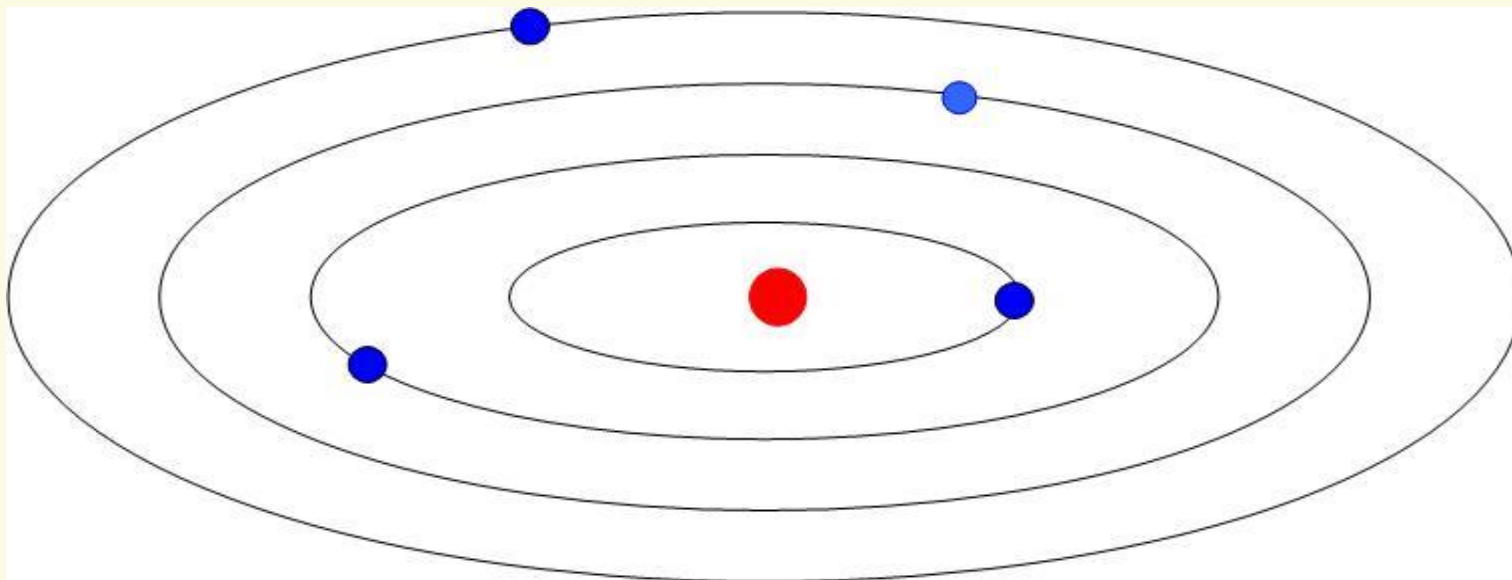
ядро



электрон



И все-таки они вертятся?

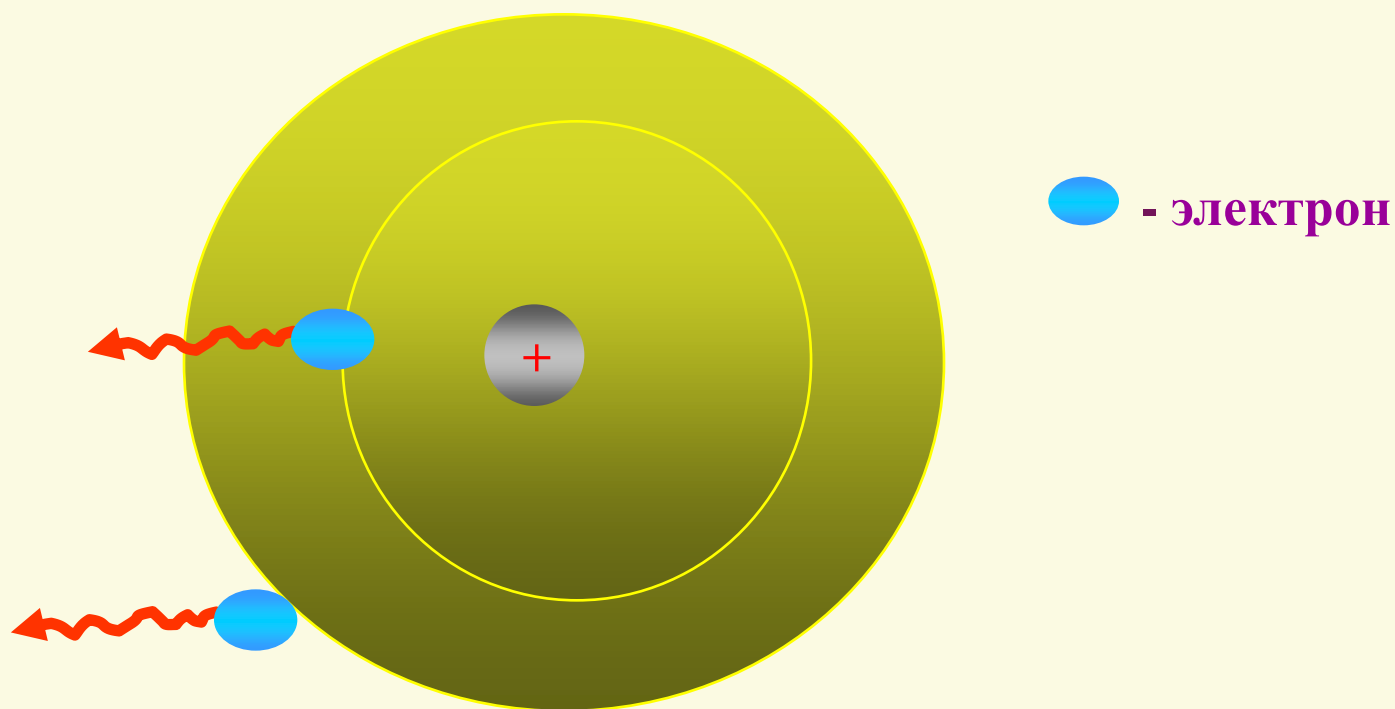


Причины, по которым **планетарный атом существовать не может:**

- **электроны движутся** по замкнутым траекториям, следовательно, они движутся **с ускорением**;
- **заряженные частицы, движущиеся с ускорением**, должны **излучать ЭМВ** и поэтому терять энергию, а значит, и скорость;
- в результате **электрон должен упасть на ядро** за 10^{-8} с.

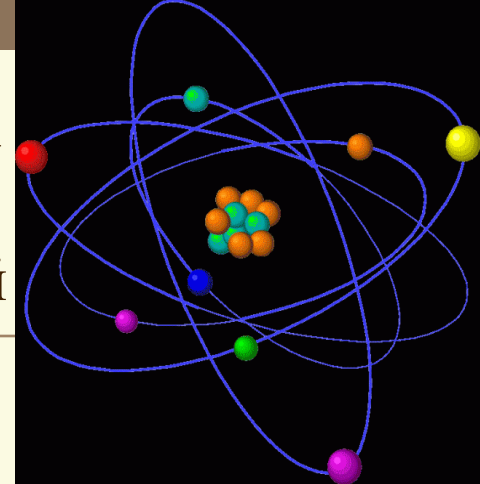
По законам классической электродинамики движущийся с ускорением заряд должен излучать электромагнитные волны, уносящие энергию. За короткое время (порядка 10^{-8} с) все электроны в атоме Резерфорда должны растратить всю свою энергию и упасть на ядро.

То, что этого не происходит в устойчивых состояниях атома, показывает, что внутренние процессы в атоме не подчиняются классическим законам.



Модель **атома Резерфорда** при несомненных достоинствах содержала важное противоречие: в соответствии с законами классической электродинамики **вращающийся вокруг ядра электрон** должен был **непрерывно испускать электромагнитное излучение, теряя энергию**. Вследствие этого **радиус орбиты электрона** должен был быстро **уменьшаться**, и рассчитанное из этих представлений время жизни атома оказывалось ничтожно малым. Тем не менее, модель Резерфорда послужила основой для создания принципиально **новой теории**, которую разработал в 1913 г. датский физик Нильс Хенрик Давид **Бор**.

Модель Бора опиралась на **квантовую гипотезу**, которую выдвинул в 1900 г. немецкий физик Макс Карл Эрнст Людвиг **Планк**. Планк постулировал, что **вещество** может **испускать энергию излучения только конечными порциями**, пропорциональными частоте этого излучения.

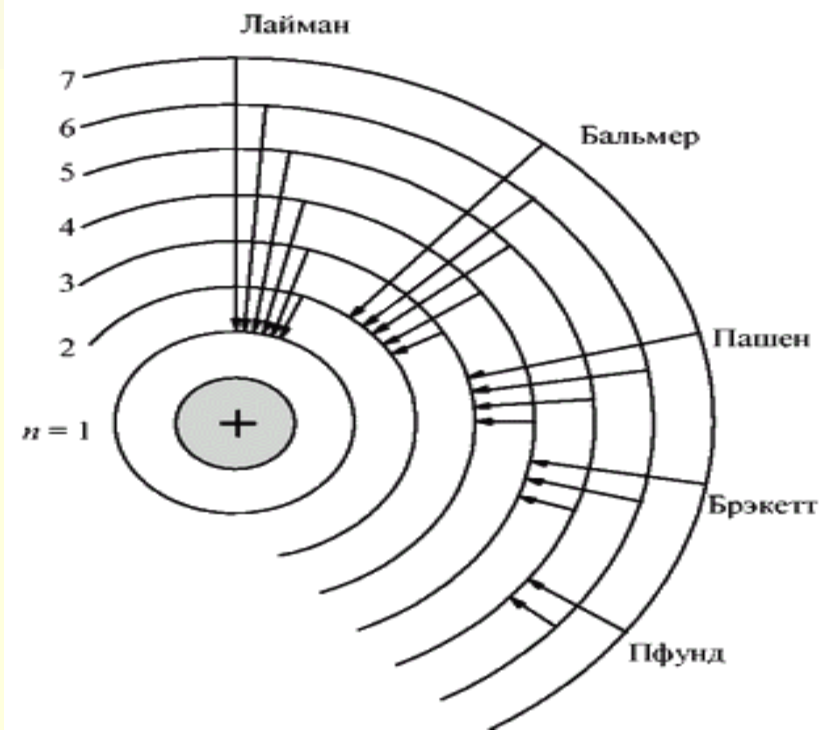
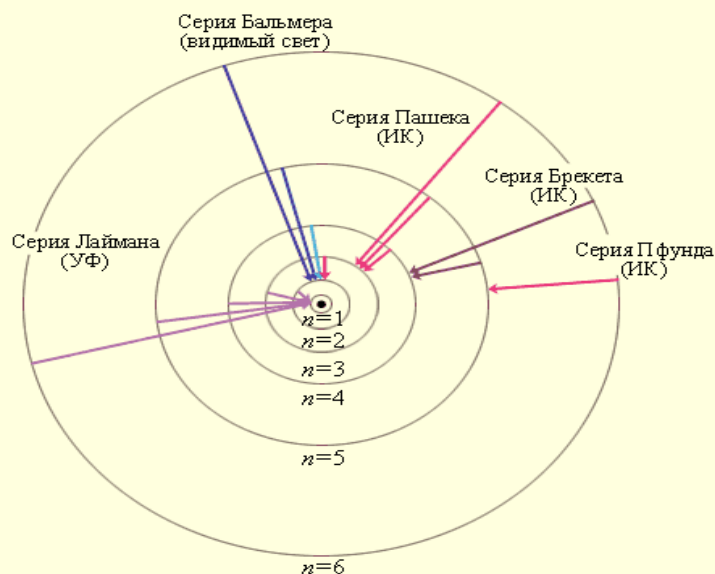


Элементарная теория Бора.



