

Сегодня: *



Курс лекций по физике

Степанова Екатерина Николаевна
доцент кафедры
ОФ ФТИ ТПУ

Сегодня: *

Тема 7. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора.

77.1. Закономерности в атомных спектрах

77.2. Ядерная модель атомов

7.3. Элементарная теория Бора

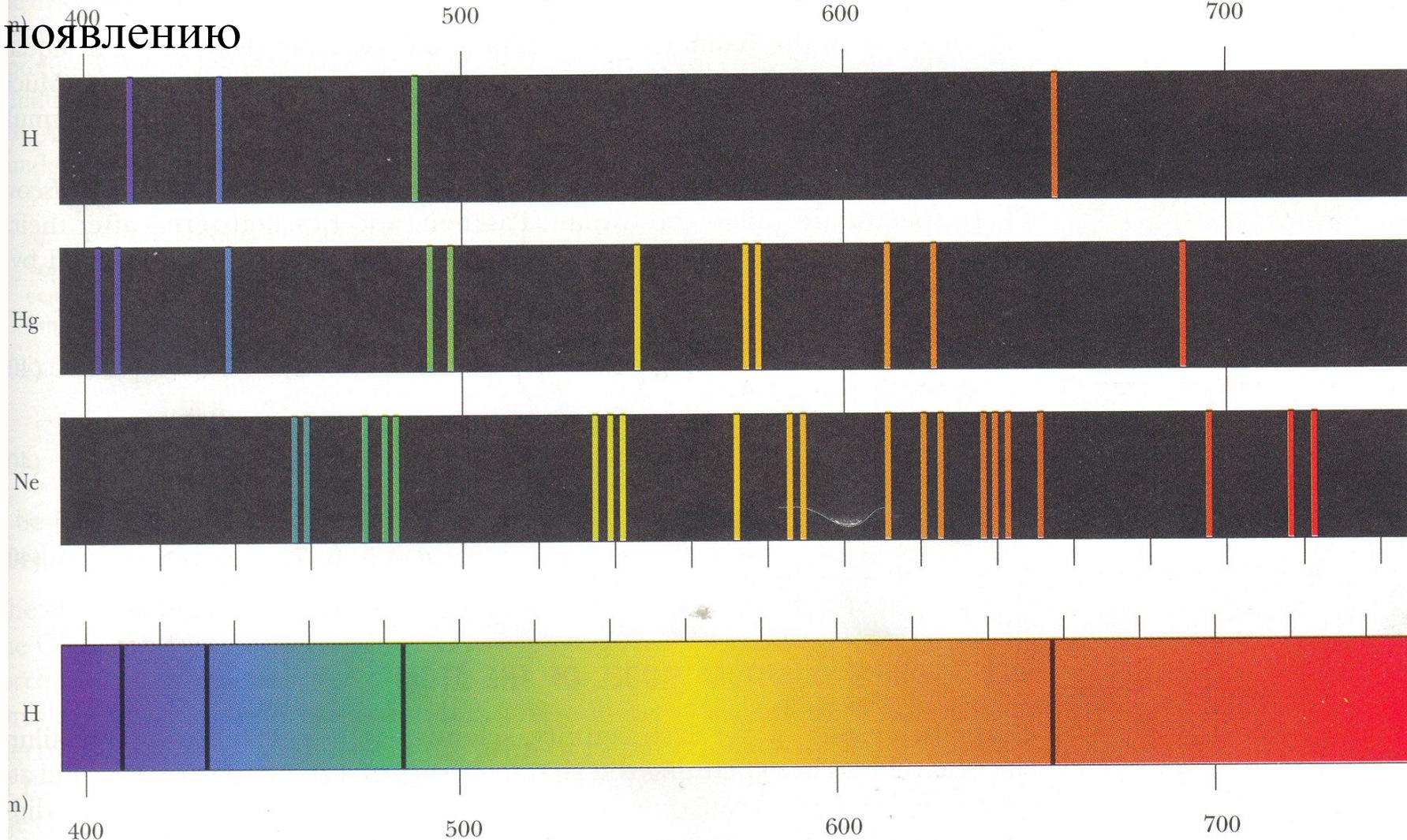
7.4. Опыт Франка и Герца

7.1. Закономерности в атомных спектрах

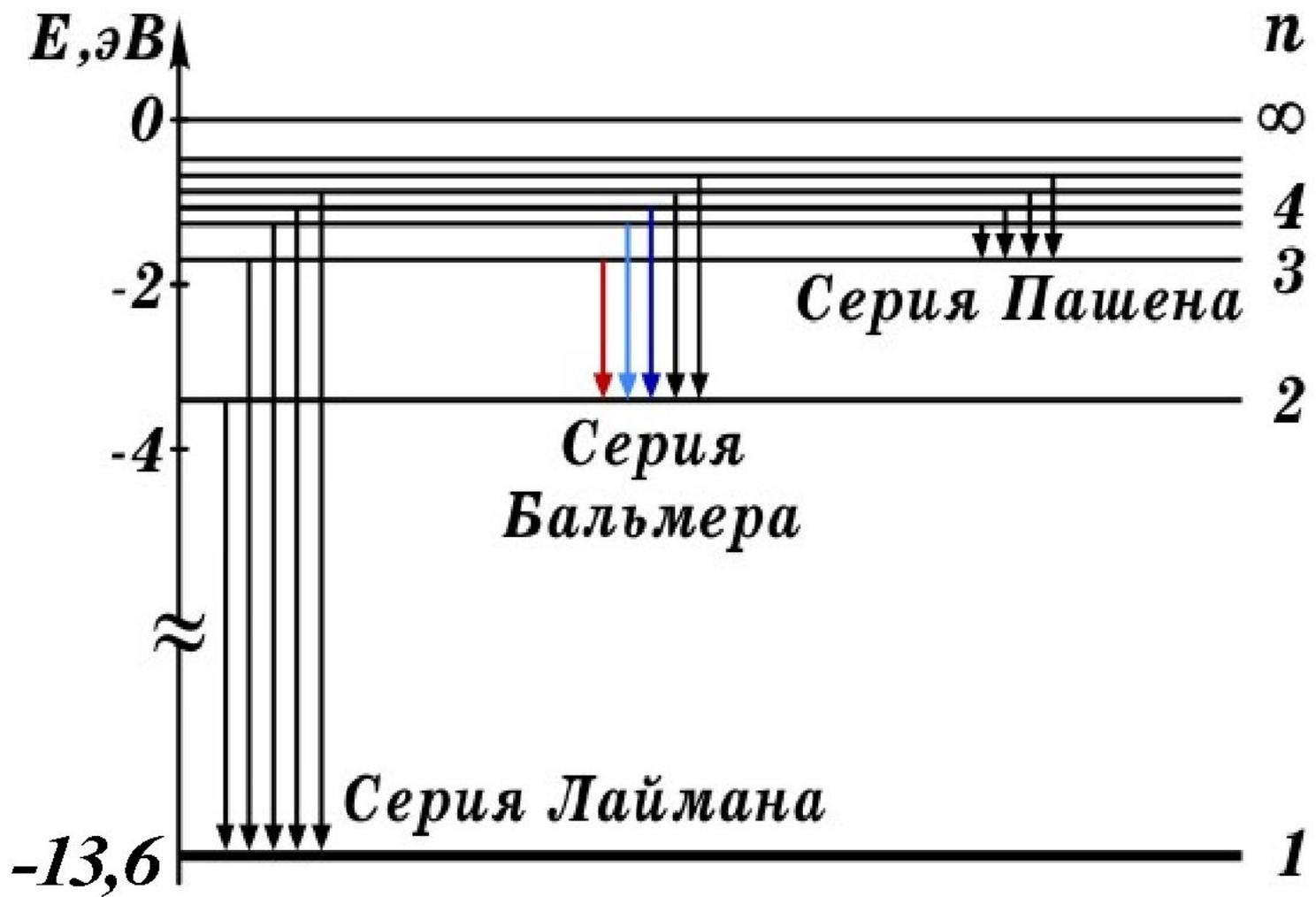
Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных спектральных линий (линейчатый спектр). Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов.

- линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями.
- расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.

Дискретность, квантованность спектров излучения свидетельствует о дискретности процессов, приводящих к их появлению



