

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИКЕ

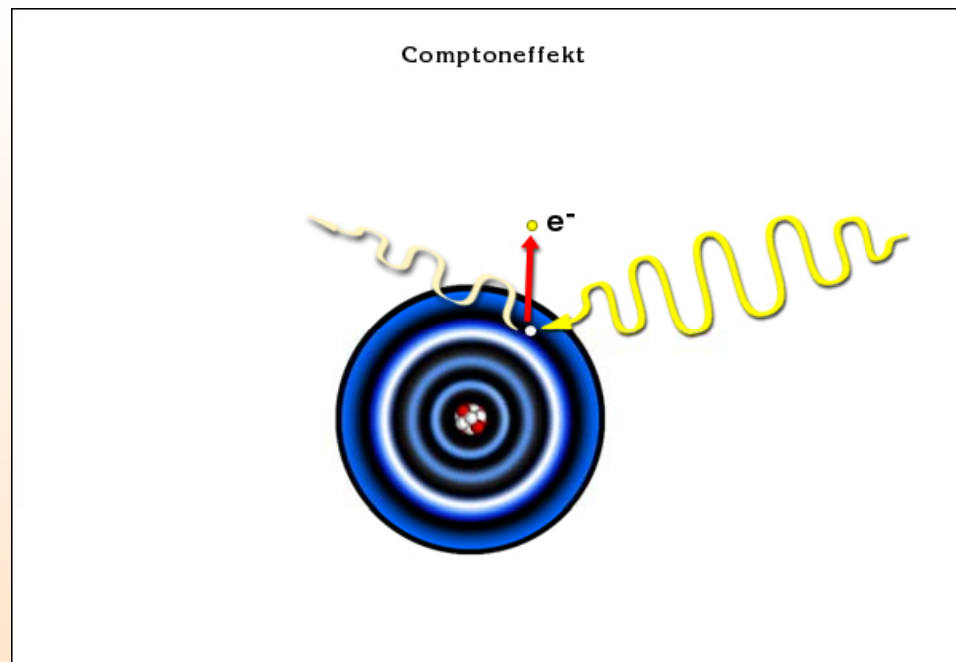
Эффект Комптона

Эффект Комптона

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона

А.Г. Комптон занимался изучением рассеяния рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил, что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

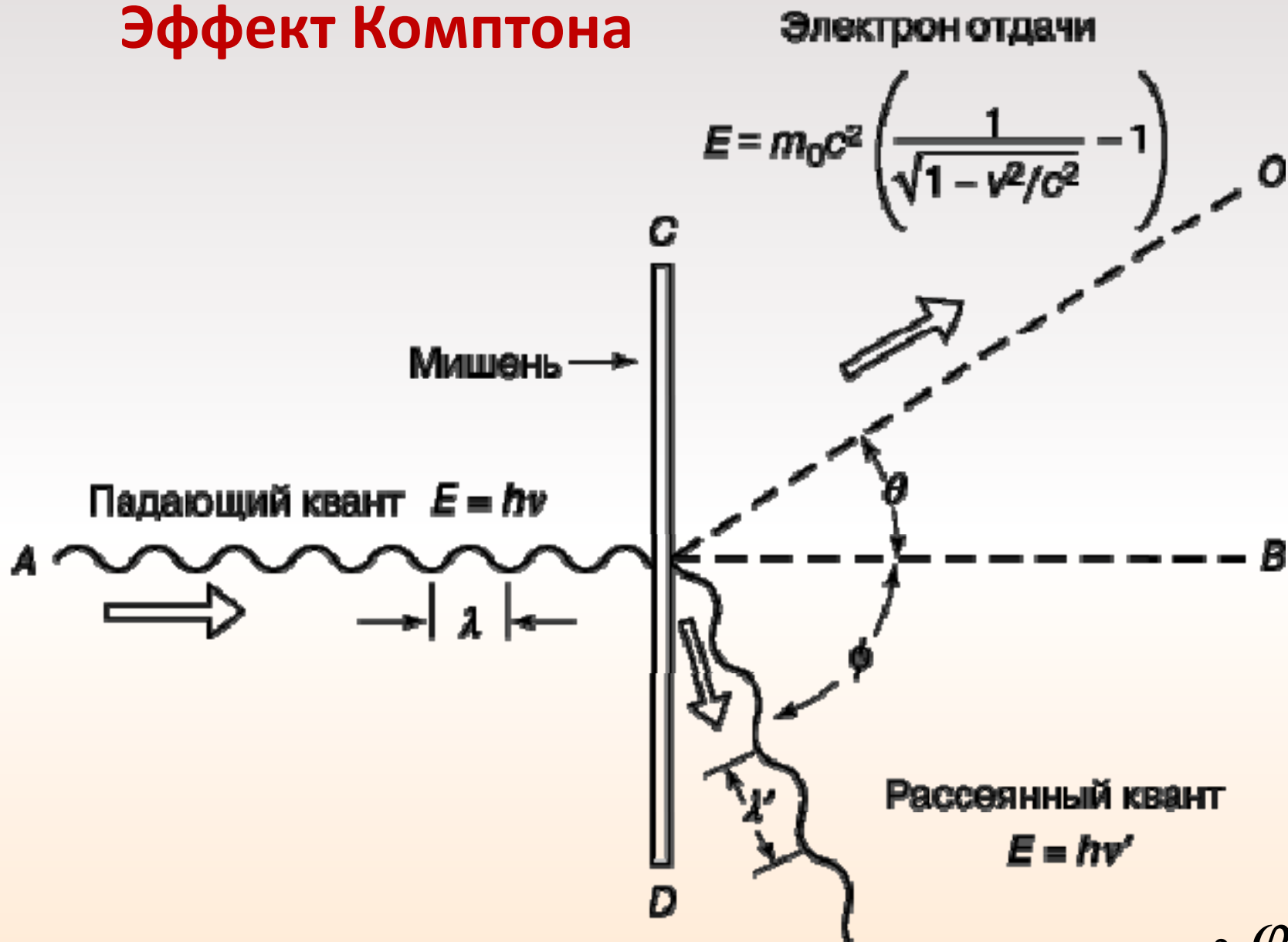
<http://www.youtube.com/watch?v=omu4maMbN90>



Эффект Комптона

Эффектом Комптона называется **упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны при рассеянии изменяться не должна: под действием периодического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.**

Эффект Комптона

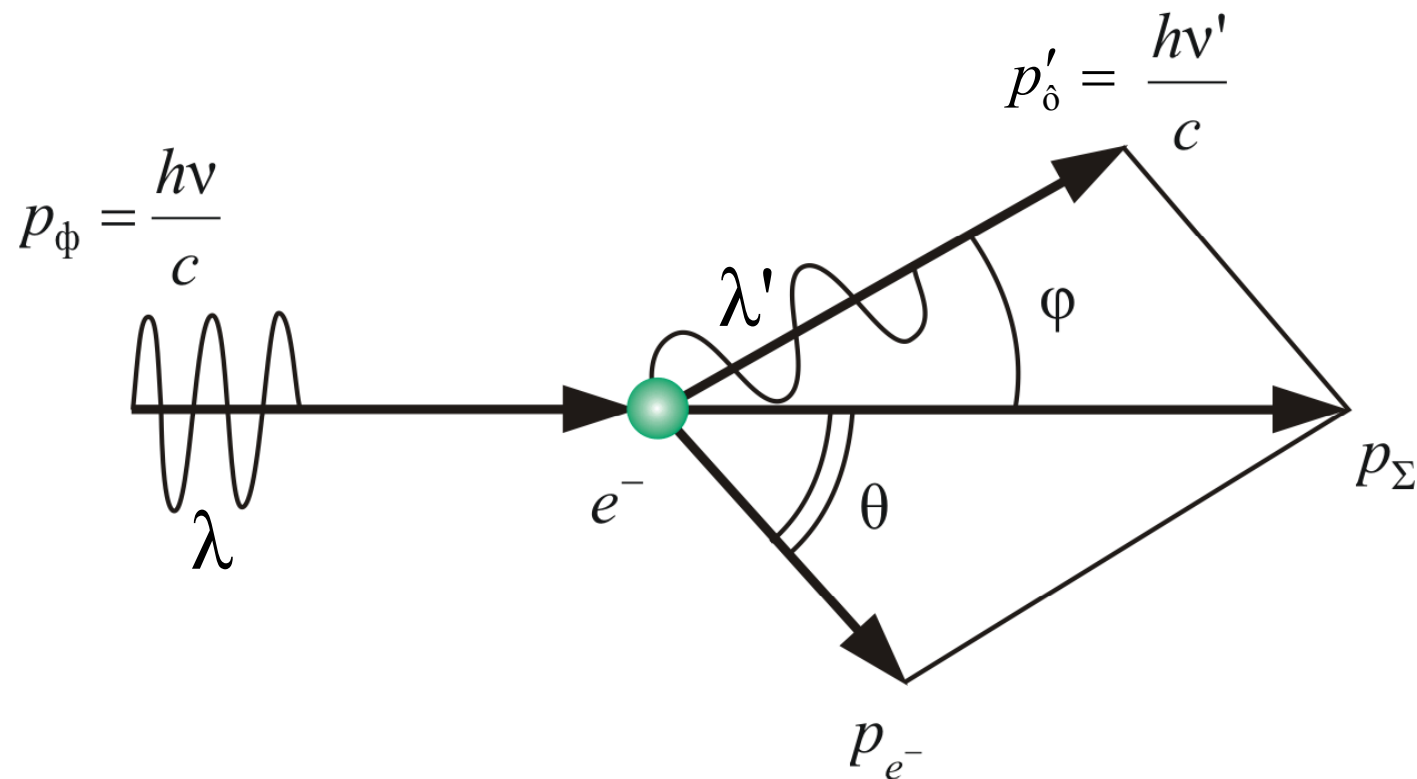


$$E = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

λ_C - Комптоновская длина волны

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

Объяснение явления становится возможным, если рассматривать **рассеяние как процесс упругого столкновения фотона со слабо связанными электронами атома:**



При рассеянии на покоящемся электроме фотон отдает ему часть энергии и импульса в соответствии с законами сохранения .

p_ϕ – импульс фотона до столкновения;

p_{e^-} – импульс электрона;

p_Σ – суммарный импульс фотона и электрона после столкновения;

θ – угол рассеяния.