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.

Ещё одной **предпосылкой** для **боровской модели атома** стали **серии спектральных линий водорода**, которые обнаружили в 1885 г. швейцарский ученый Иоганн Якоб **Бальмер**, в 1906 г. американский физик Теодор **Лайман** и в 1909 г. немецкий физик Фридрих **Пашен**. Эти серии (в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра) подчинялись очень простой закономерности: частоты были пропорциональны разности обратных квадратов целых чисел.

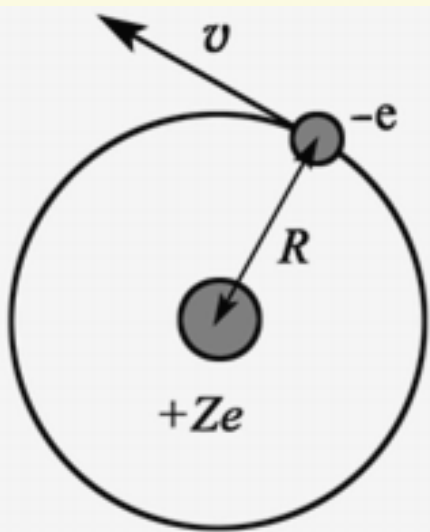


Постулаты Бора

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

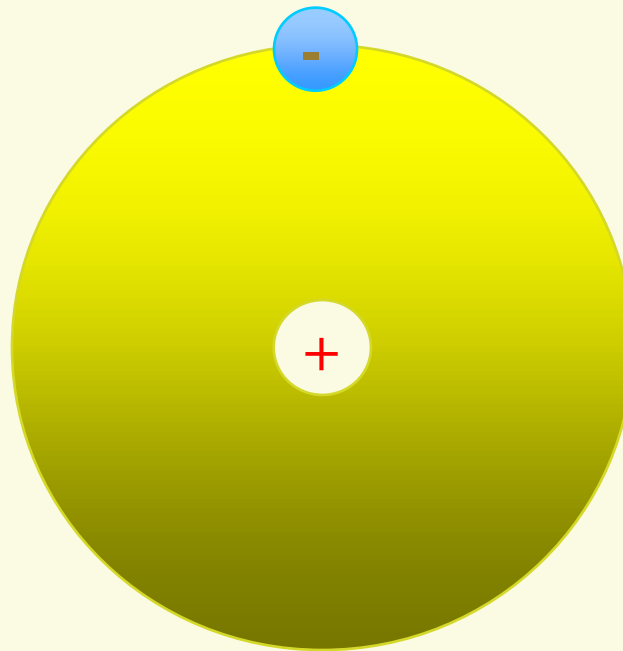
квантовое число.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых **стационарных** или **квантовых** состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . **В стационарных состояниях атом не излучает.** Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой **энергетических уровней**, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию с дискретным значением энергии E_1, E_2, E_3, \dots . В этих состояниях вопреки классической электродинамике атом не излучает (поэтому они и называются стационарными).

ПЕРВЫЙ ПОСТУЛАТ БОРА

Атомная система может находиться только в особых стационарных квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n .

В стационарных состояниях атом не излучает.

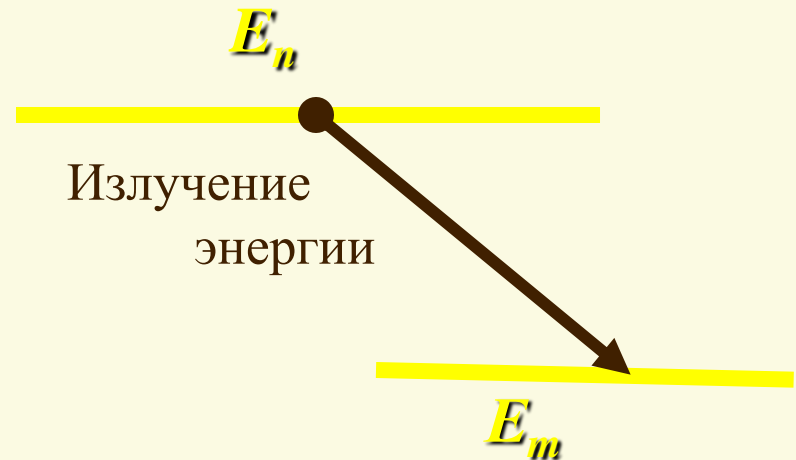
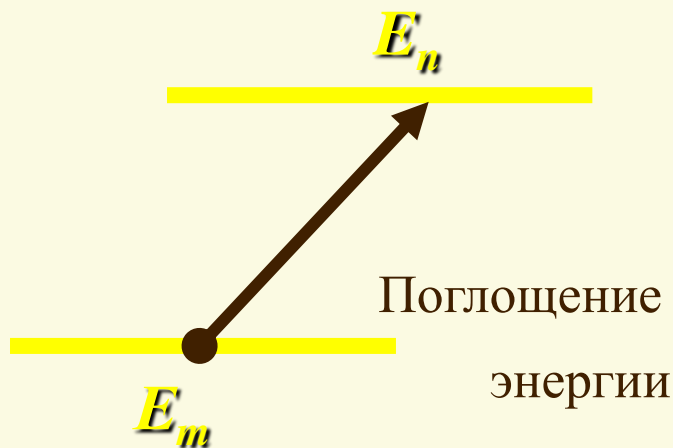


2. Излучение или поглощение энергии в виде кванта энергии $h\nu$ происходит лишь при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.

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

$$h\nu = E_n - E_m$$

- Правило частот Бора
 m, n – номера состояний.



Второй постулат Бора (правило частот)

формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m,$$

где h – постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

ВТОРОЙ ПОСТУЛАТ БОРА

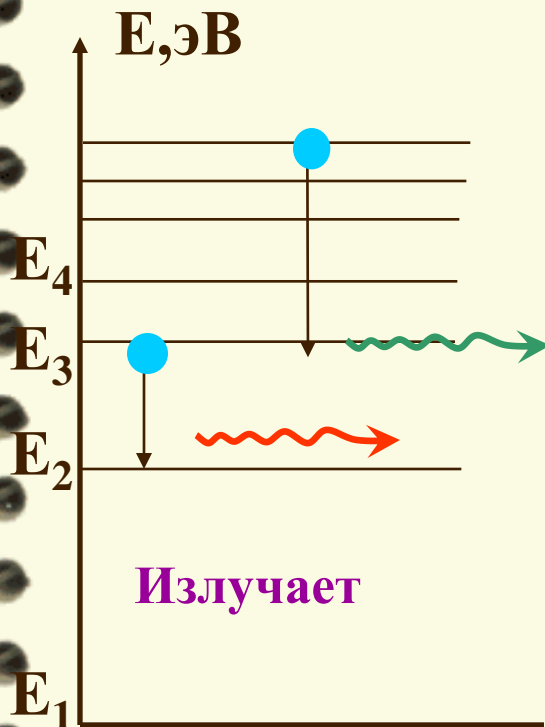
При переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_n в стационарное состояние с меньшей энергией E_m излучается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

h – постоянная Планка

Частота излучения

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$



ВТОРОЙ ПОСТУЛАТ БОРА

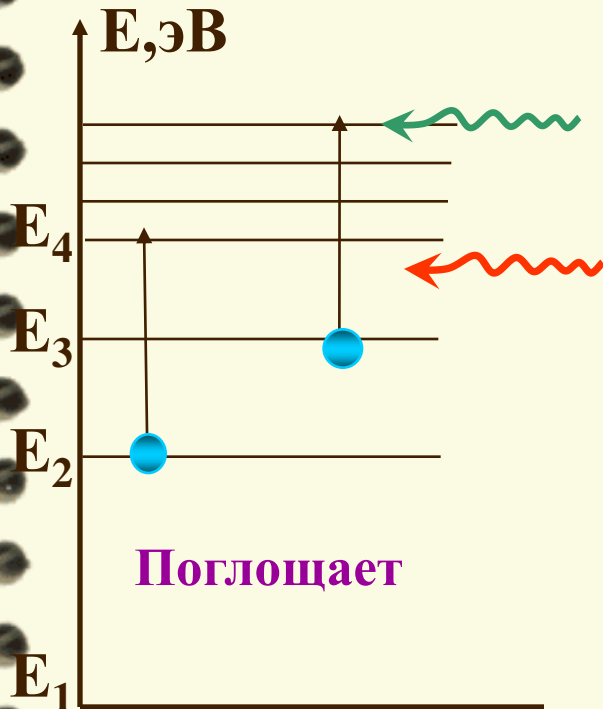
При переходе атома из стационарного состояния с меньшей энергией E_n в стационарное состояние с большей энергией E_m поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

h – постоянная Планка

Частота поглощения

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$



электрон



квант

Правило квантования орбит Бора утверждает:
в стационарном состоянии атома электрон,
двигаясь по круговой орбите, должен иметь
квантованные значения момента импульса,
удовлетворяющие условию:

$$m_e v \cdot r = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

где r — радиус n —ой орбиты, $m_e v \cdot r$ — момент импульса
электрона на этой орбите.

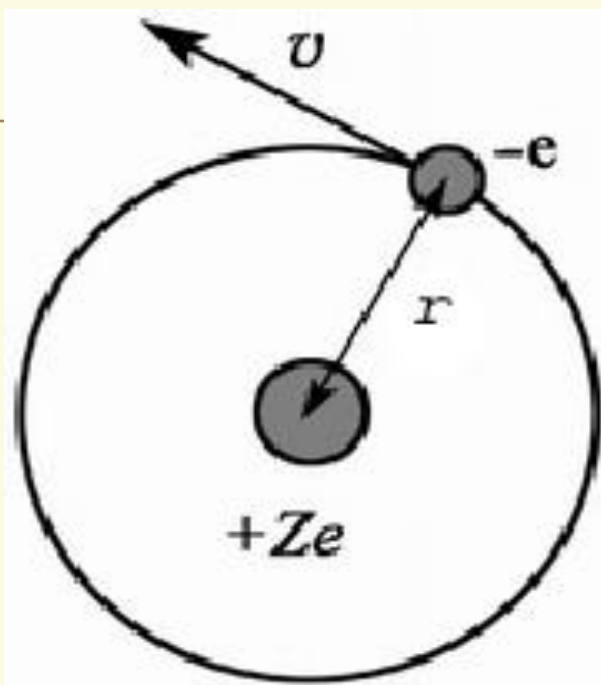
$$m_e v \cdot r = n \frac{h}{2\pi}$$

$$2\pi \cdot r = n \frac{h}{m_e v}$$

$$2\pi \cdot r = n \lambda_B$$

На длине окружности орбиты
укладывается целое число
де Бройлевских длин волн
электрона, т.е. на стационар-
ной орбите **электрон** можно
изобразить **стоячей волной**.