Линейчатые спектры излучения в видимой области: водород, ртуть, неон. Спектр поглощения водорода



H

Швейцарский физик Й.Бальмер в 1885 году установил, что длины волн серии в видимой части спектра водорода могут быть представлены формулой (*формула Бальмера*):

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \text{ где } \lambda_0 = \text{const}, n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{или} \quad \nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R' = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

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 Лаймана	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
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*

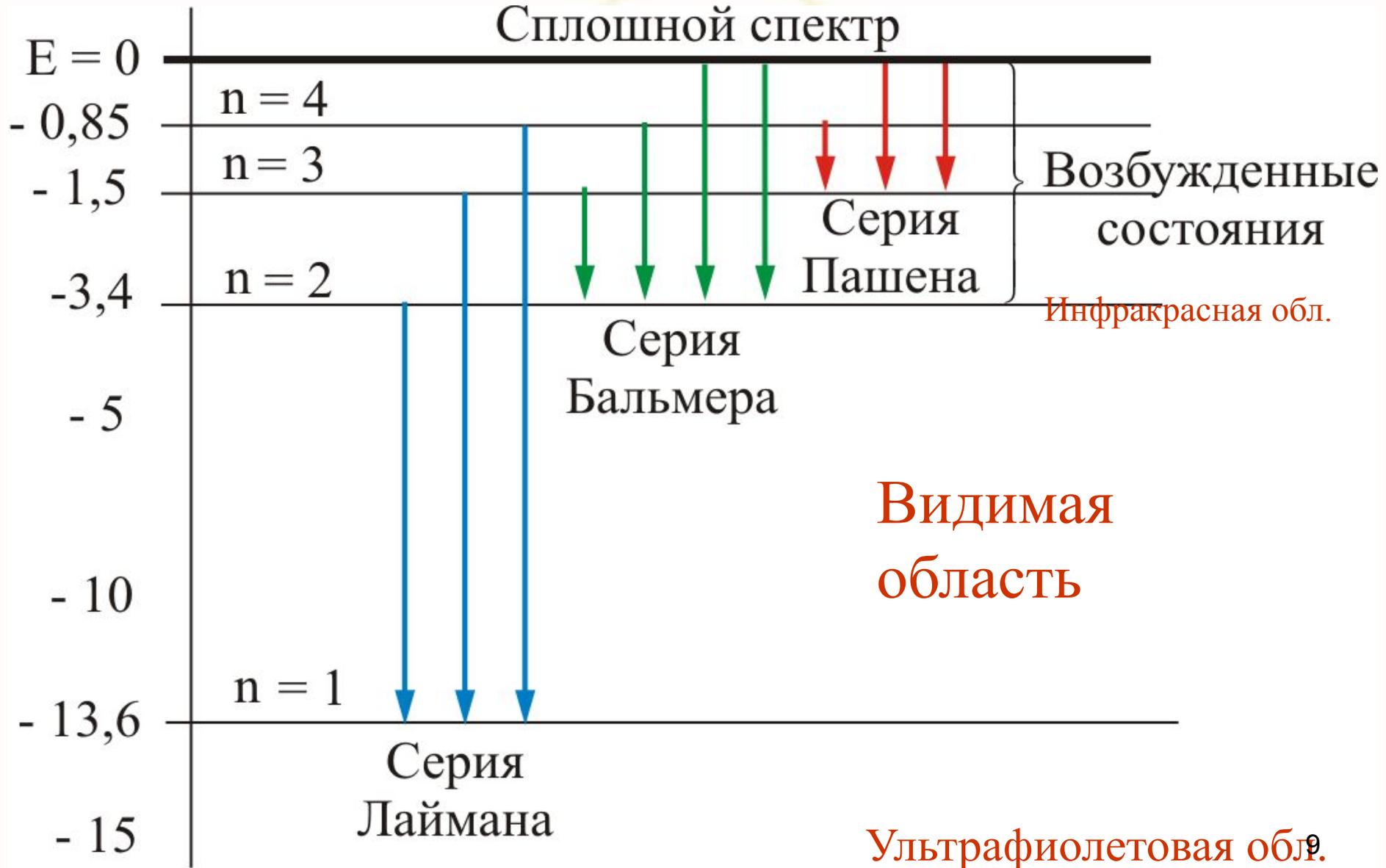
$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