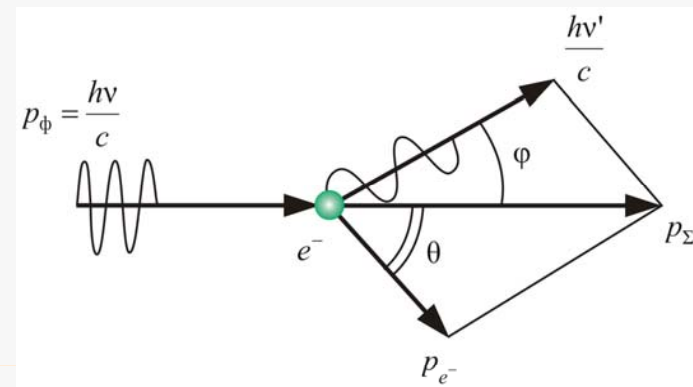
Эффект Комптона

Пусть фотон с импульсом \mathbf{p} и энергией pc сталкивается с неподвижным электроном.

Энергия покоя электрона m_0c^2 .

После соударения импульс фотона \mathbf{p}' и направлен под углом θ .

Импульс электрона отдачи \mathbf{p}'_e , а полная релятивистская энергия E'_e .



Эффект Комптона

1). Закон сохранения энергии

$$E'_e = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

$$pc + m_0 c^2 = p'c + E'_e$$



$$h\nu + m_0 c^2 = h\nu' + E'_e$$

2). Закон сохранения импульса

$$p = p' + p_e \quad \Rightarrow \quad p_e^2 = (p - p')^2$$



$$(m\nu)^2 = \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c} \right)^2 - 2 \frac{h^2}{c^2} \nu\nu' \cos \varphi$$

Эффект Комптона

$$(m\nu)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu'\cos\varphi$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c^2}}}$$

$$(h\nu + m_0c^2)^2 = (h\nu' + E_e')^2$$

⇓

$$m_0c^2(\nu - \nu') = h\nu\nu'(1 - \cos\varphi)$$

⇓

$$\nu = c/\lambda,$$

$$\nu' = c/\lambda', \Rightarrow$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\varphi) = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

Эффект Комптона

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

\Rightarrow

$$\lambda_C = \frac{h}{m_0c}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

Комптовская длина
волны

$$\lambda_C = 2.426 \text{ нм}$$

Двойственная природа света

Двойственная природа света

Основной постулат корпускулярной теории электромагнитного излучения:

Электромагнитное излучение (и в частности, свет) – **это поток частиц, называемых фотонами.**

Фотоны распространяются в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Масса и энергия покоя фотона равны **нулю.**
Энергия фотона E связана с частотой электромагнитного излучения ν и длиной волны λ формулой:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Двойственная природа света

Излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона — корпускулярные свойства света

Интерференция, дифракция, поляризация - волновые свойства света

Давление и преломление света объясняются как волновой, так и квантовой теориями.

Двойственная природа света

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Эта формула **связывает** **корпускулярную** характеристику электромагнитного излучения – **энергию фотона** с **волновыми** характеристиками – **частотой и длиной волны**.

Она представляет собой **мостик** между корпускулярной и волновой теориями. Существование этого мостика неизбежно, т. к. и фотон, и электромагнитная волна, это **две модели одного и того же реально существующего объекта – электромагнитного излучения**.

Свет – диалектическое единство противоположных свойств: он одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.

При уменьшении длины волны все явственнее проявляются корпускулярные свойства.

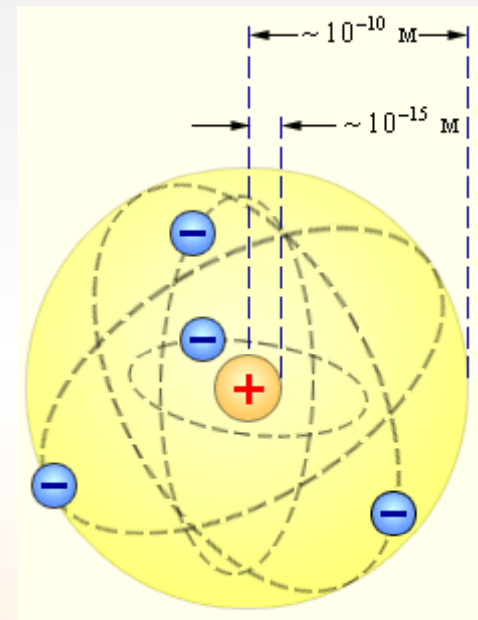
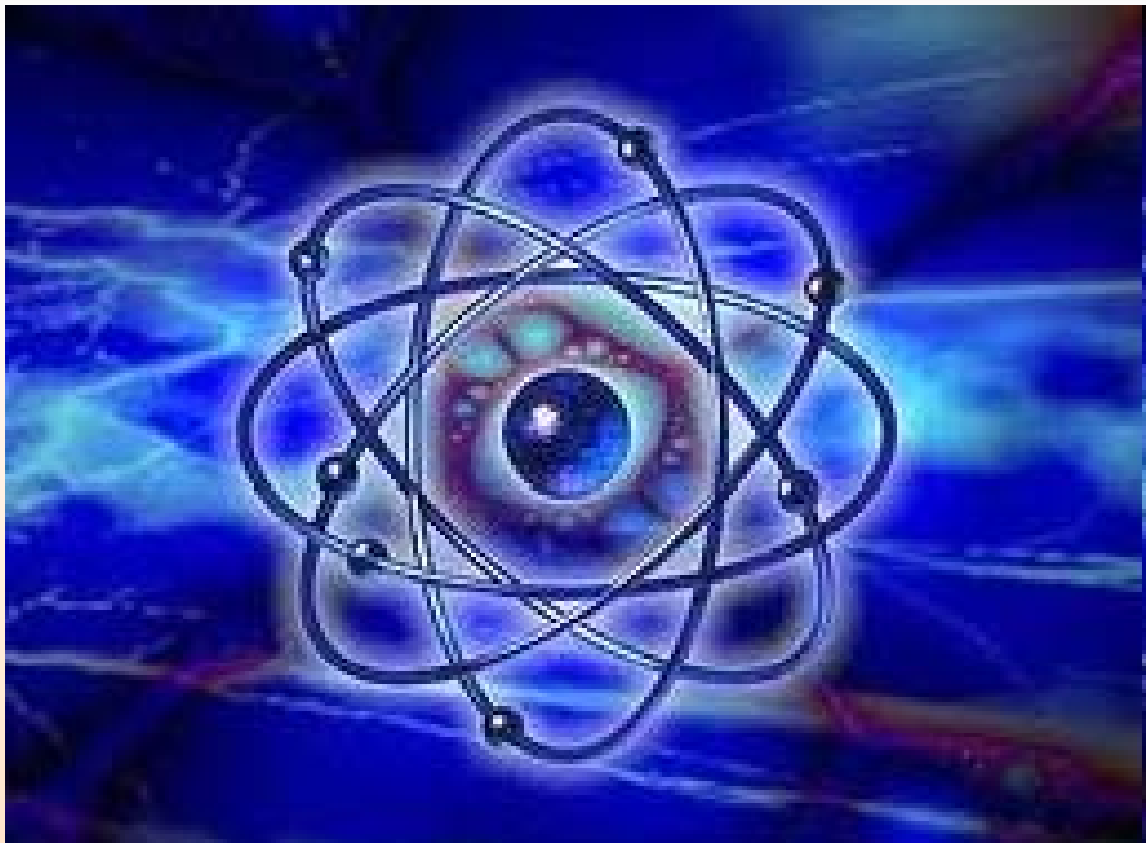
Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются слабо (например, рентгеновское излучение).

Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения квантовые свойства проявляются слабо.