Уравнение движения электрона получим из равенства центробежной силе кулоновской силе:



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

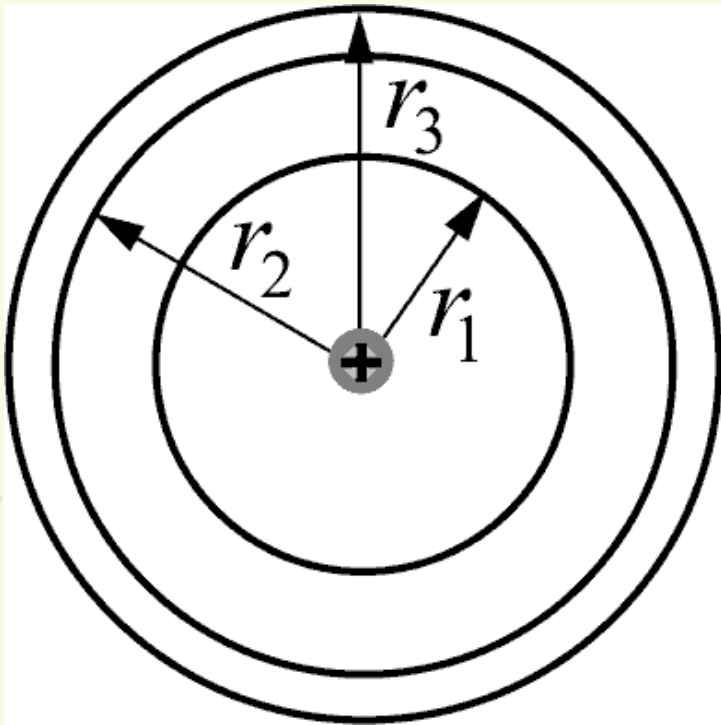
$$m_e v r = n \hbar$$

Отсюда найдем **радиус стационарных орбит:**

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

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

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

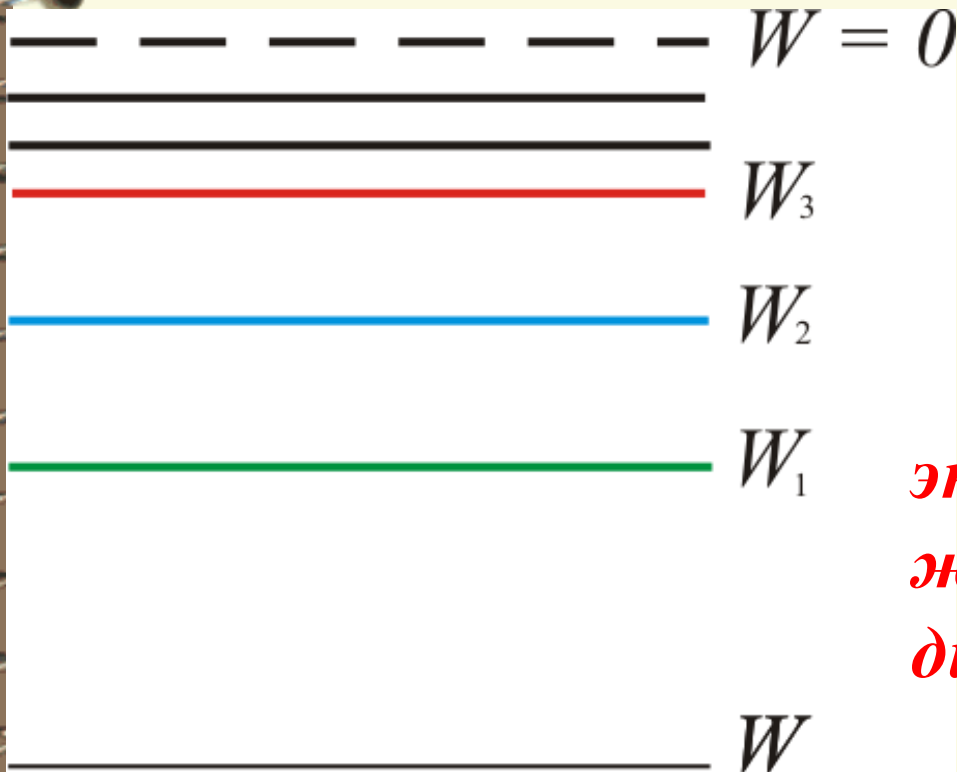


$$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{h}{m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} = \\ = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

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 m излучается фотон с энергией:

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

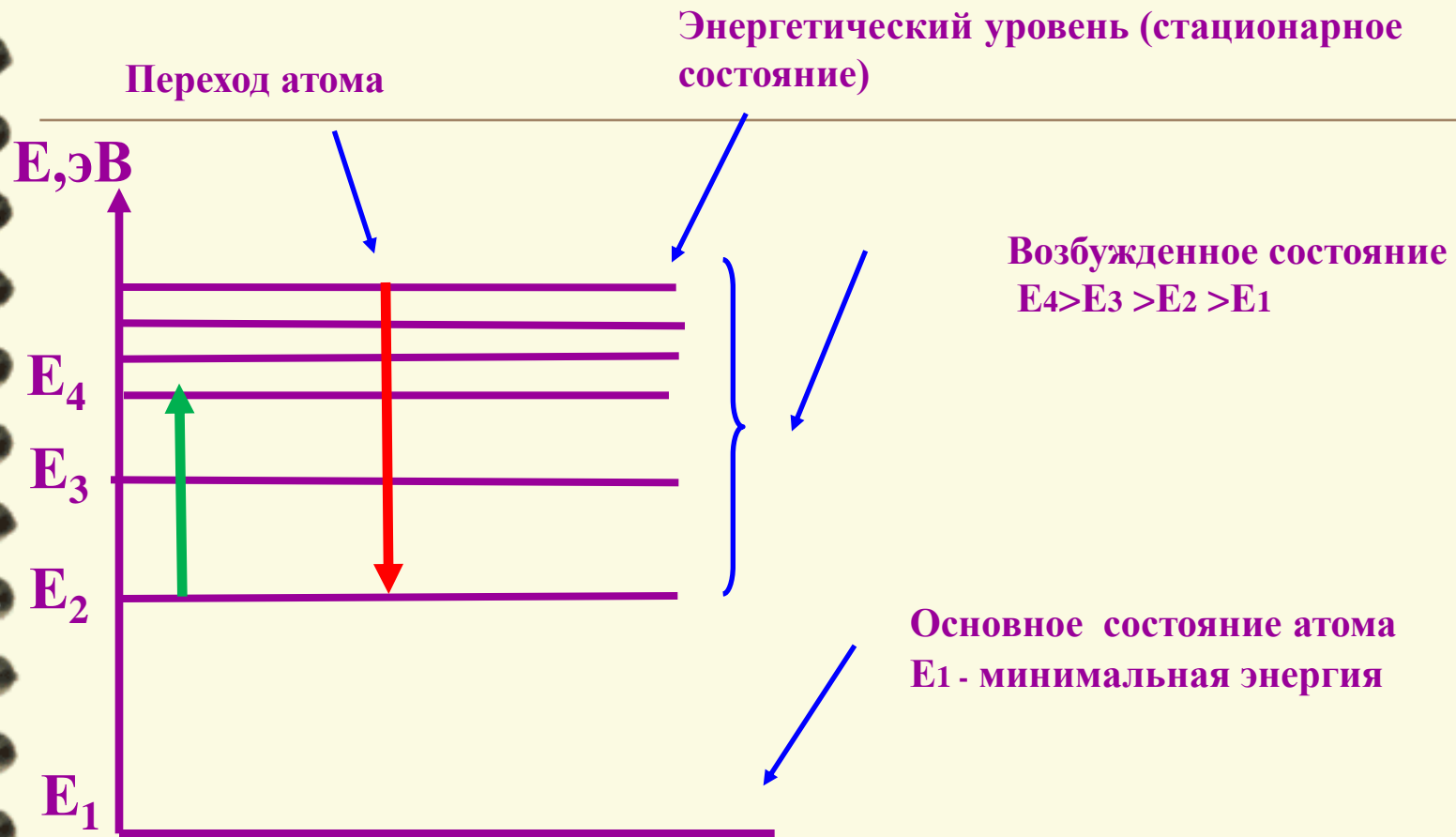
и частота излучения:

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

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

$$R = \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} = 3,292 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$$