или

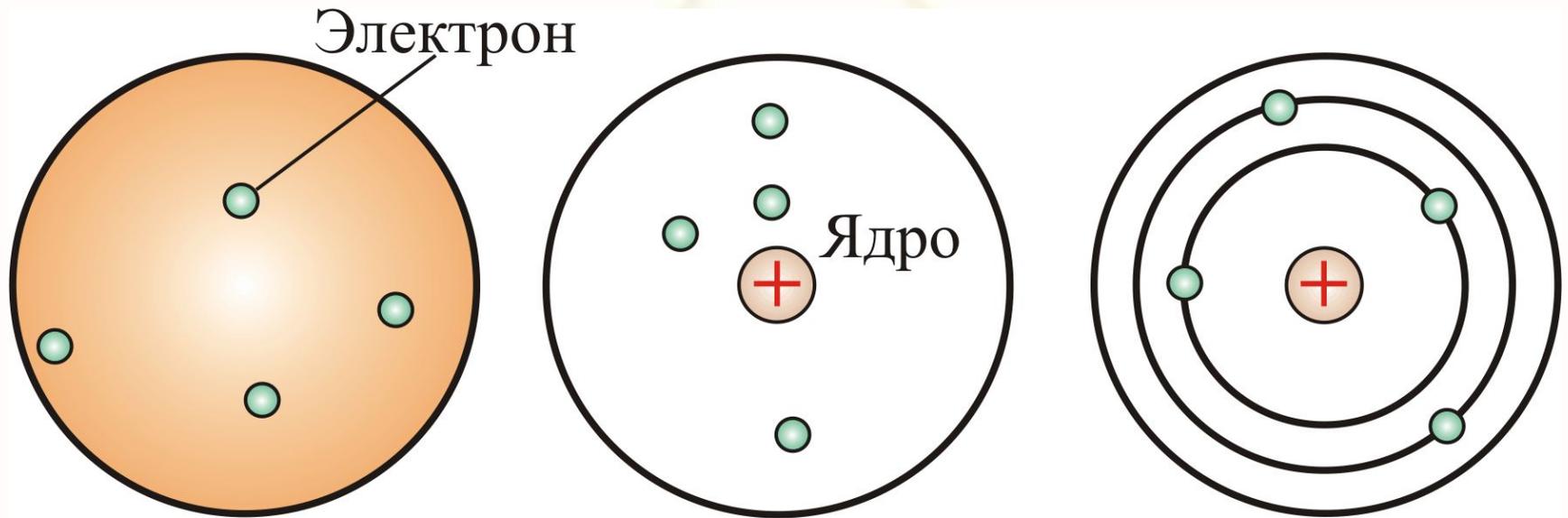
$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

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

Атом сложная система, имеющая сложный спектр



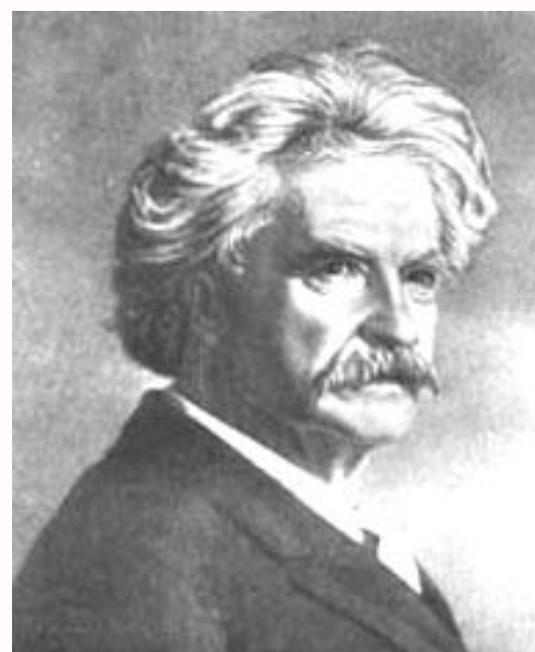
Существовало **много моделей атомов:**



Модель атома
Томсона (1903 г.):
сфера, равномерно
заполненная
положительным
электричеством,
внутри которой
находятся электроны

Модель атома:
сфера, в центре
которой находилось
положительно
заряженное ядро, а
вокруг него
располагались
электроны

Планетарная
модель атома,
предложенная Э.
Резерфордом



Резерфорд Эрнест (1871–1937) – английский физик, основоположник ядерной физики. Его исследования посвящены атомной и ядерной физике, радиоактивности.