<http://www.youtube.com/watch?v=LIPCKcBnVT0&list=PLmrwCwqILLo8ZuCxiDOOTYQTGnWE0JZmi>

<http://www.youtube.com/watch?v=QGq2YNyVbGs>

АТОМЫ

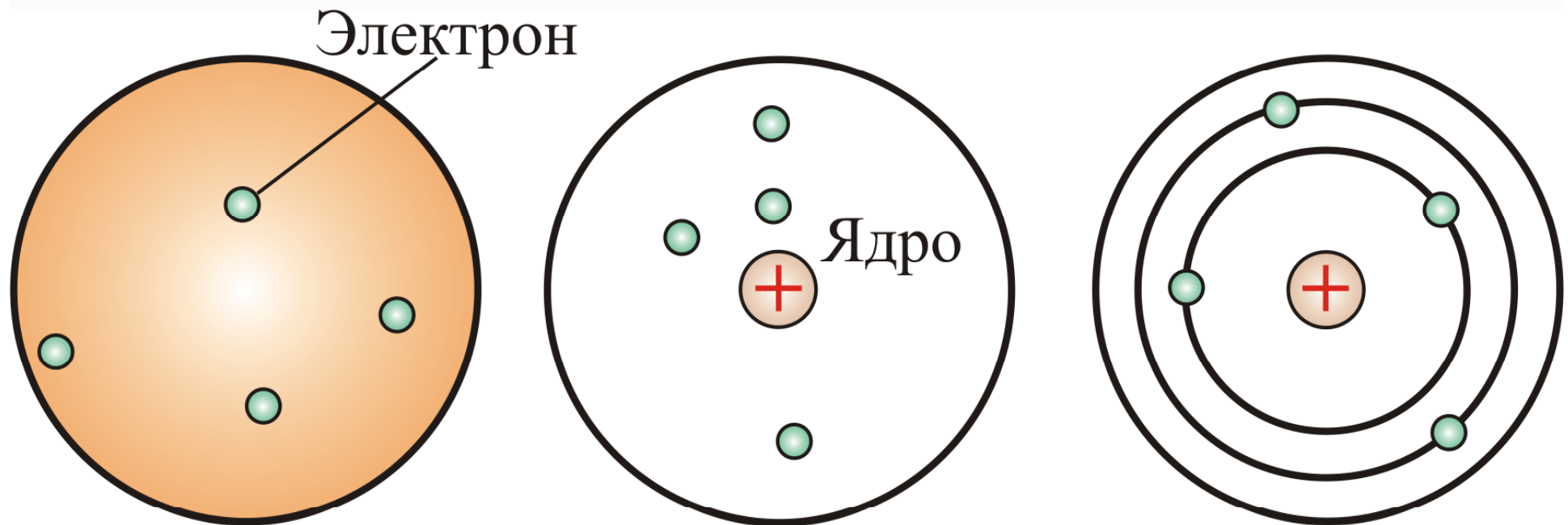


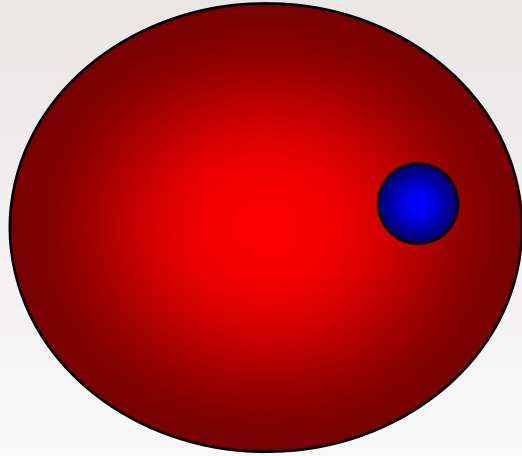
АТОМЫ

- 1. Представление древних греков:** неделимые мельчайшие частицы вещества
- 2. XVIII в.:** А. Лавуазье, М. В. Ломоносов, Д. Дальтон доказали доказана реальность существования атомов.
- 3. Д. И. Менделеев:** единая природа атомов
- 4. Вторая половина XIX в.:** экспериментально доказано, что электрон является одной из основных составных частей любого вещества.

Вопрос: каково же строение атомов?

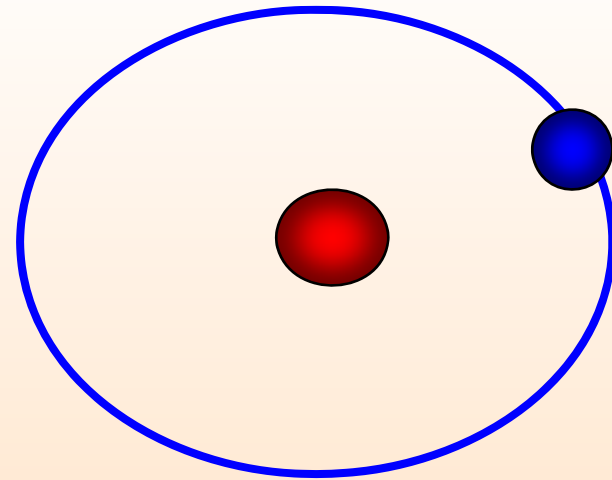
Предлагаемые модели атомов



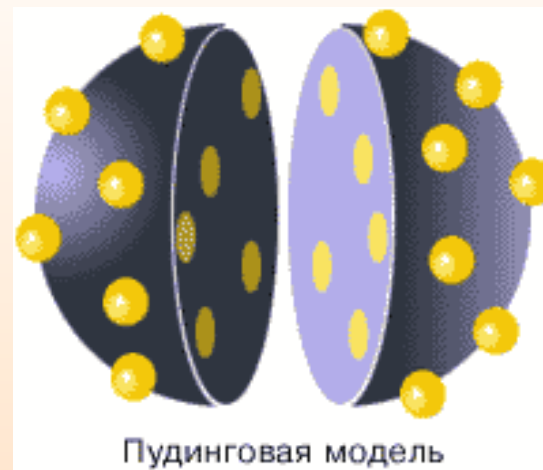
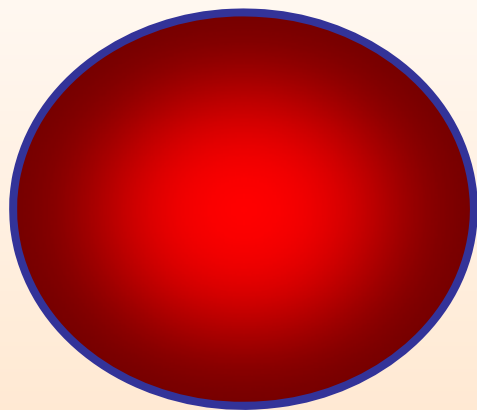


Какая

из моделей
верна?



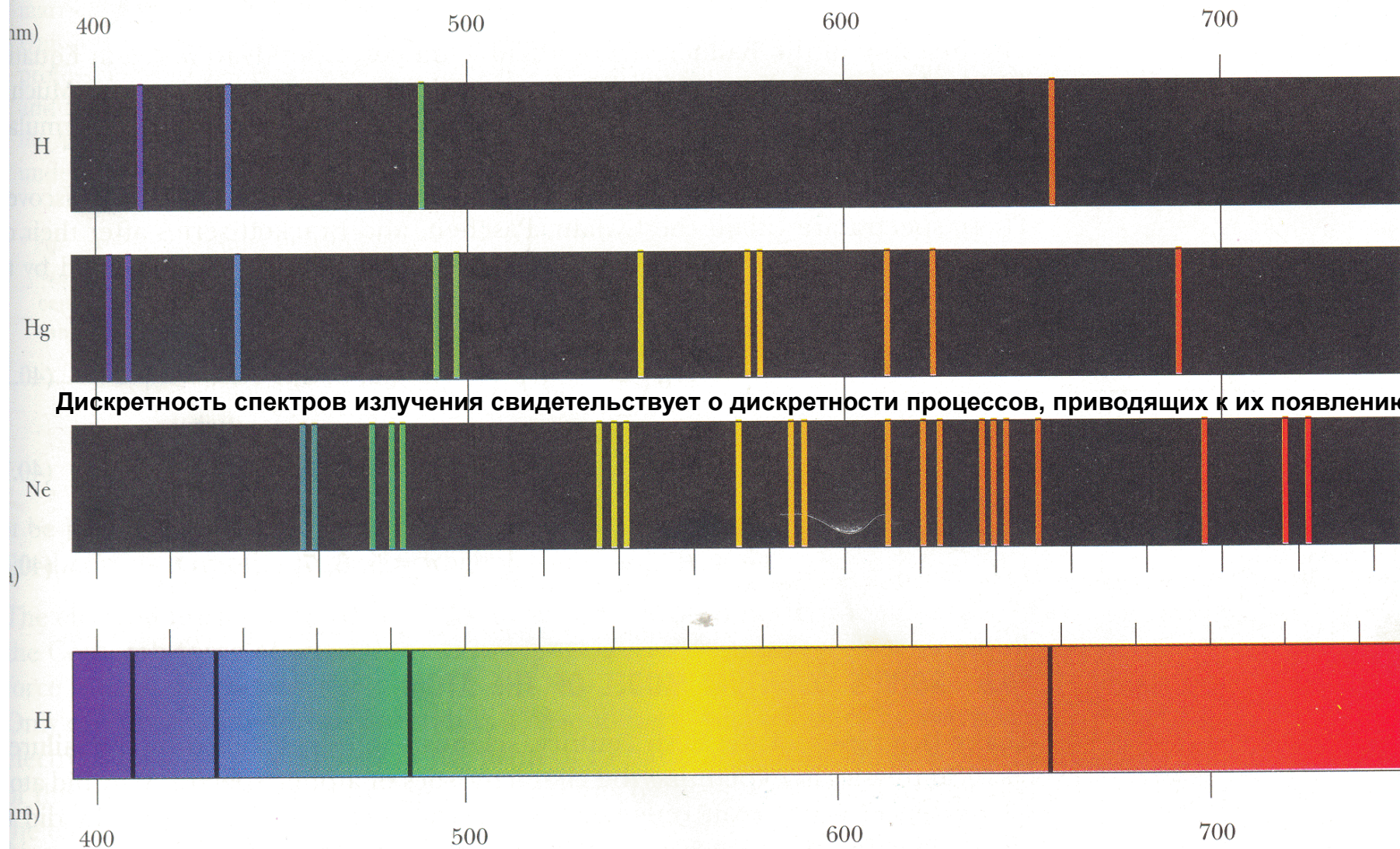
^x В 1903 году Дж. Дж. Томсон, предложил модель атома: сфера, равномерно заполненная положительным электричеством, внутри которой находятся электроны. Суммарный заряд сферы равен заряду электронов. Атом в целом нейтрален. **Следствие теории - спектр должен быть сложным, но никоим образом не линейчатым,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



Пудинговая модель

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

Было замечено, что линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями. Расстояния между линиями в сериях закономерно уменьшаются по мере перехода от длинных волн к коротким.