Энергетические диаграммы



Серии поглощения атома водорода

$$E_6 = -0.38 \text{ эВ}$$

$$E_5 = -0.54 \text{ эВ}$$

$$E_4 = -0.85 \text{ эВ}$$

$$E_3 = -1.51 \text{ эВ}$$

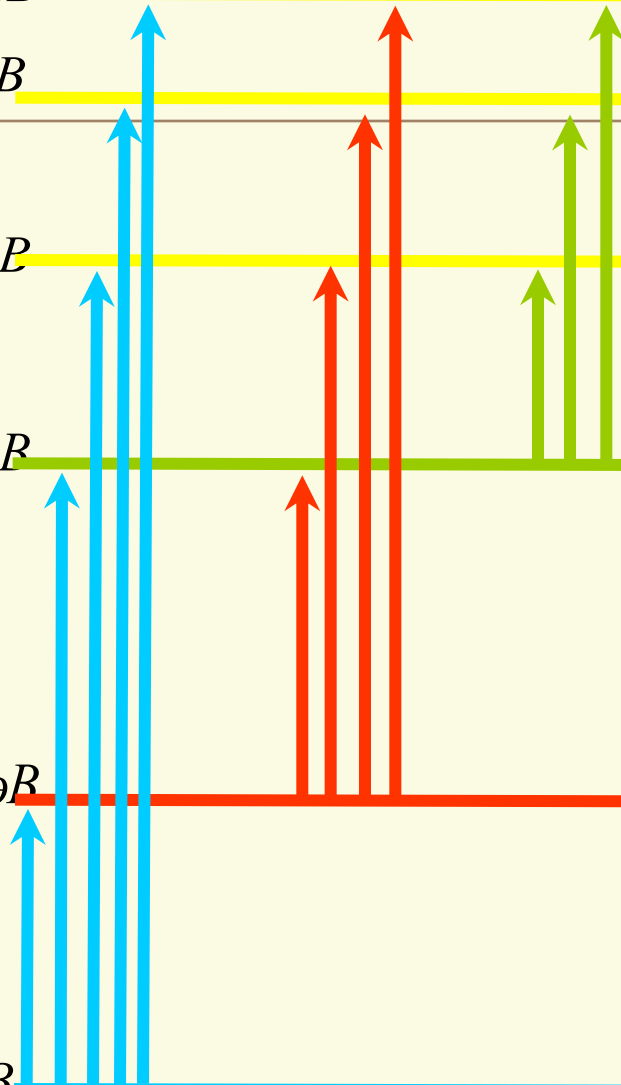
$$E_2 = -3.40 \text{ эВ}$$

$$E_1 = -13.53 \text{ эВ}$$

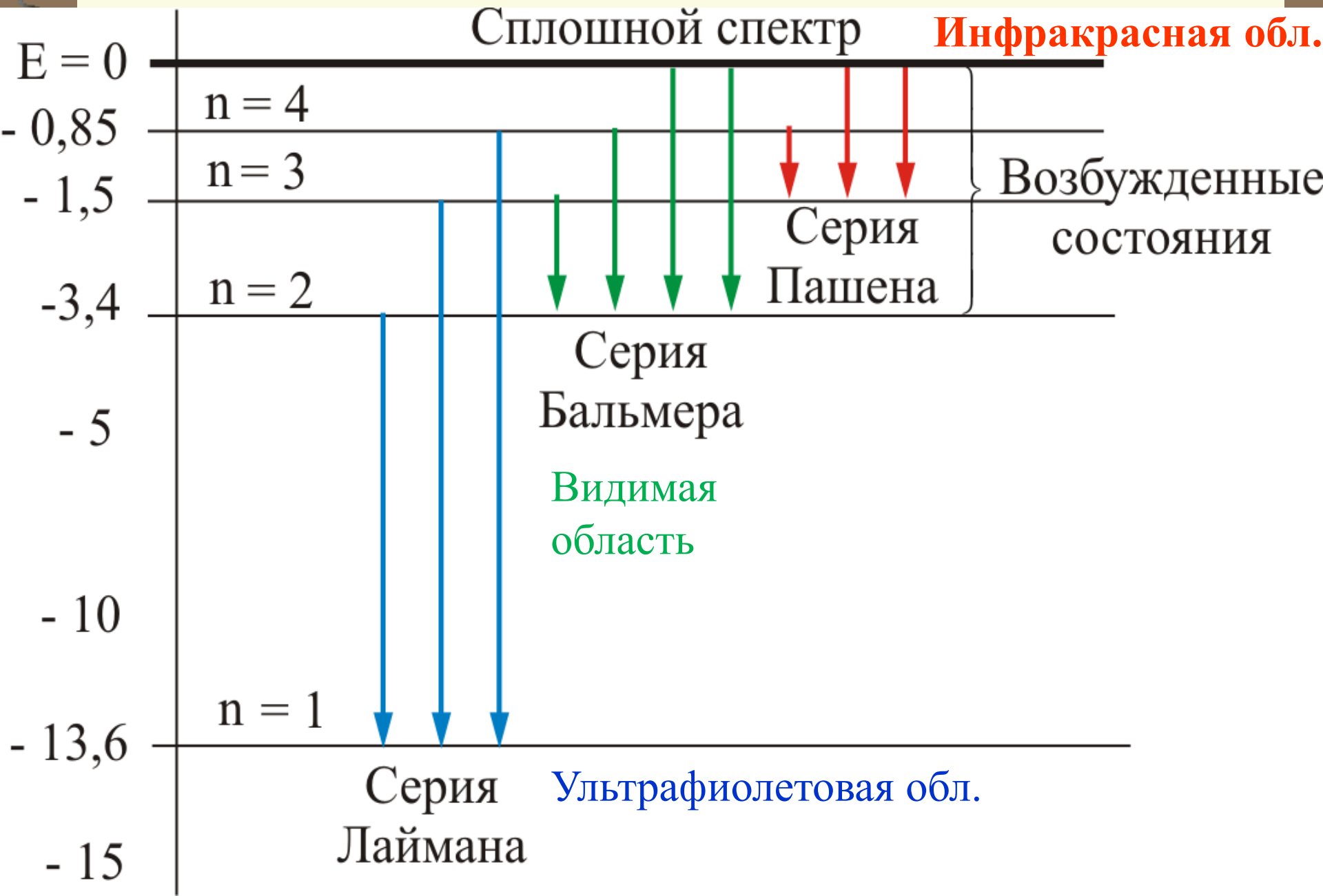
серия Пащенко

серия Бальмера

серия Лаймена



Серии излучения атома водорода



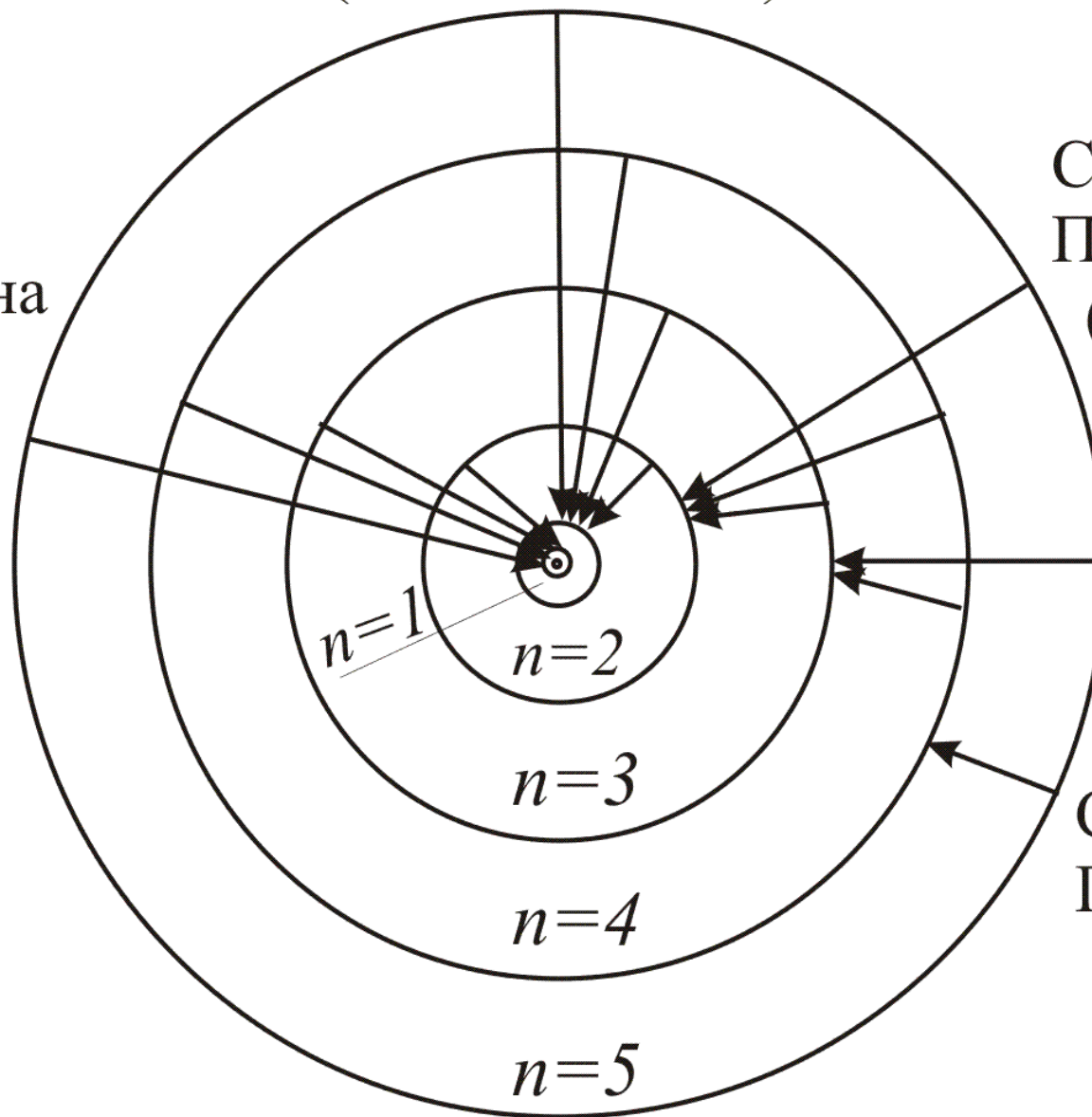
Серия Бальмера
(Видимый свет)

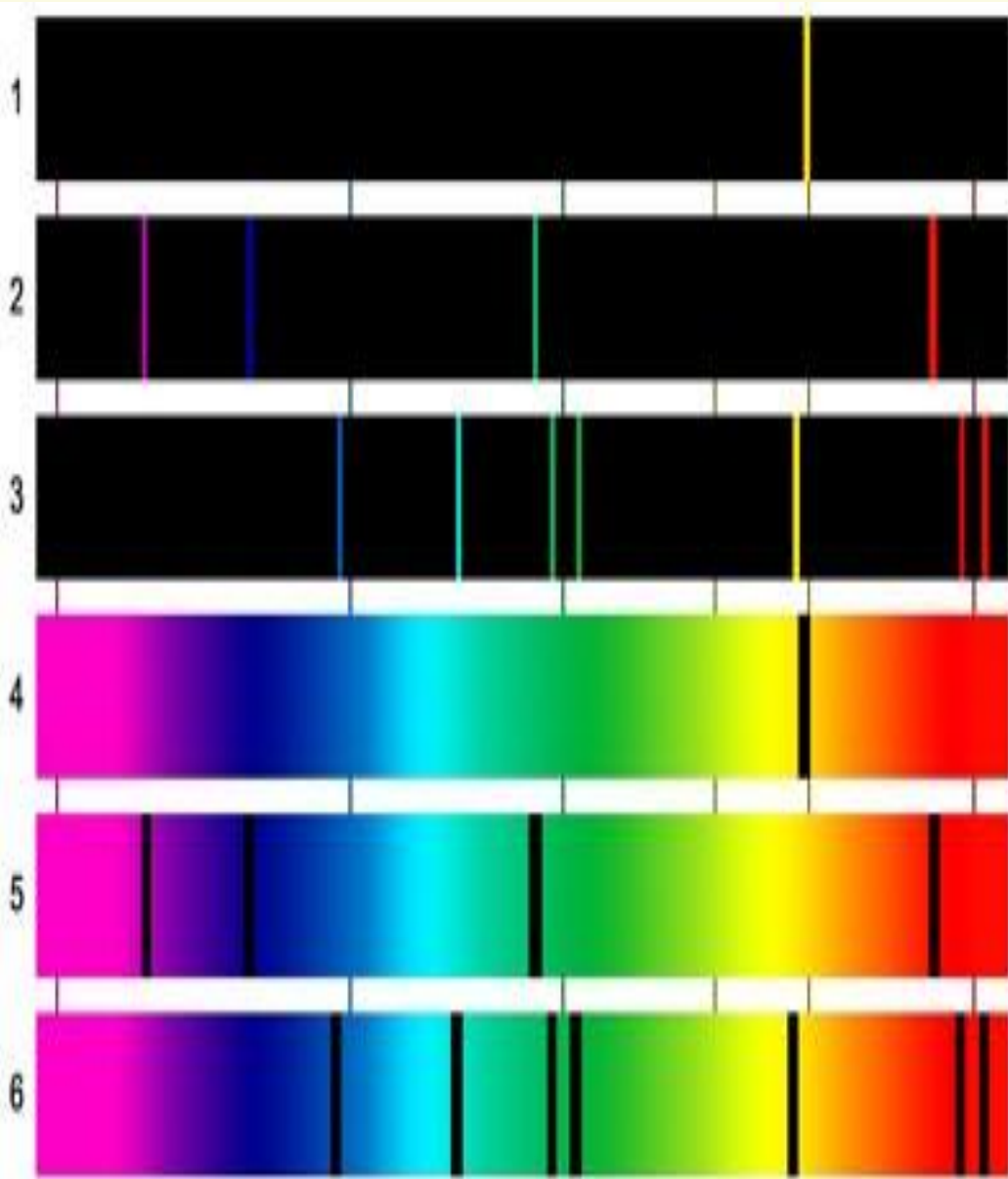
Серия
Лаймана
(УФ)

Серия
Пашена
(ИК)

Серия
Брекета
(ИК)

Серия
Пфунда
(ИК)





Спектры излучения:

1 - натрия,

2 - водорода,

3 - гелия.