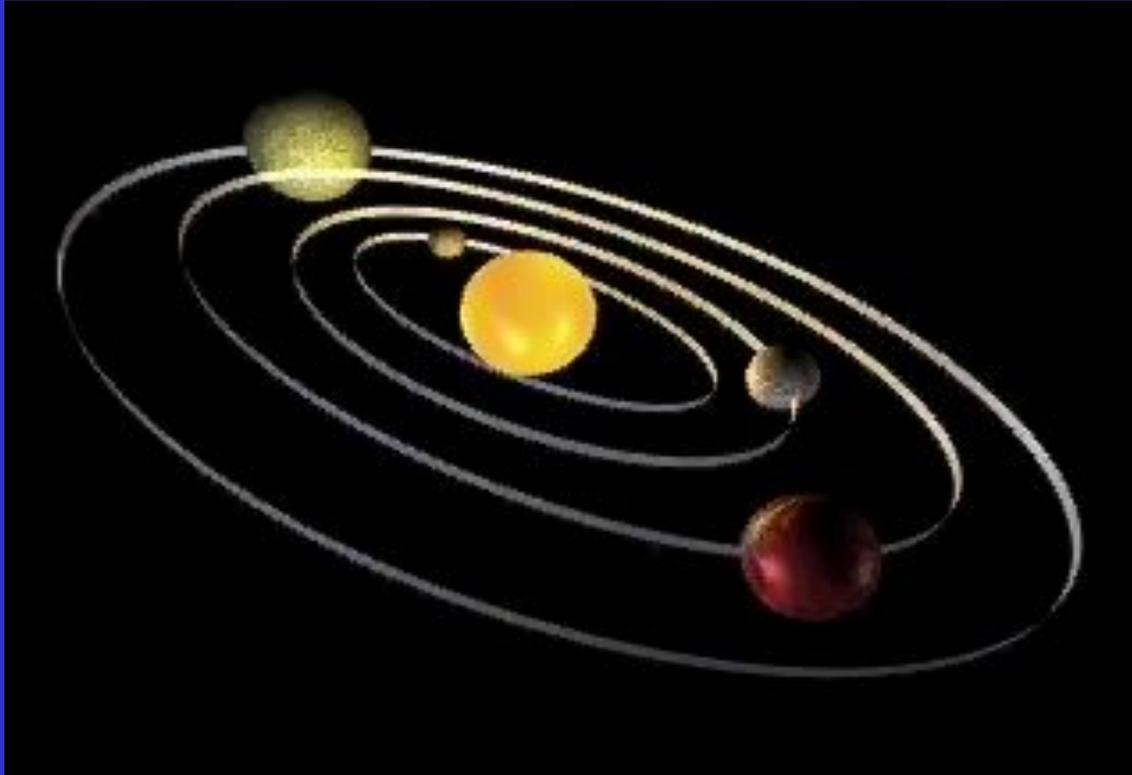
Своими фундаментальными открытиями в этих областях заложил основы современного учения о радиоактивности

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 г. доказал, что альфа-лучи состоят из положительно заряженных частиц. Предсказал существование трансурановых элементов.

В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия.

Планетарная модель строения атома



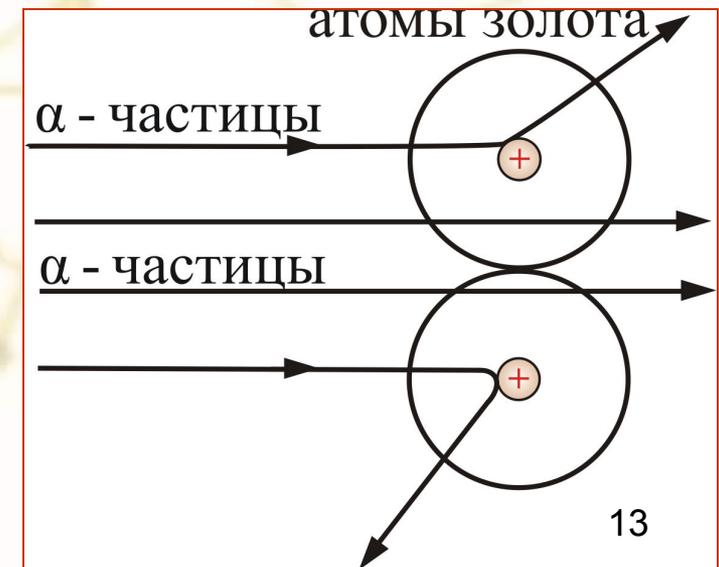
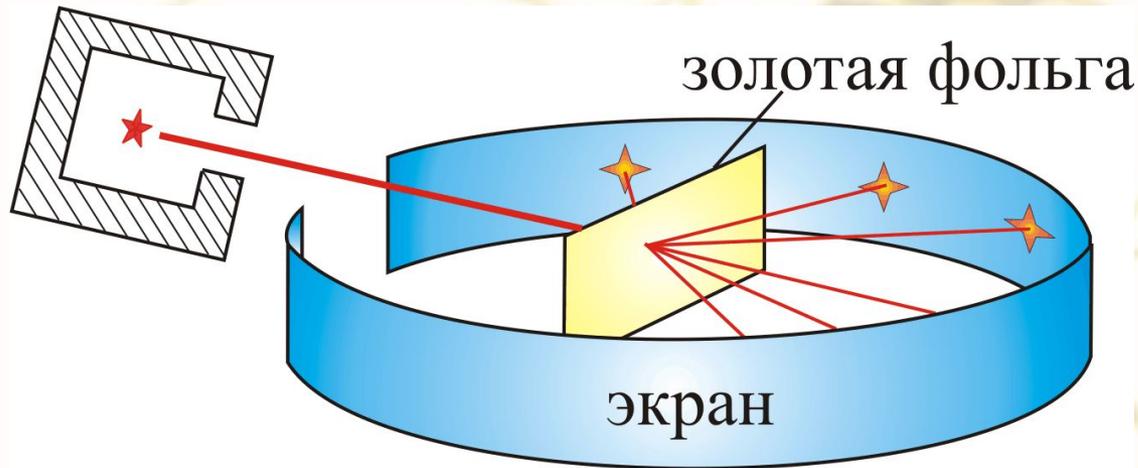
Конец XIX - начало XX века