Дискретность 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,
 $n = 3, 4, 5, \dots$

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

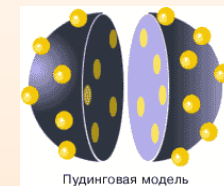
Серия Лаймона	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Серия Пашена	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Серия Брэкета	$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Серия Пфунда	$\nu = R \left(\frac{1}{5^2}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

Обобщенная *формула 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 $k = 1, 2, 3, \dots,$

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



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

**Исследования посвящены атомной и
ядерной физике, радиоактивности.**

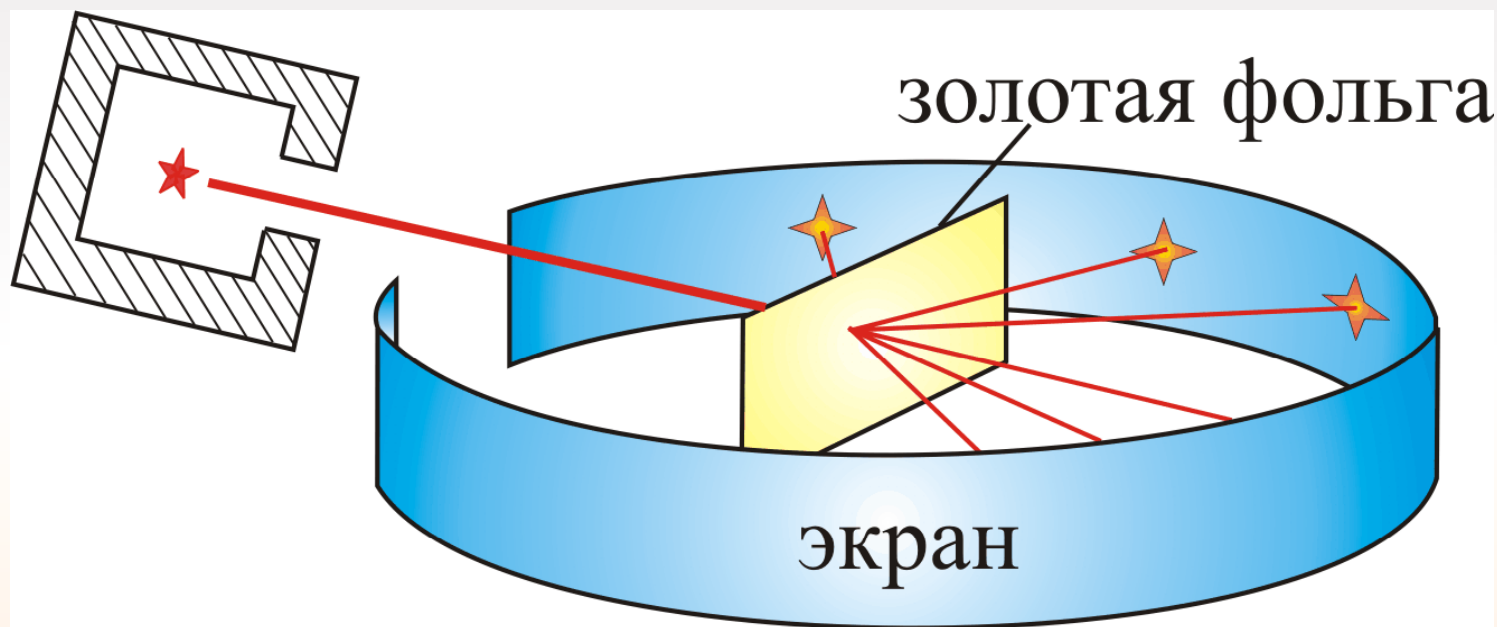
**фундаментальными открытиями в этих
областях заложил основы современного
учения о радиоактивности и теории строения атома. В 1899
г. открыл альфа - и бета-лучи. Вместе с Ф. Содди в 1903 г.
разработал теорию радиоактивного распада и установил
закон радиоактивных превращений. В 1903 году доказал,
что альфа-лучи состоят из положительно заряженных
частиц. Предсказал существование трансурановых
элементов.**

В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

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

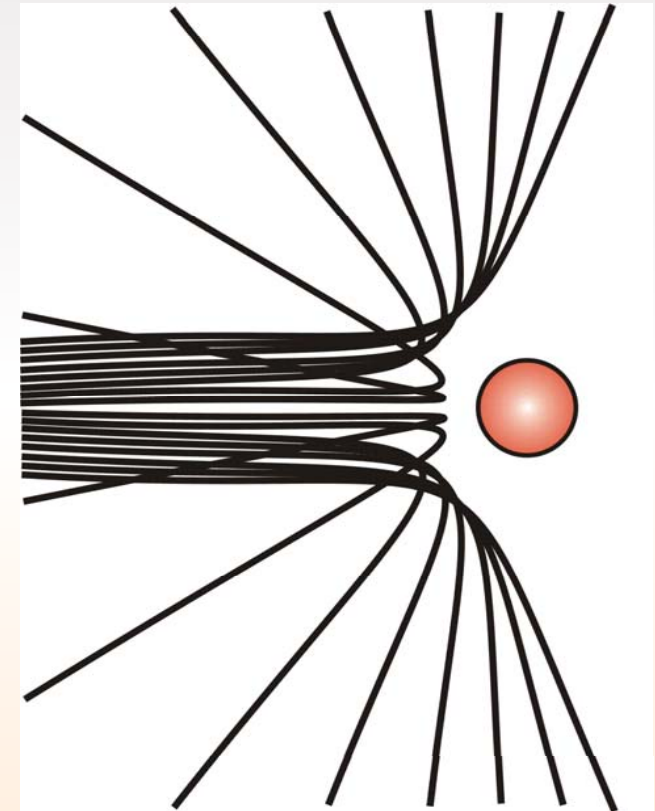
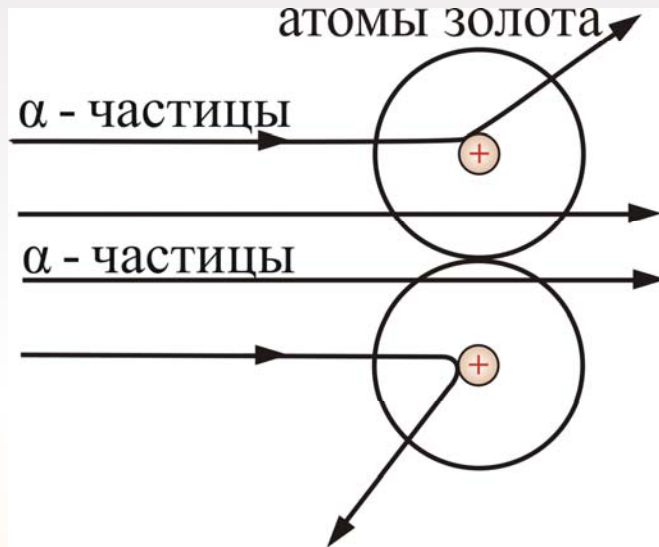
α – частица имеет положительный заряд равный $+2e$.