Спектры поглощения:

4 - натрия,

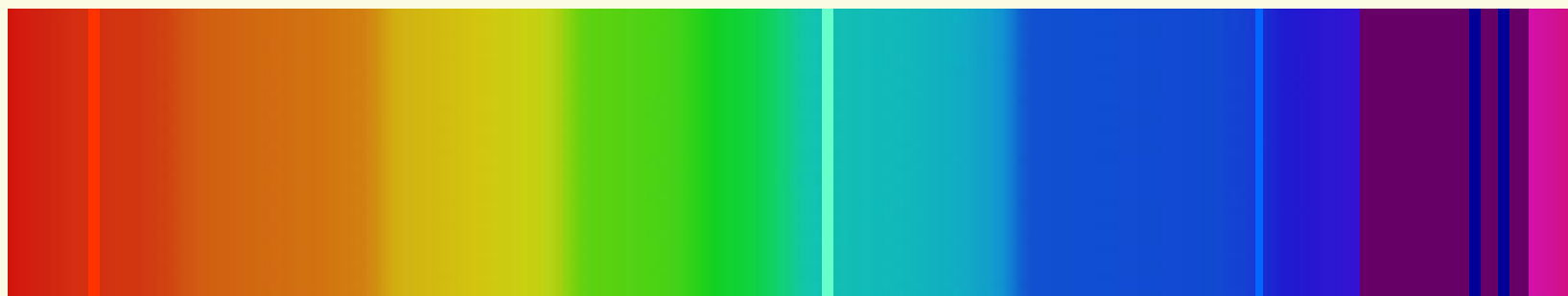
5 - водорода,

6 - гелия.

Сплошной спектр



Спектры атома водорода



H_{α}

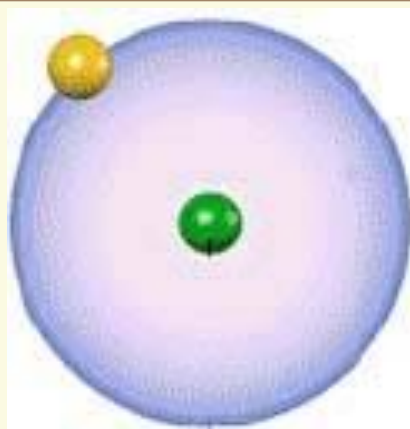
H_{β}

H_{γ}

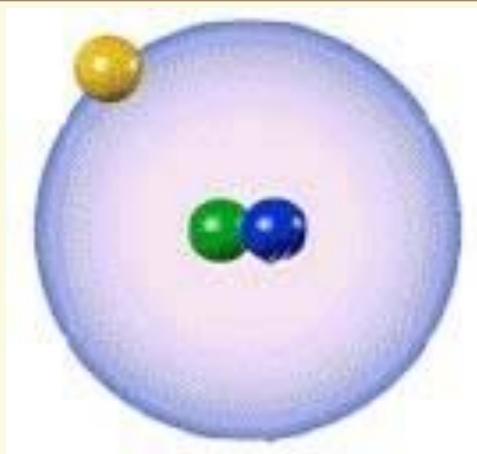
H_{δ}

Модели атомов водорода

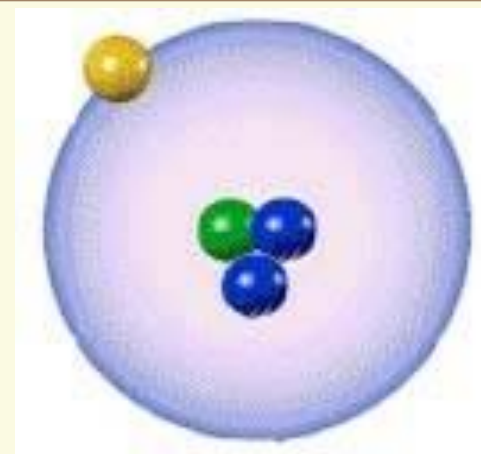
Водород (H)



Дейтерий (D)



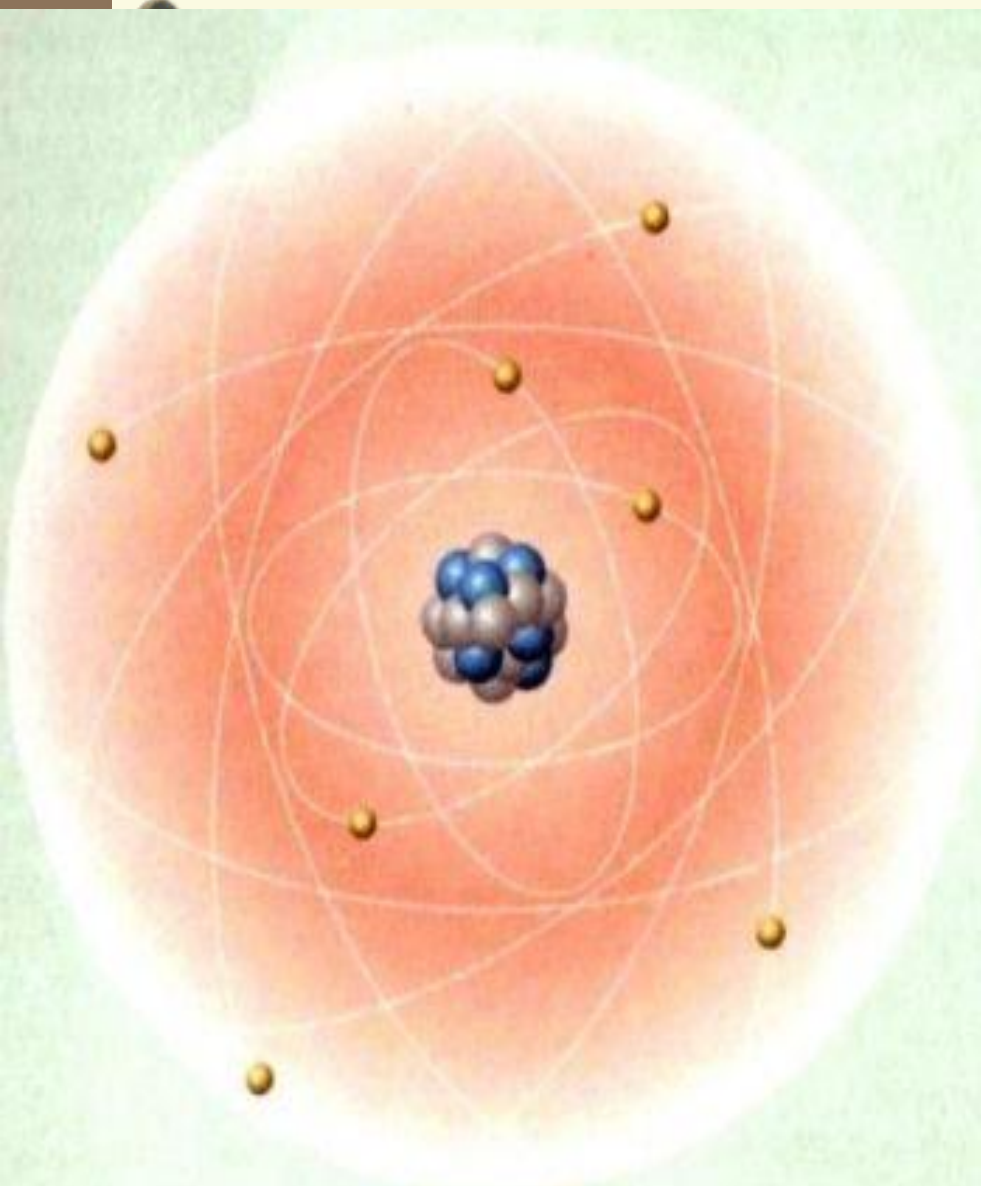
Тритий (T)



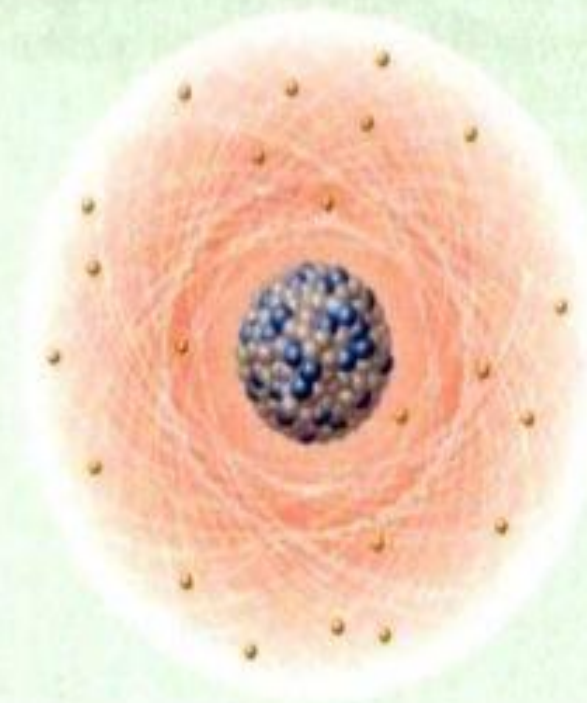
Атомы одного элемента, имеющие одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называются изотопами.

Химические свойства таких атомов одинаковы, но они различны по некоторым физическим свойствам.

В 1961 году изотоп ^{12}C был выбран в качестве международного стандарта атомной массы.