7.2. Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

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

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

Опыт осуществлялся по схеме



Узкий пучок α -частиц испускался радиоактивным веществом и попадал на фольгу. При прохождении через фольгу α -частицы отклонялись на различные углы.

Рассеянные частицы ударялись об экран, покрытый ZnS и вызываемые им вспышки света, *сцинтилляции*, наблюдались в микроскоп.

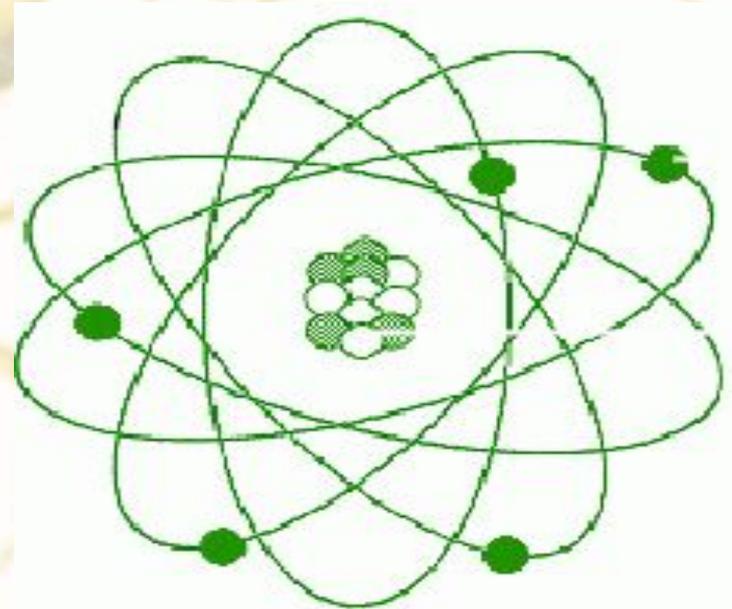
Микроскоп и связанный с ним экран можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр фольги. Т.о. можно было всегда измерить угол отклонения.

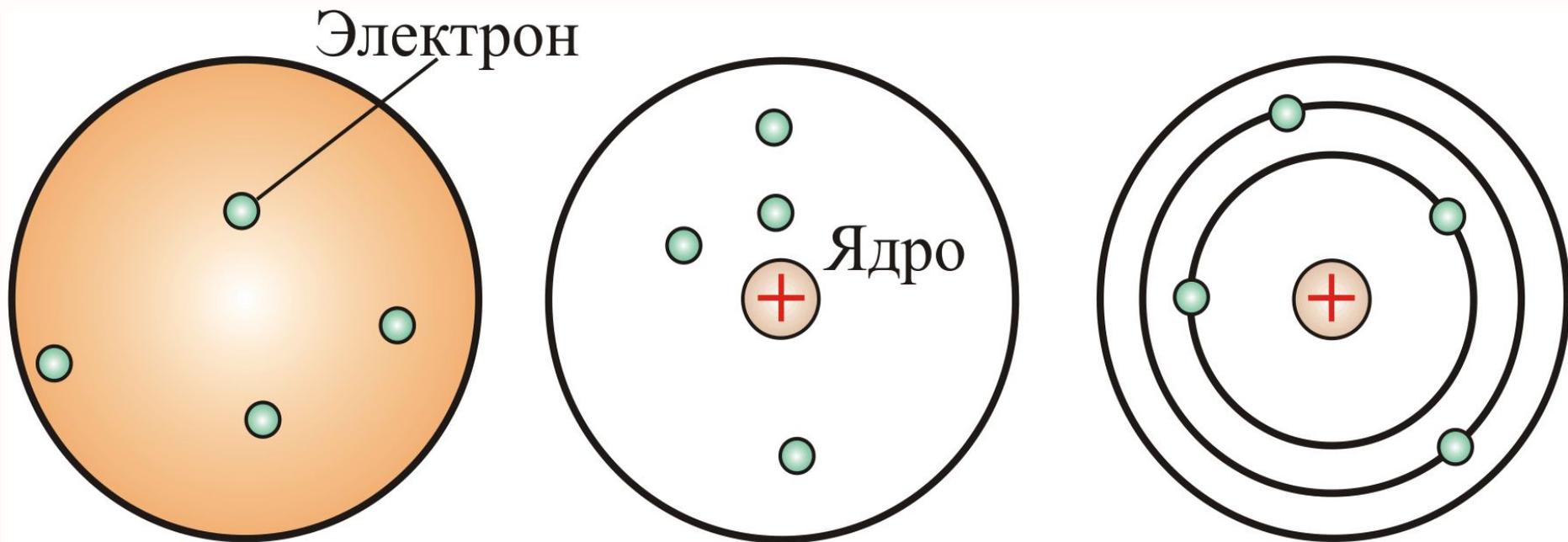
Весь прибор помещался в откачиваемый объем, чтобы устранить рассеяние α -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха.