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

Количество вспышек в темноте фиксировалось через микроскоп

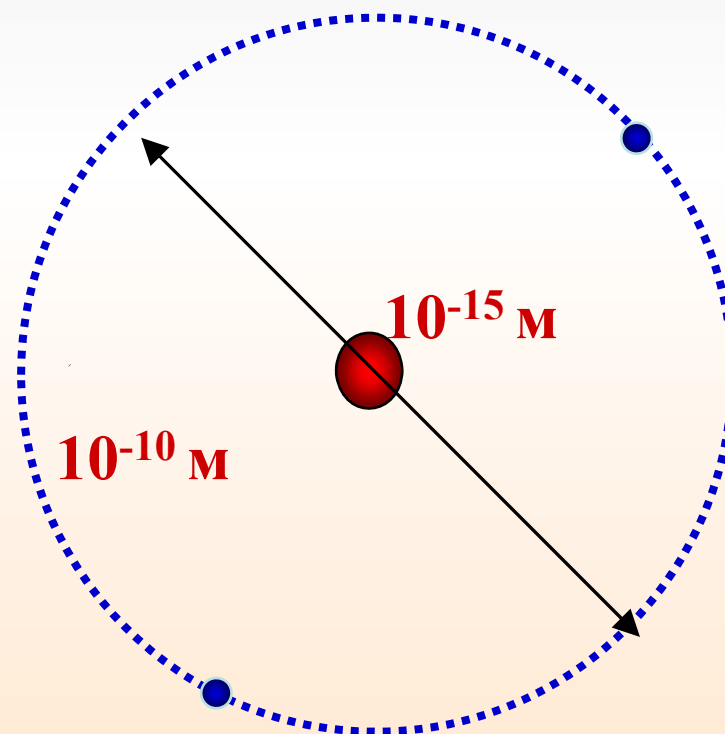
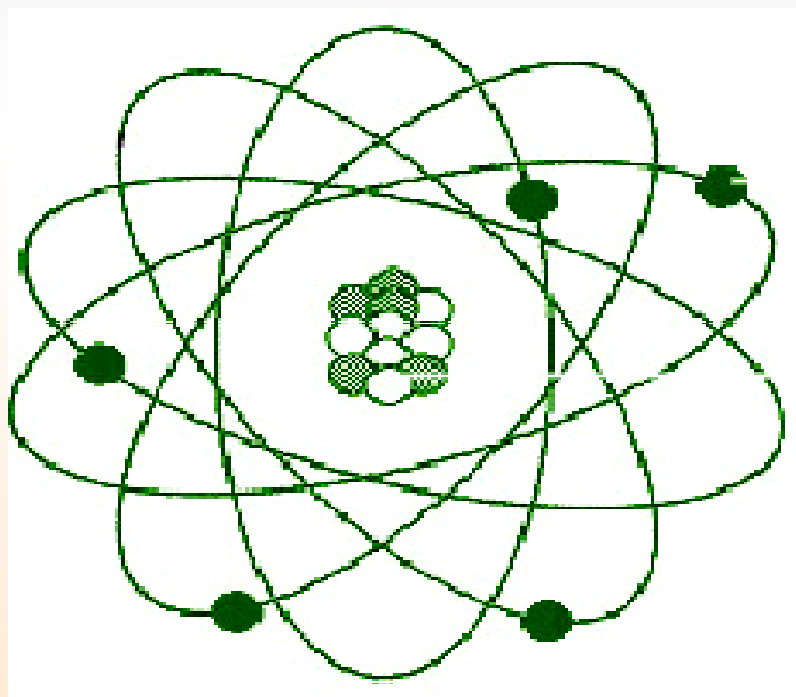
Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3° **Отдельные** α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)



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;

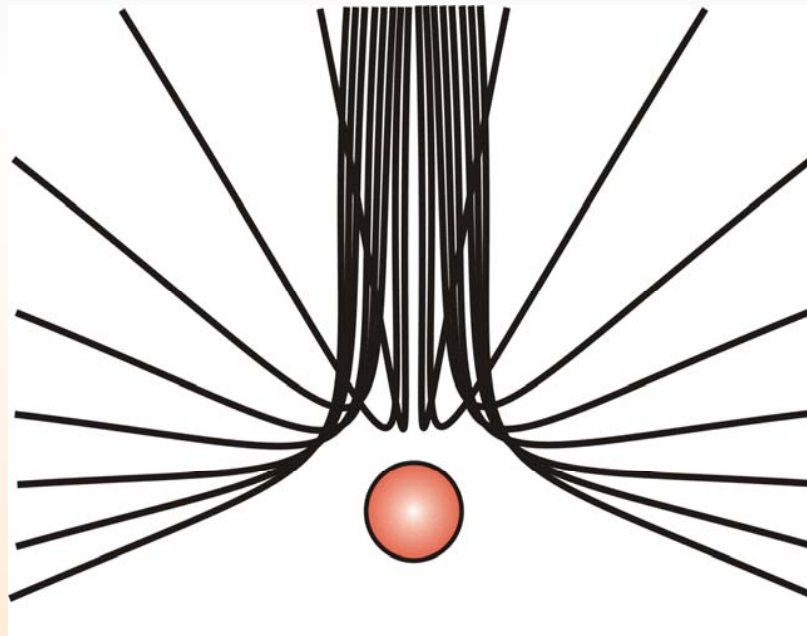
Ze – заряд ядра;

b – *прицельный параметр*.

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

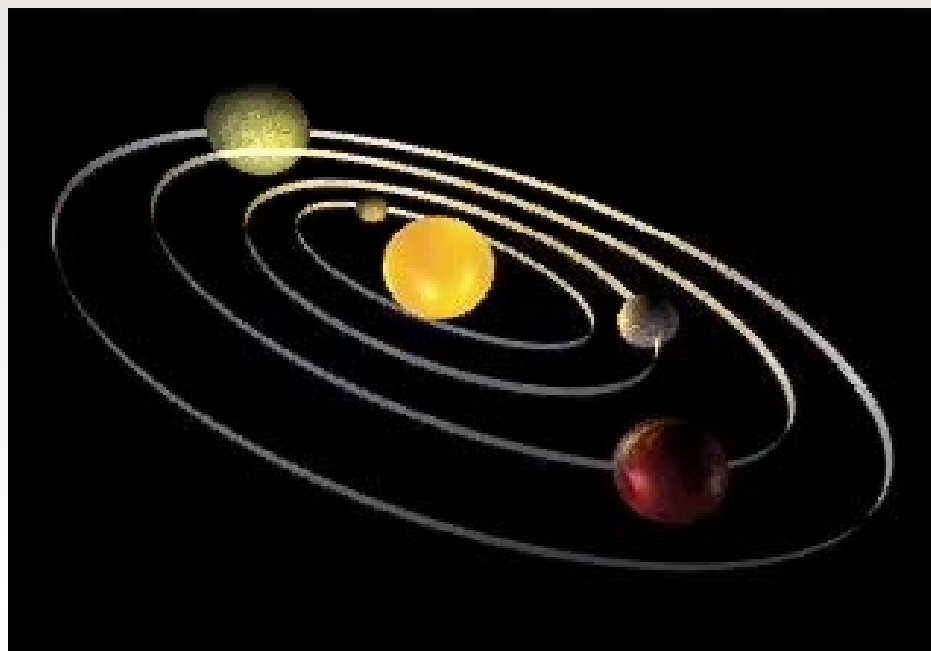
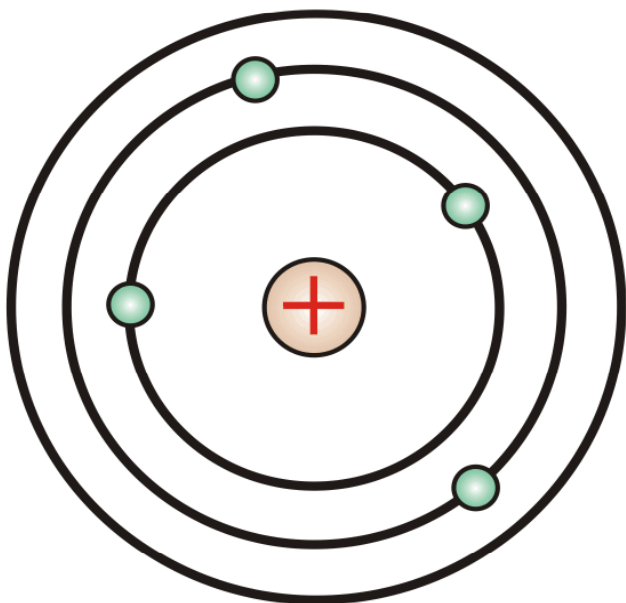
$$d\sigma = \left(\frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}$$

- формула Резерфорда



Частицы с разными прицельными параметрами отклоняются на разные углы.

Планетарная модель атома Резерфорда



Однако, **планетарная модель**

1). не смогла объяснить особенностей излучения атомов и

2). была в явном противоречии с классической электродинамикой

1 . Предположим, что электрон движется вокруг ядра по круговой орбите радиуса r . При этом кулоновская сила взаимодействия между ядром электроном сообщает электрону центростремительное ускорение. Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по окружности под действием кулоновской силы, имеет вид

$$\frac{(Ze)e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \quad \Rightarrow \quad v = f(r)$$

Скорость может меняться непрерывно \rightarrow непрерывной может быть и частота излучения

2. Электрон, двигаясь по окружности, т.е. с нормальным ускорением, должен излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и упасть на ядро.

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

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.

Первый постулат Бора.

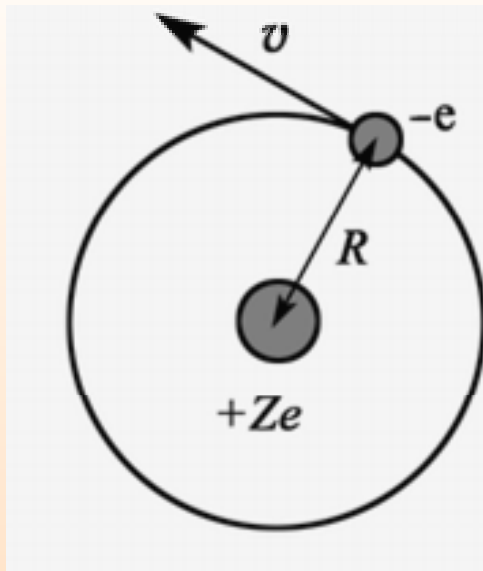
В атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) энергетические состояния. Пребывая в одном из стационарных состояний, атом не излучает энергию.

Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн.

Первый постулат Бора.

Условие для стационарных орбит:

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



$$m_e v r = n \hbar$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ -
КВАНТОВОЕ ЧИСЛО.

Второй постулат Бора.

При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией

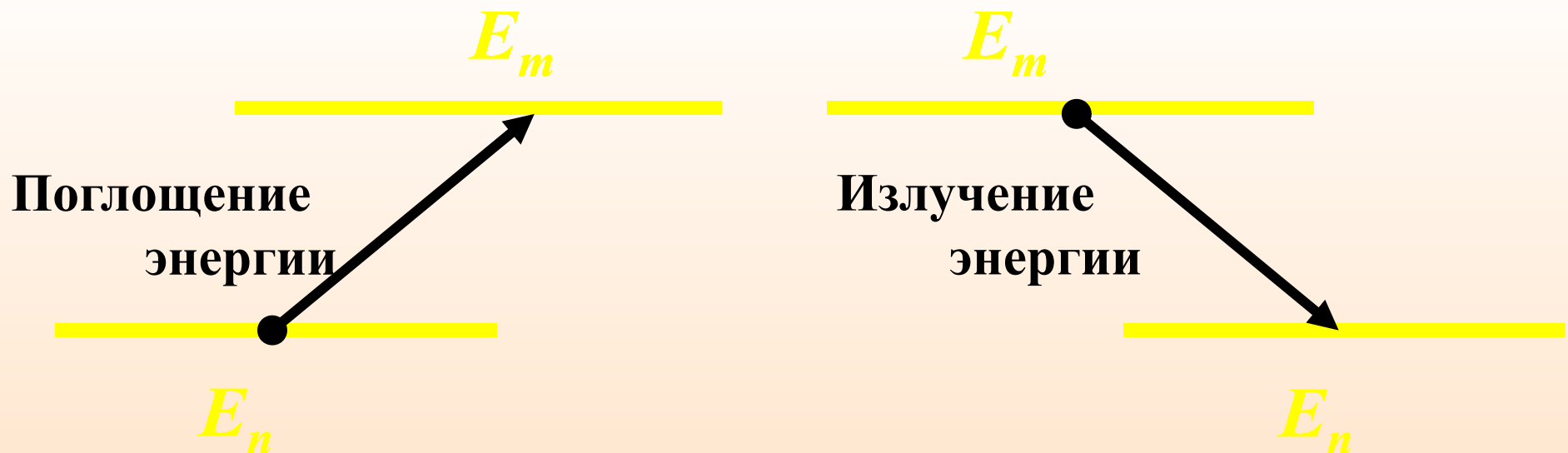
$$h\nu = E_n - E_m$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний.

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

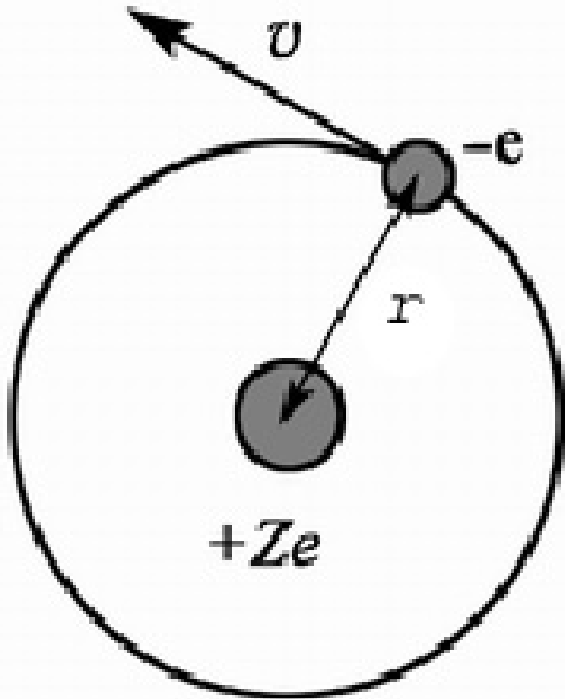
$$h\nu = E_m - E_n \text{ - правило частот Бора}$$

m, n – номера состояний.



Следствия:

Уравнение движения электрона :



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

Кулоновское взаимодействие
центробежное ускорение

$$m_e v r = n \hbar$$

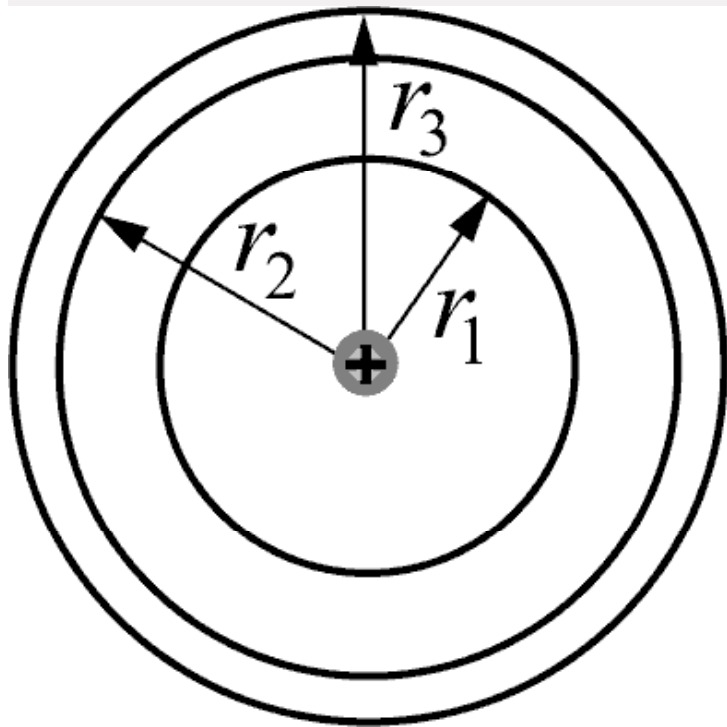
первый постулат Бора

Отсюда найдем **радиусы стационарных орбит:**

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

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

При $n = 1$, $Z = 1$ для водорода:



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

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

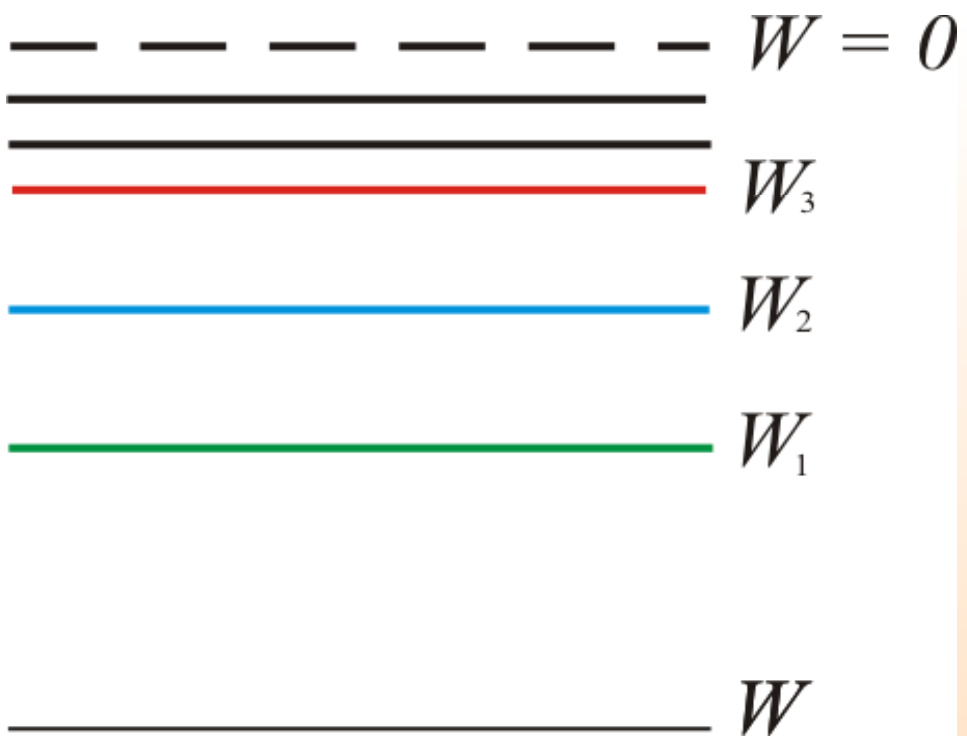
$$W = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\frac{(Ze)e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