модель атома



атом урана



атом водорода

Экспериментальное подтверждение постулатов Бора

Опыт Франка и Герца

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

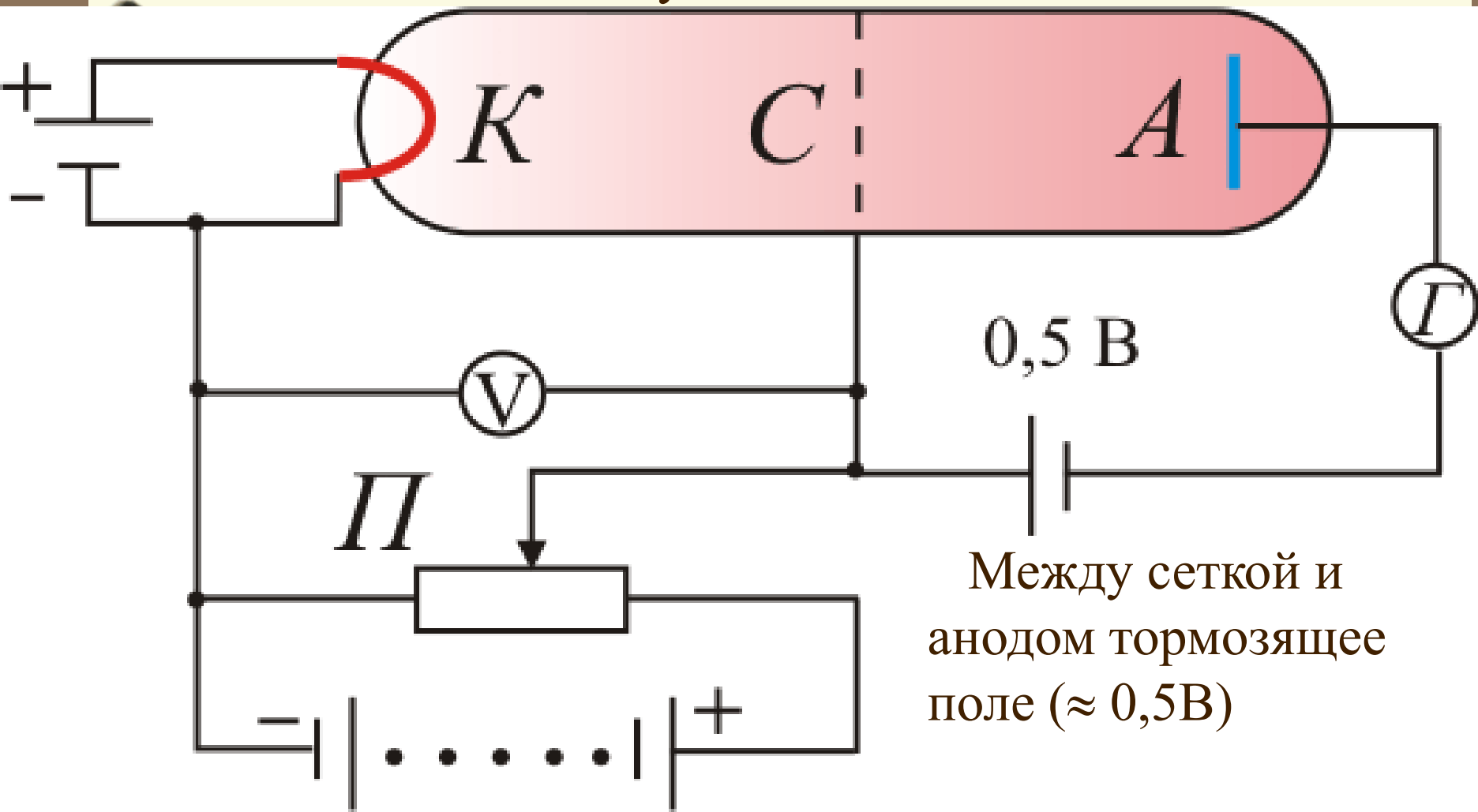
Немецкие ученые Джеймс Франк
и Густав Герц, за экспериментальные
исследования дискретности
энергетического уровня
получили **Нобелевскую
премию в 1925 г.**



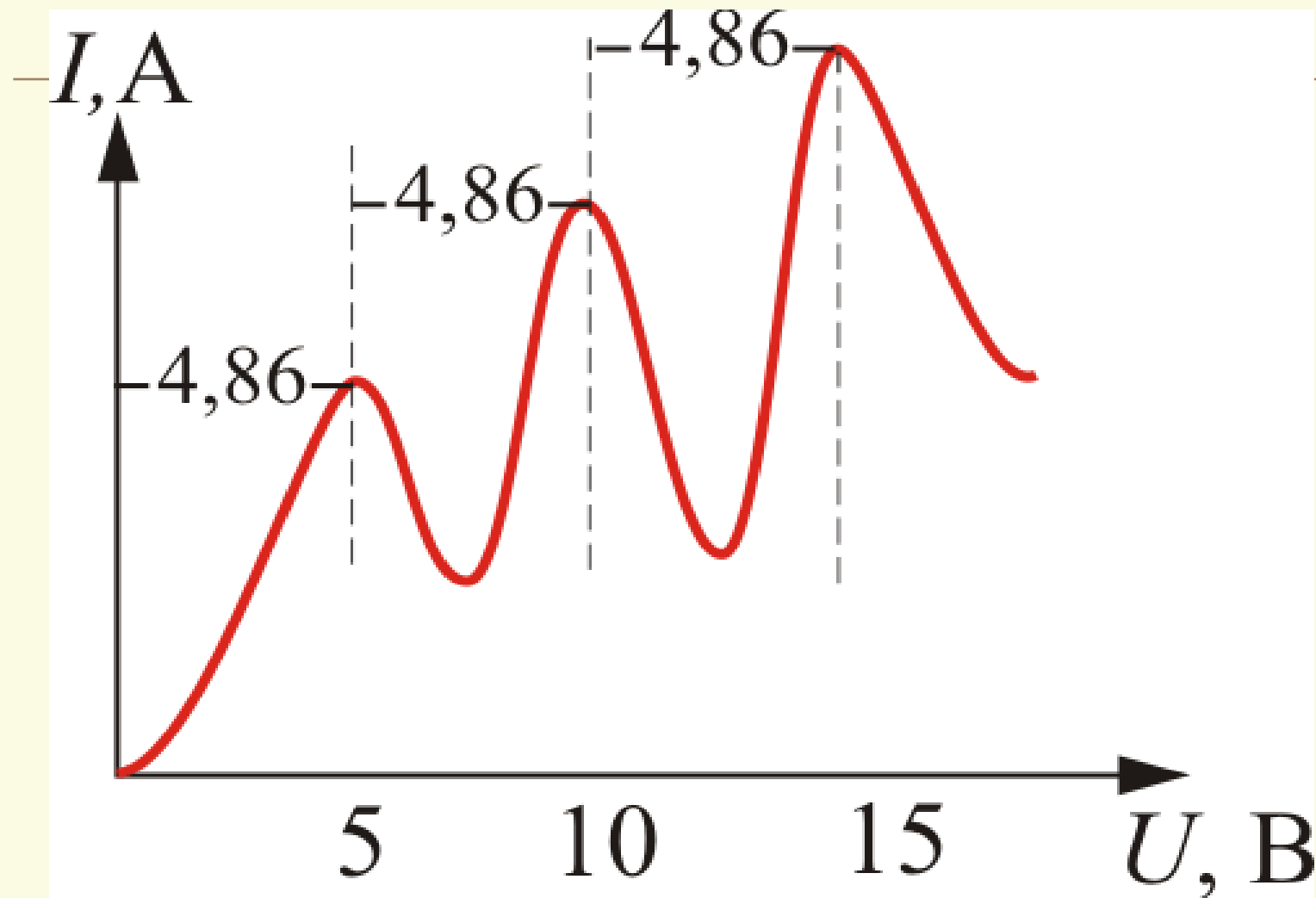
James Franck.



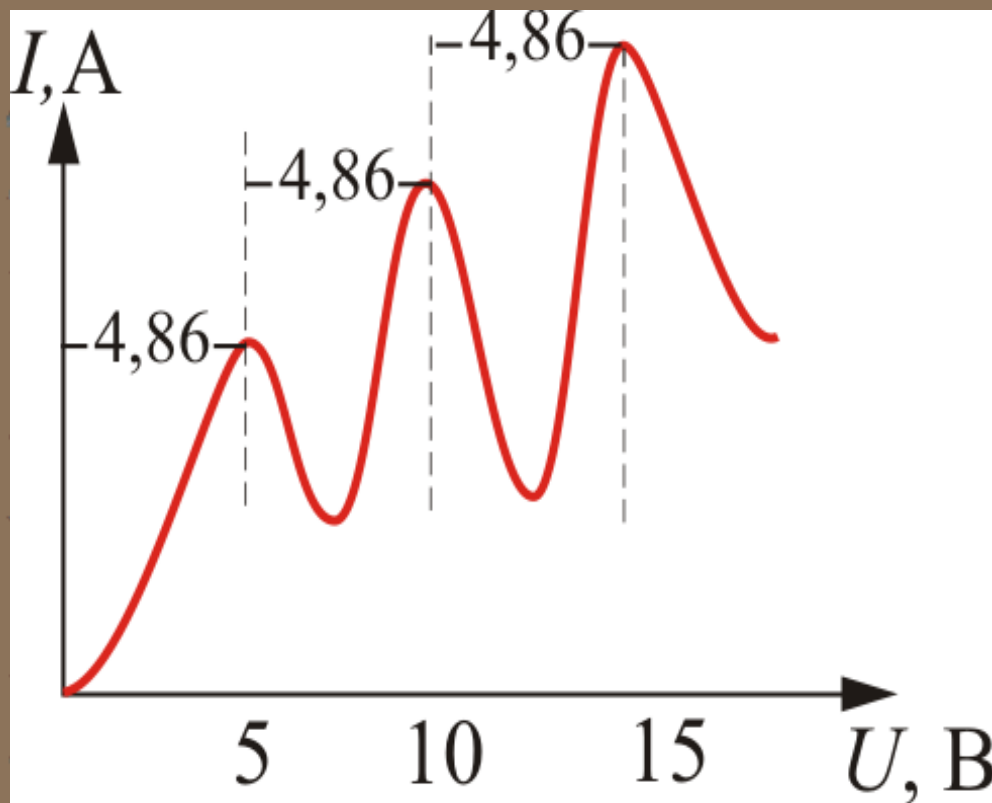
В трубке, заполненной парами ртути при давлении $p \approx 1$ мм рт. ст., три электрода, катод – сетка – анод. Электроны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой.



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



$U = 4,86$ В – 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:**

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

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

При $U < 4,86$ В:

- энергия электронов меньше ΔE_1 ;
- соударения между электронами и атомами ртути носят *упругий характер*.