Обнаружилось, что некоторые α -частицы отклонялись на большие углы, до 180° . Резерфорд понял, что такое отклонение возможно лишь при встрече с положительно заряженной частицей большей массы. Малая вероятность отклонения на большие углы говорила, что эта положительная частица имеет малые размеры, $\approx 10^{-14}$ м.

Электроны, по Резерфорду, движутся вокруг ядра.

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





Однако, *такая модель была в явном противоречии с классической электродинамикой*, т.к. *электрон, двигаясь по окружности*, т.е. с нормальным ускорением, *должен был излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и упасть на ядро*. Таким образом, модель Резерфорда не могла объяснить, почему атом устойчив.

**Планетарная
модель атома
противоречит
электродинамике
Максвелла**

Согласно которой,
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.

Нестабильный атом?!

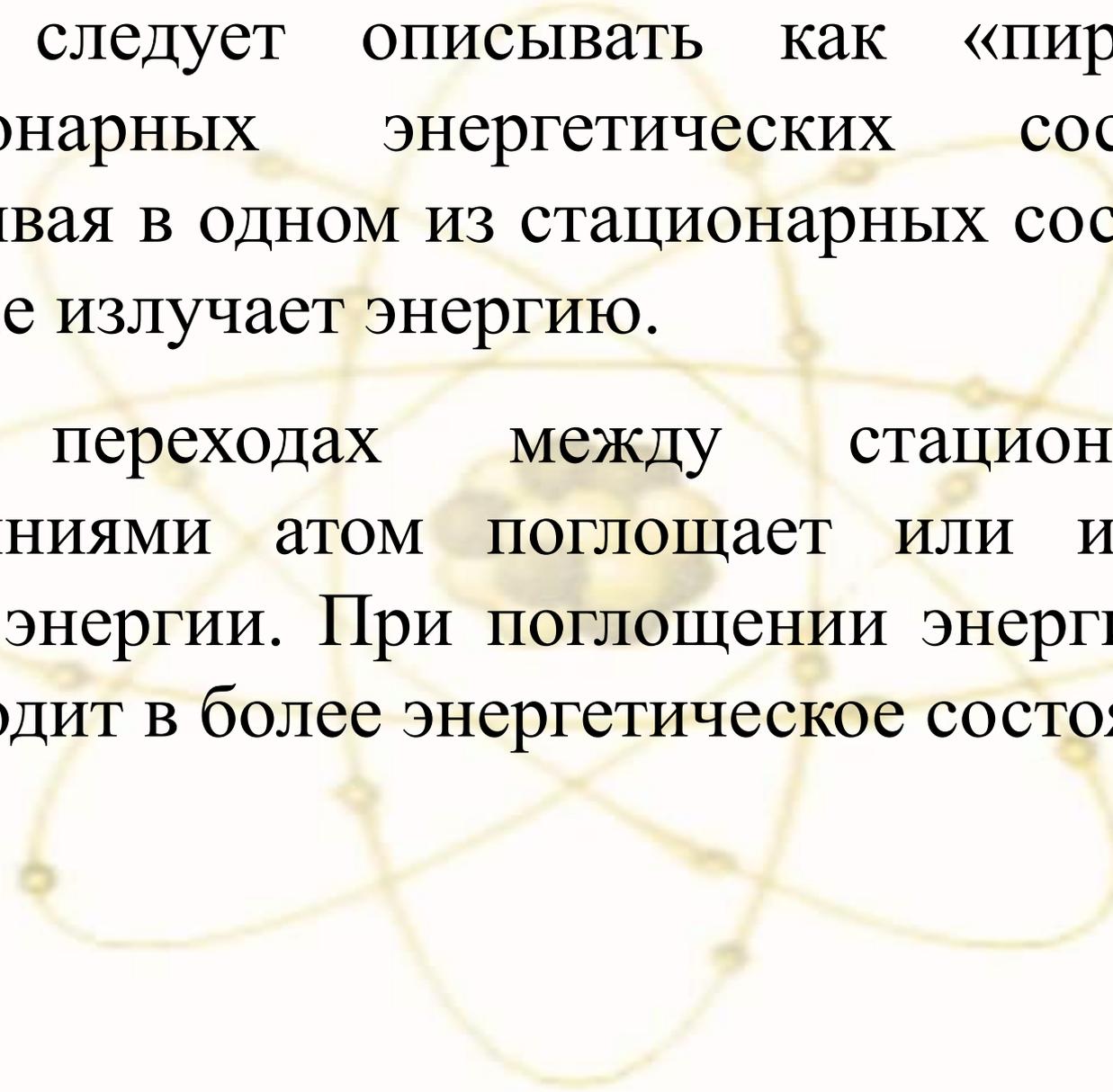
**Попыткой
спасения
планетарной
модели атома
стали постулаты
Н. Бора**

7.3. 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.

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

- **Первый постулат** (постулат стационарных состояний): **электроны движутся только по определенным (стационарным) орбитам.**
При этом, даже двигаясь с ускорением, они не излучают энергию.
- **Второй постулат** (правило частот): **излучение и поглощение энергии в виде кванта $h\nu$ происходит лишь при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое.** Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается скачок электрона .