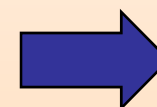
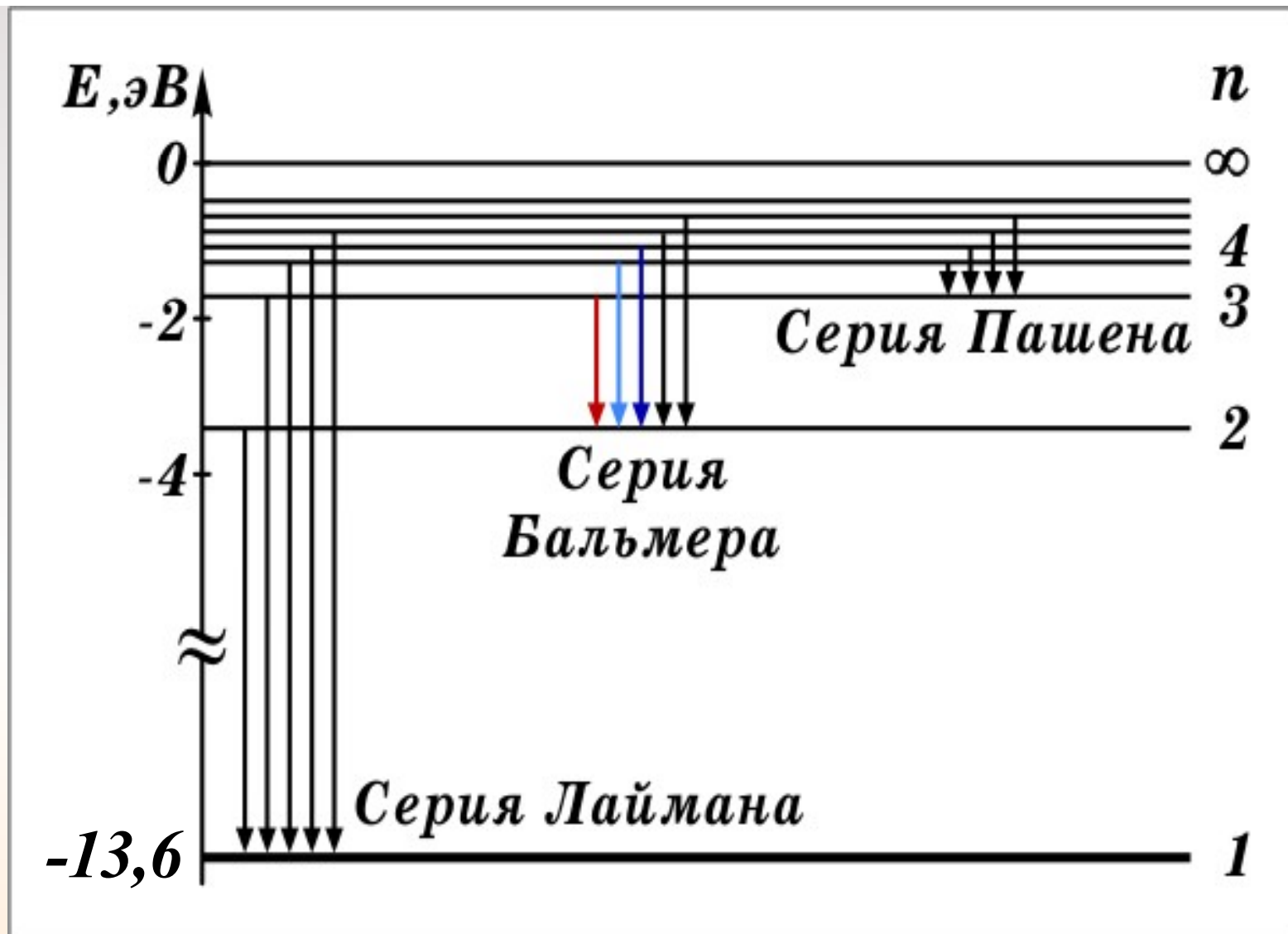
Отсюда

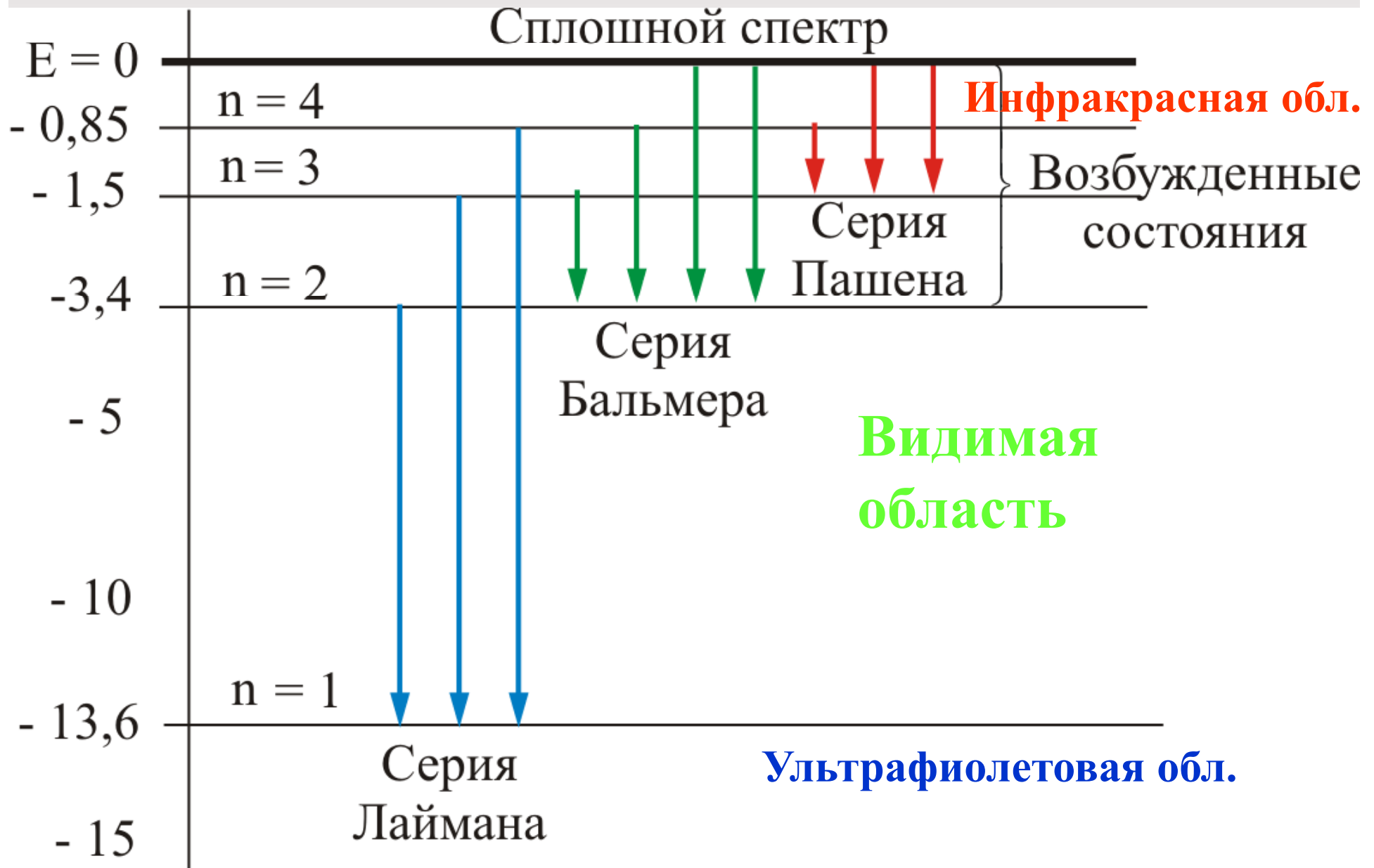
$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2 4\pi\epsilon_0}{m_e Ze^2}$$

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



Отсюда видно, что:
энергия электрона может принимать только дискретные значения,
т.к. $n = 1, 2, 3, \dots$





^x 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,

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

Это не что иное как обобщенная формула Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом, где постоянная Ридберга

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

$$R = \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} \quad R = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