При $U = 4,86$ 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 $4,86$ 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 $\Delta E_1 = 4,86 \text{ эВ}$ и перешедшие в возбужденное состояние, спустя время $\sim 10^{-8} \text{ с}$ 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:

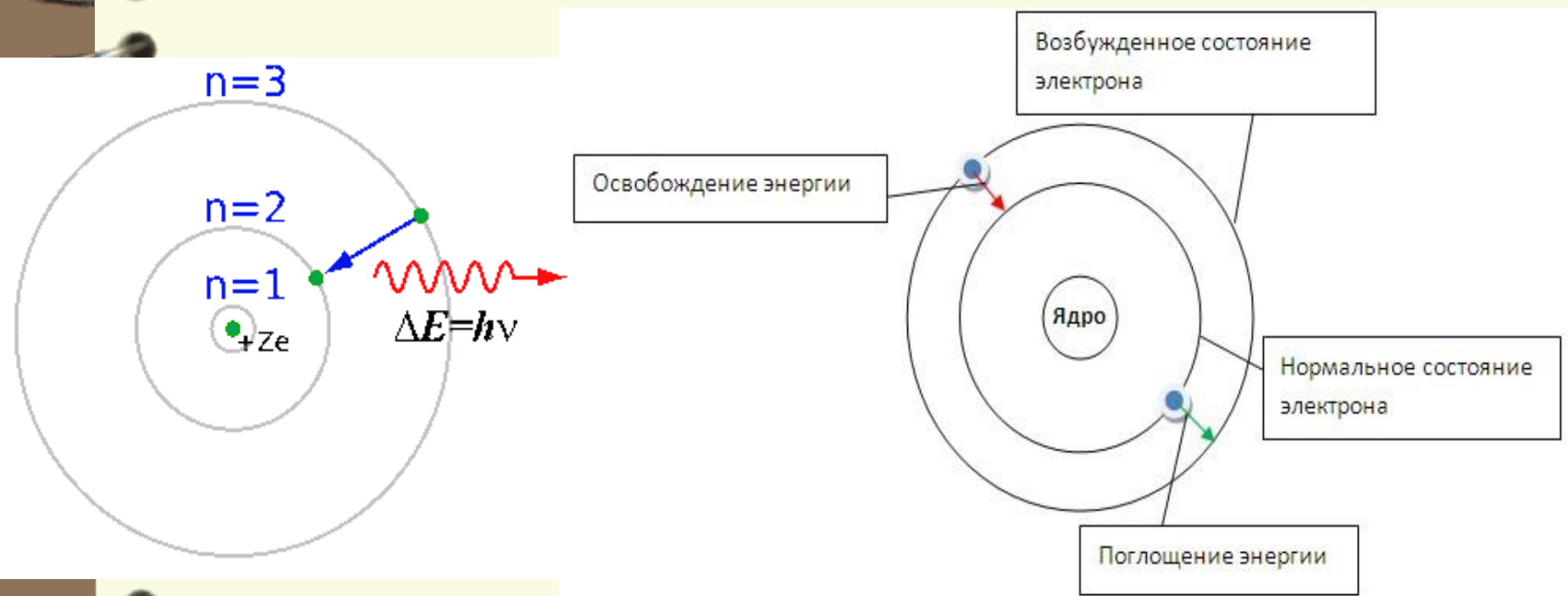
$$\lambda = hc / \Delta E_1 \approx 253,7 \text{ нм}$$

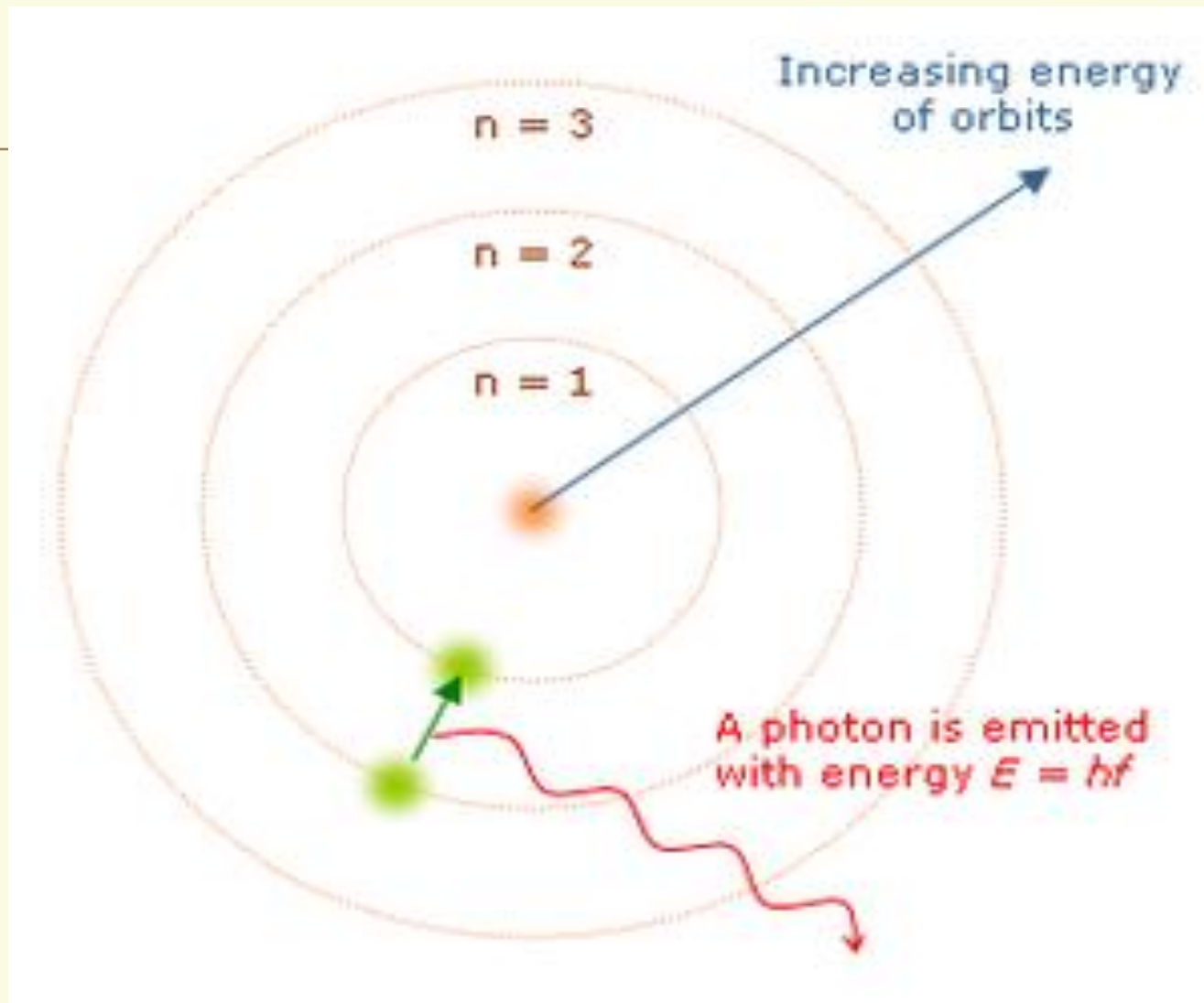
-что соответствует ультрафиолетовому излучению.

Опыт действительно обнаруживает *ультрафиолетовую линию* с $\lambda \approx 253,7 \text{ нм}$

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

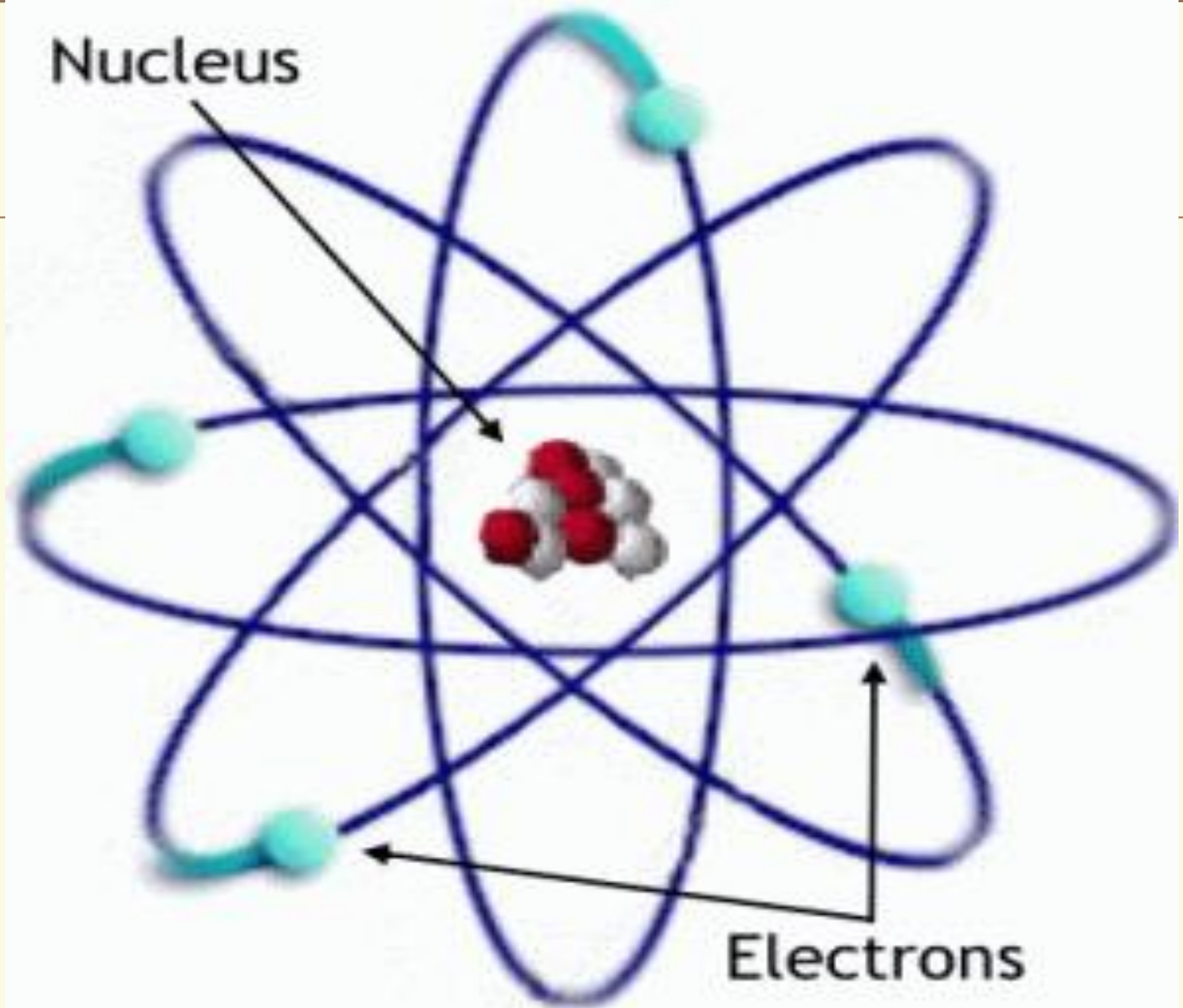
Эти опыты сыграли огромное значение в развитии атомной физики.