Правило частот:

частота излучаемой линии, равна

$$\nu = \frac{E_n}{h} - \frac{E_k}{h}$$

или

$$\omega = \frac{E_n}{\hbar} - \frac{E_k}{\hbar}$$

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

$$m_e v r = n \hbar$$

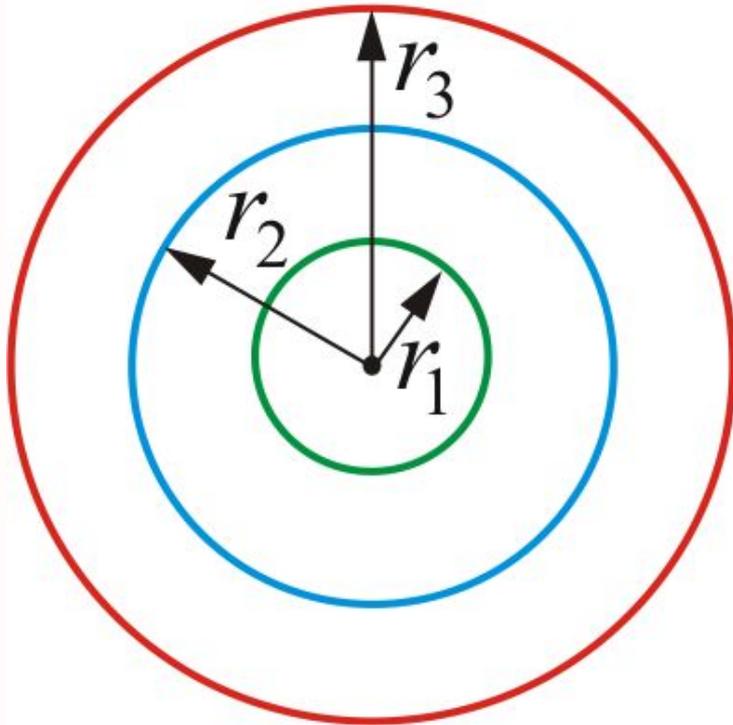
где $n = 1, 2, 3, \dots$ главное квантовое число.

Уравнение движения электрона получим из равенства центробежной силе кулоновской силе:

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

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 (ядро неподвижно) и потенциальной энергией взаимодействия электрона с ядром.

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

Из уравнения движения электрона следует, что

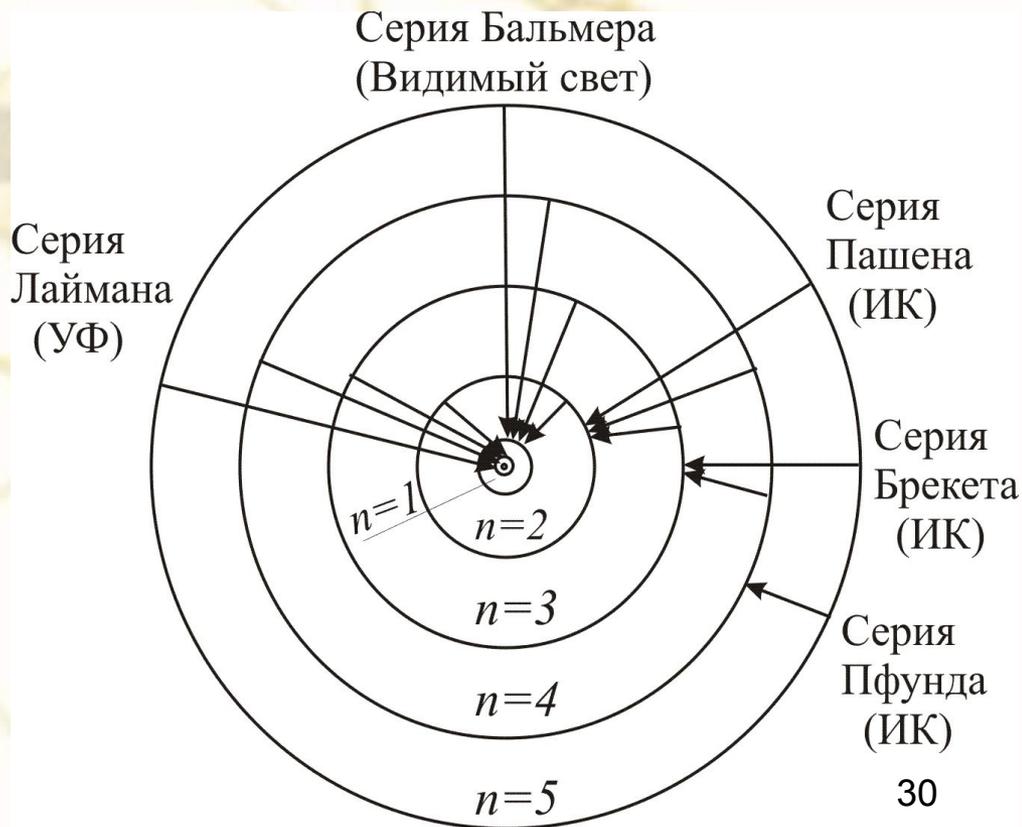
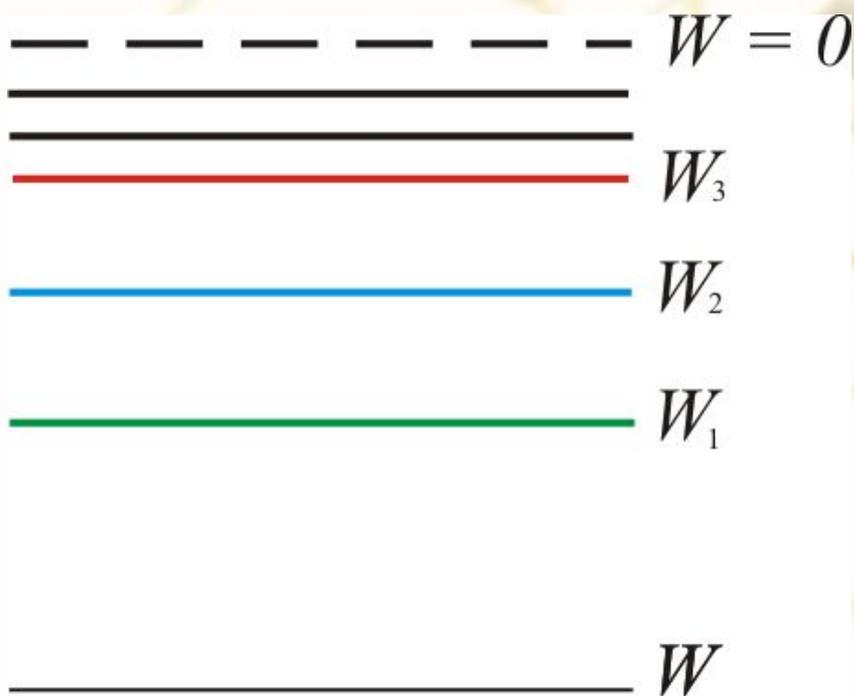
$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{2r} \quad \text{— кинетическая энергия равна} \\ \text{потенциальной.}$$