*Серьезным успехом теории Бора
явилось:*

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

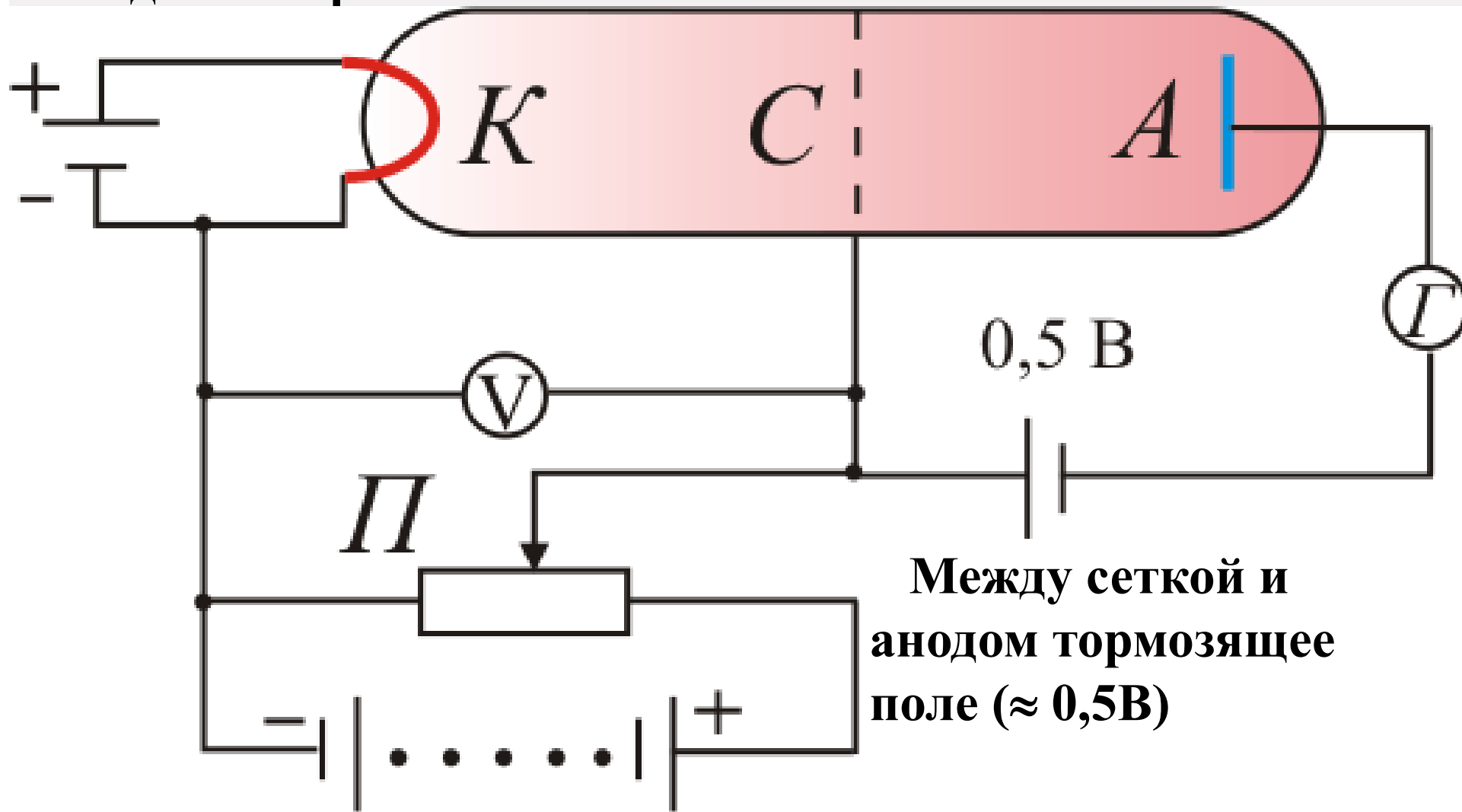
Опыт Франка и Герца.

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

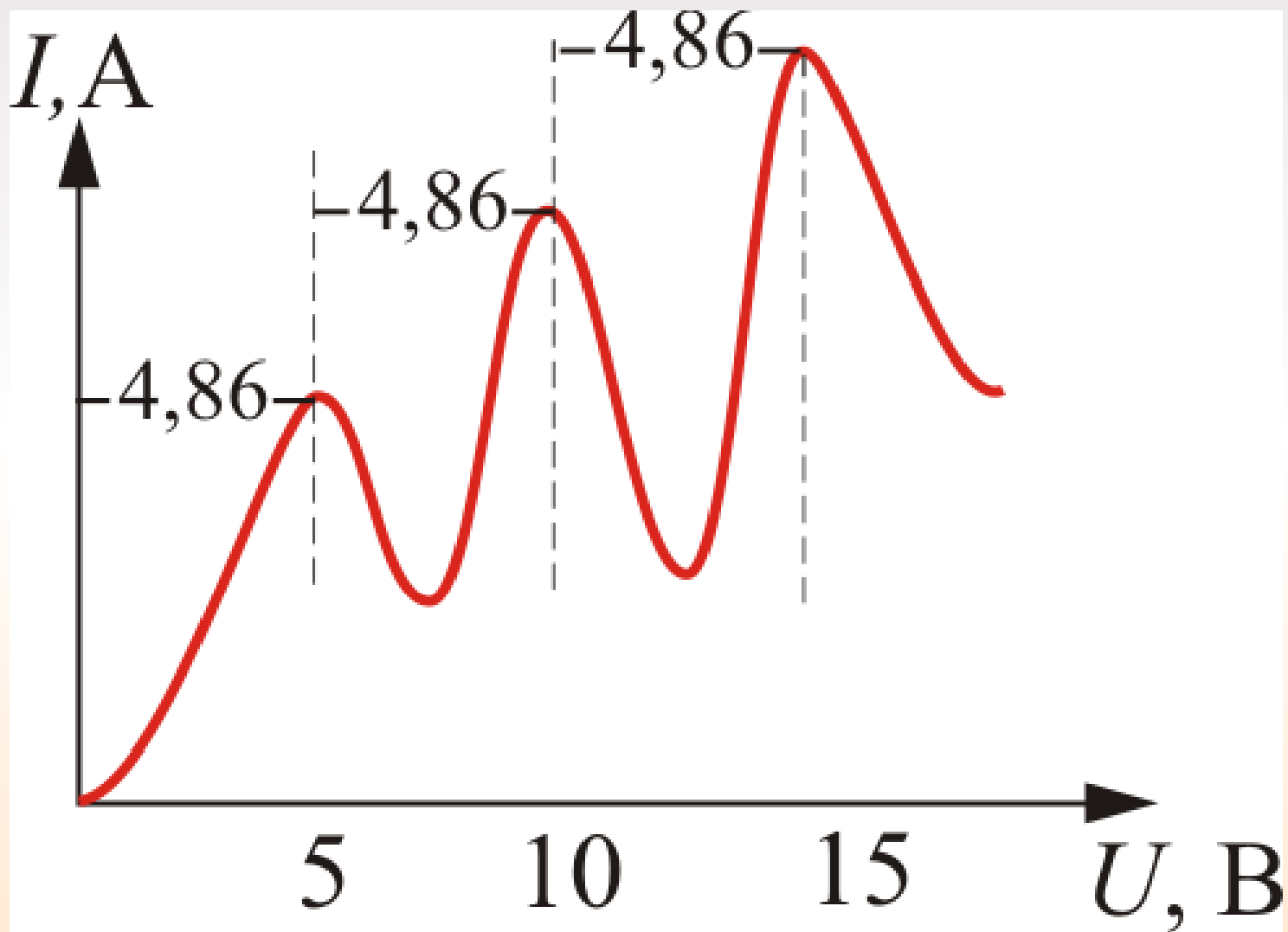
Немецкие ученые Джеймс Франк и Густав Герц, за экспериментальные исследования дискретности энергетических уровней получили Нобелевскую премию в 1925 г.

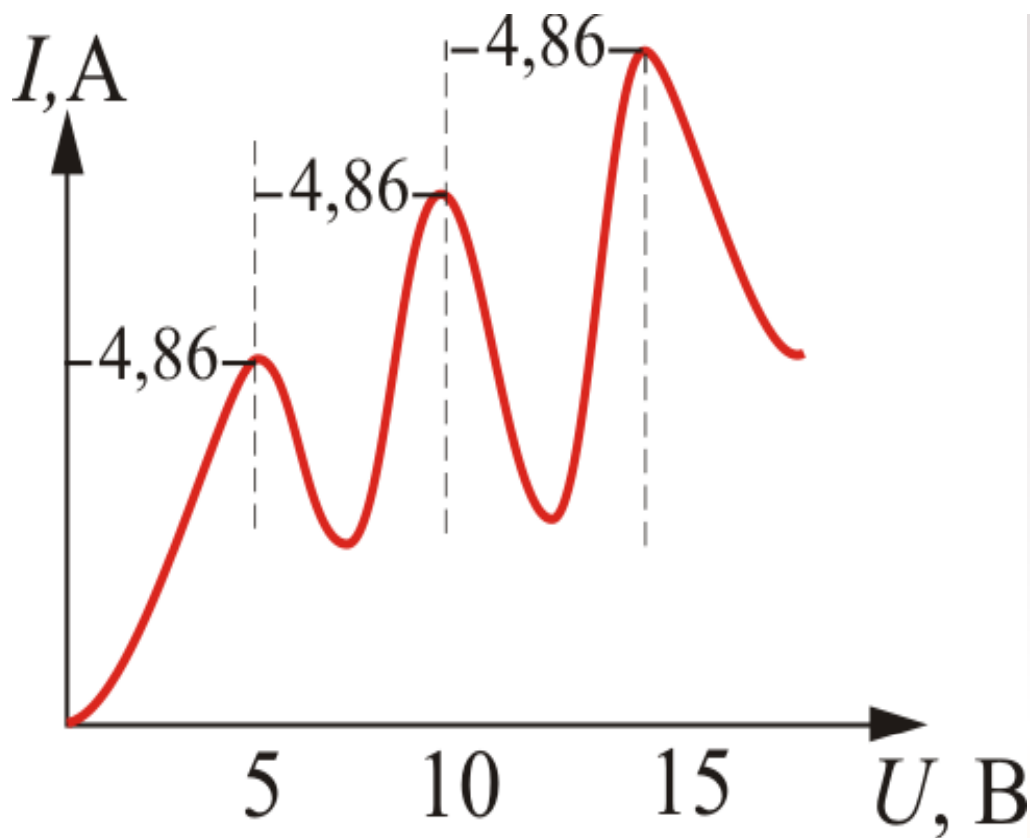
x

В трубке, заполненной **парами ртути** при давлении $p \approx 1$ мм рт. ст., четыре электрода: катод – 2 сетки – анод. Электроны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и первой сеткой.



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





- 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:

$\lambda = hc / \Delta E \approx 255$ нм -что соответствует ультрафиолетовому излучению.

Опыт действительно обнаруживает **ультрафиолетовую линию** с $\lambda \approx 255$ 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.

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

- Самый большой – **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. *Такая теория - квантовая механика.*

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