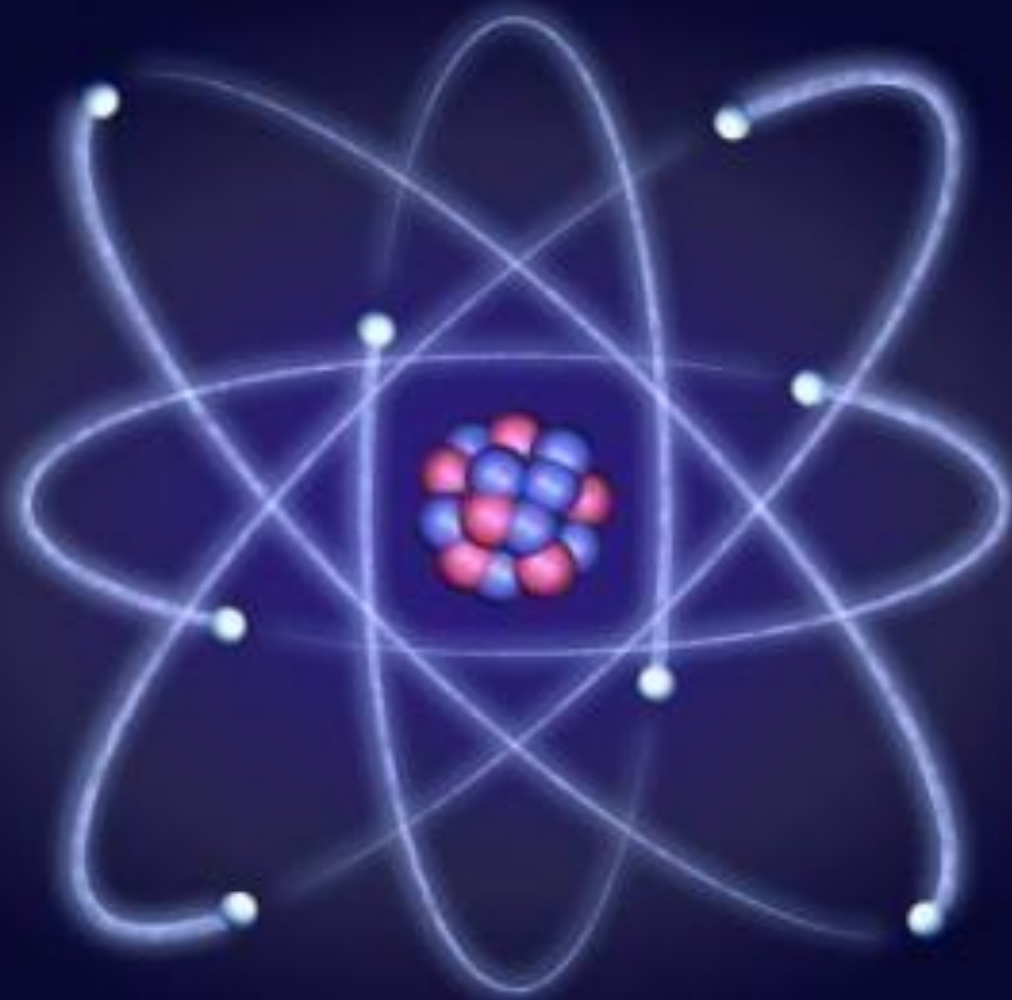
http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=NP9x3Tiu3RE

Nucleus

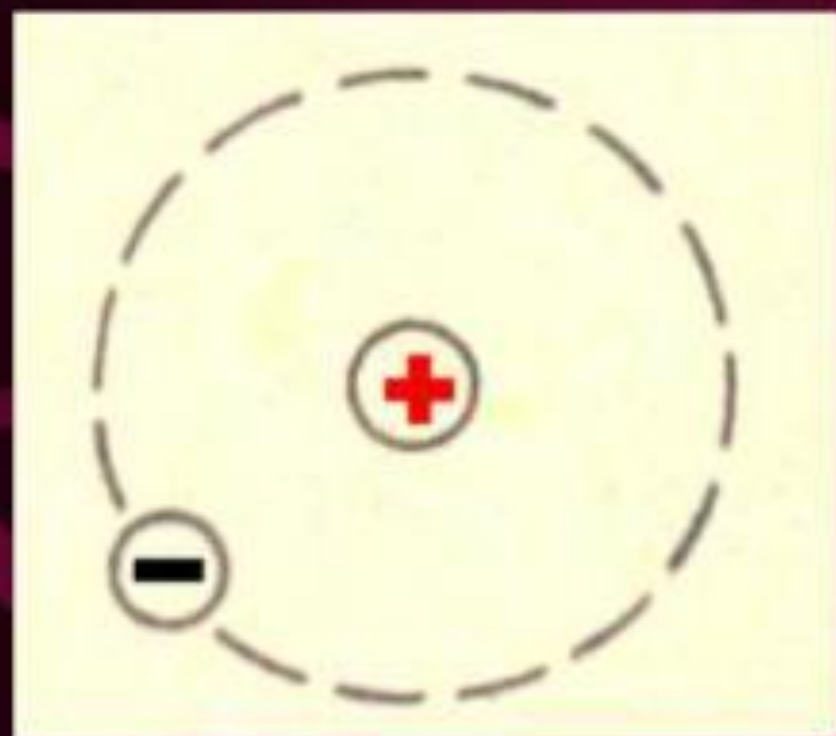


Electrons

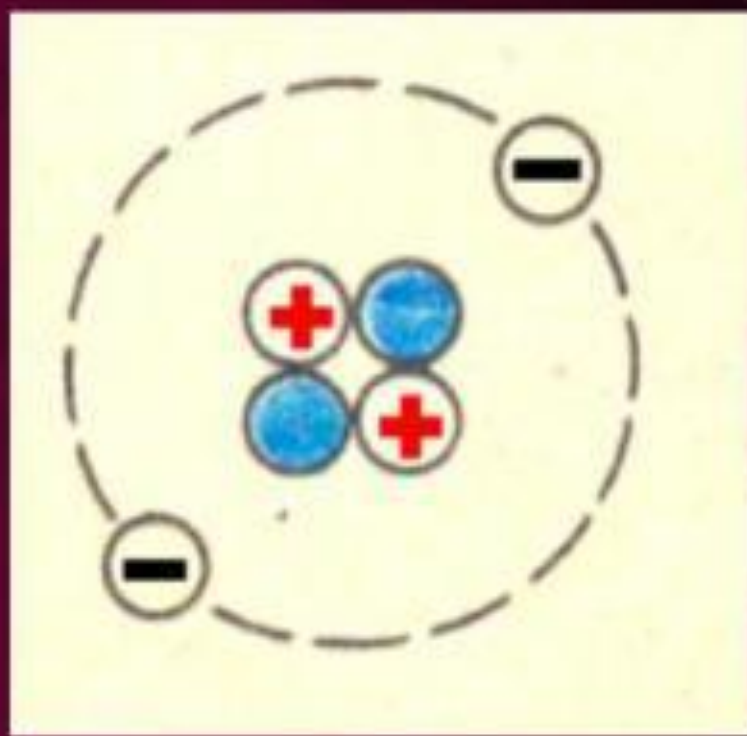
Планетарная модель атома



АТОМ ВОДОРОДА

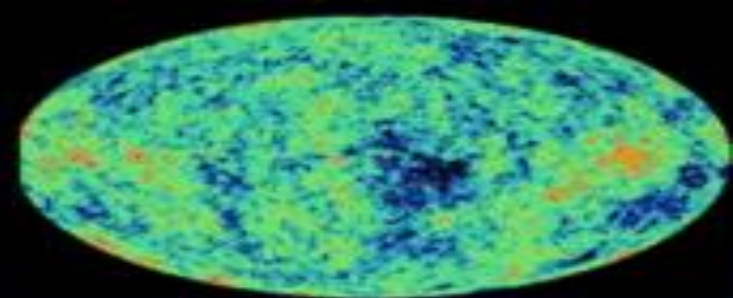


АТОМ ГЕЛИЯ





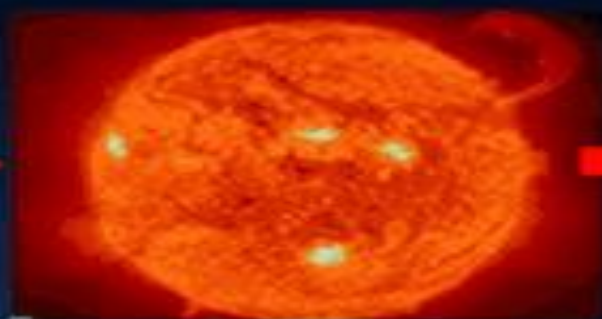
Скопления галактик



Обозримая Вселенная



Галактики



Звезды



Планеты



Хим. вещества в различных агрегатных состояниях



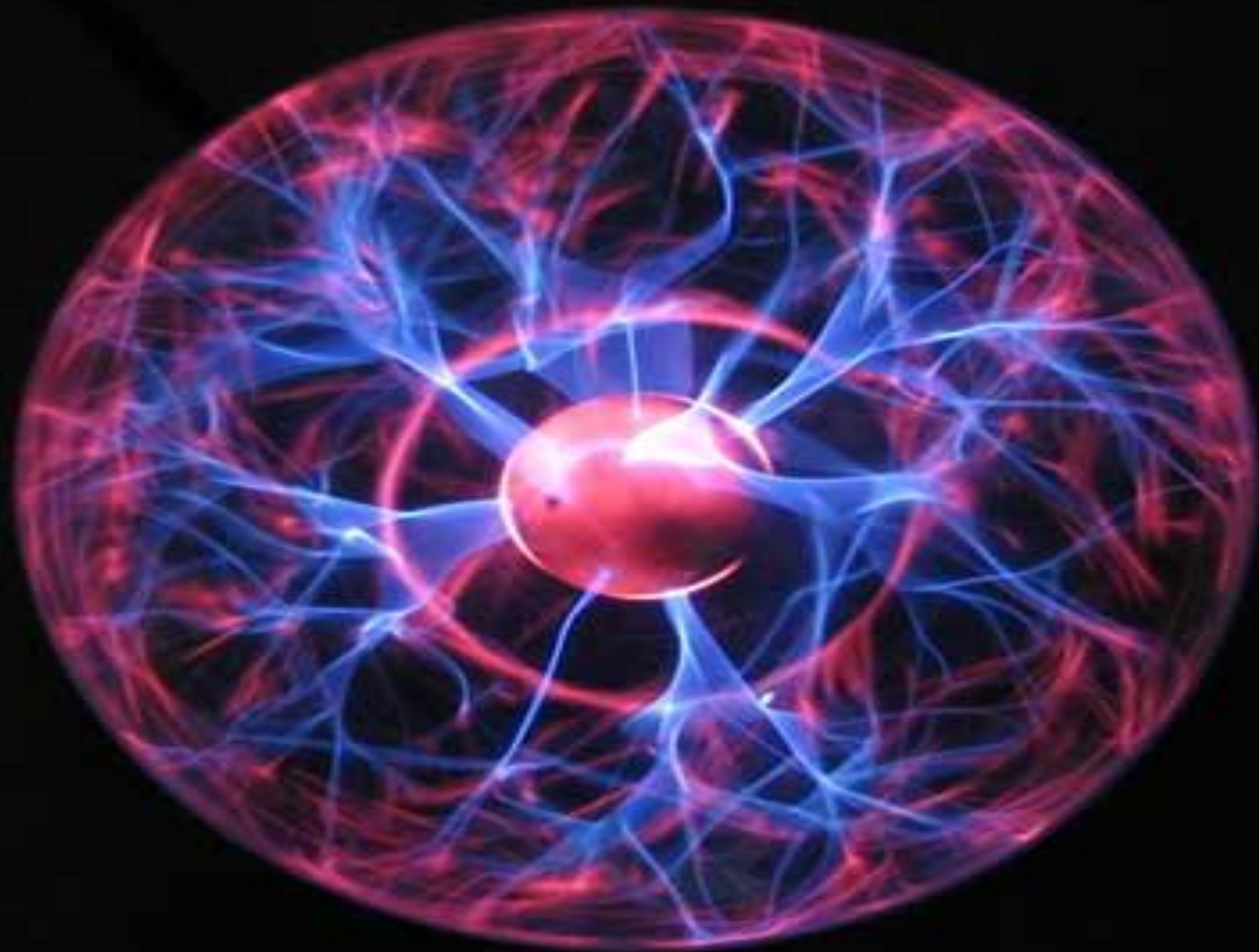
Атомы



Атомные ядра



Кварки и глюоны





ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!