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

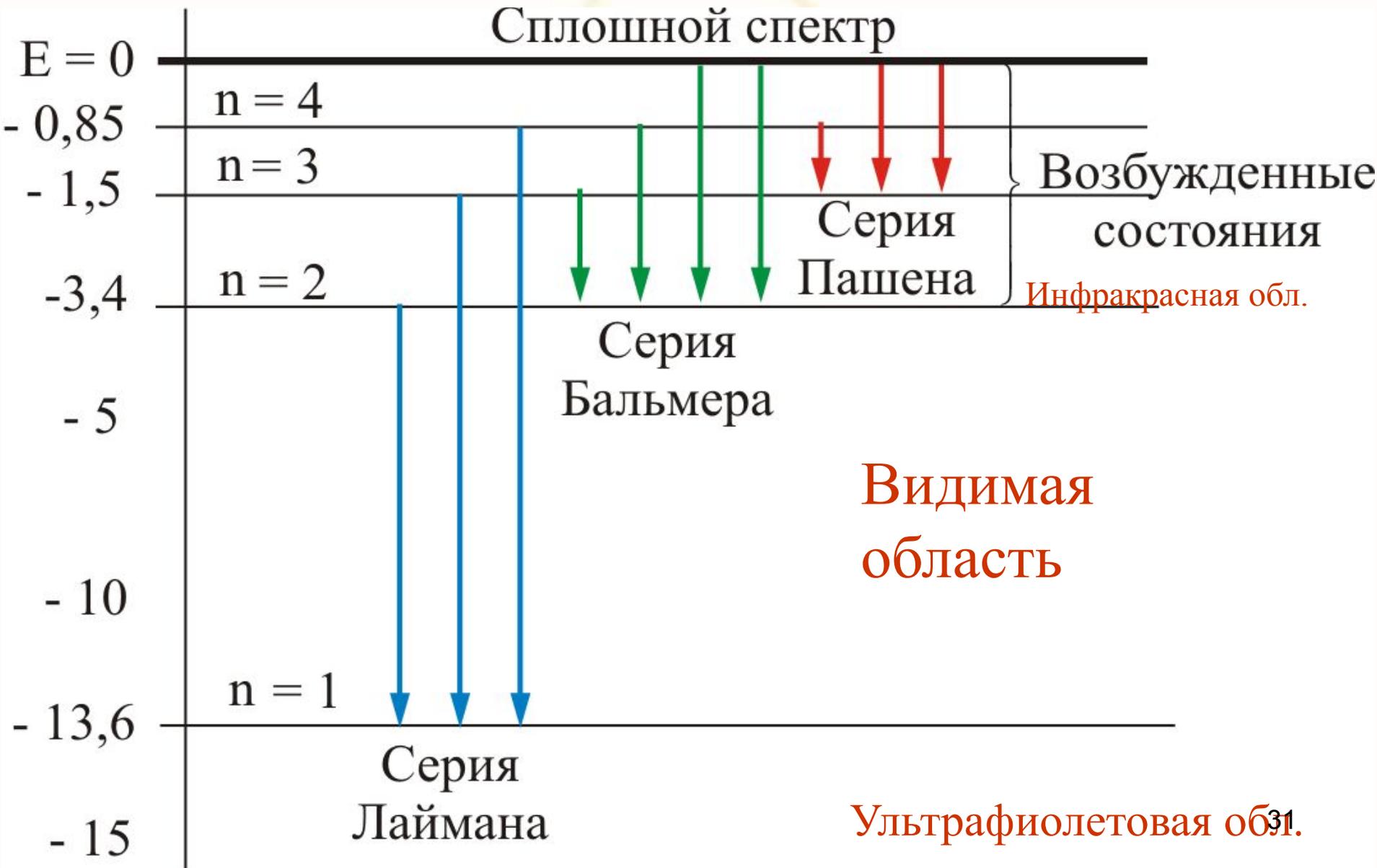
Ясно, видно, что W_n принимает только дискретные значения энергии, т. к. $n = 1, 2, 3, \dots$

Схема энергетических уровней определяемых

($W_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$) показана на рисунке



Атом сложная система, имеющая сложный спектр



При переходе электрона в атоме водорода из состояния n в состояние k излучается фотон с энергией:

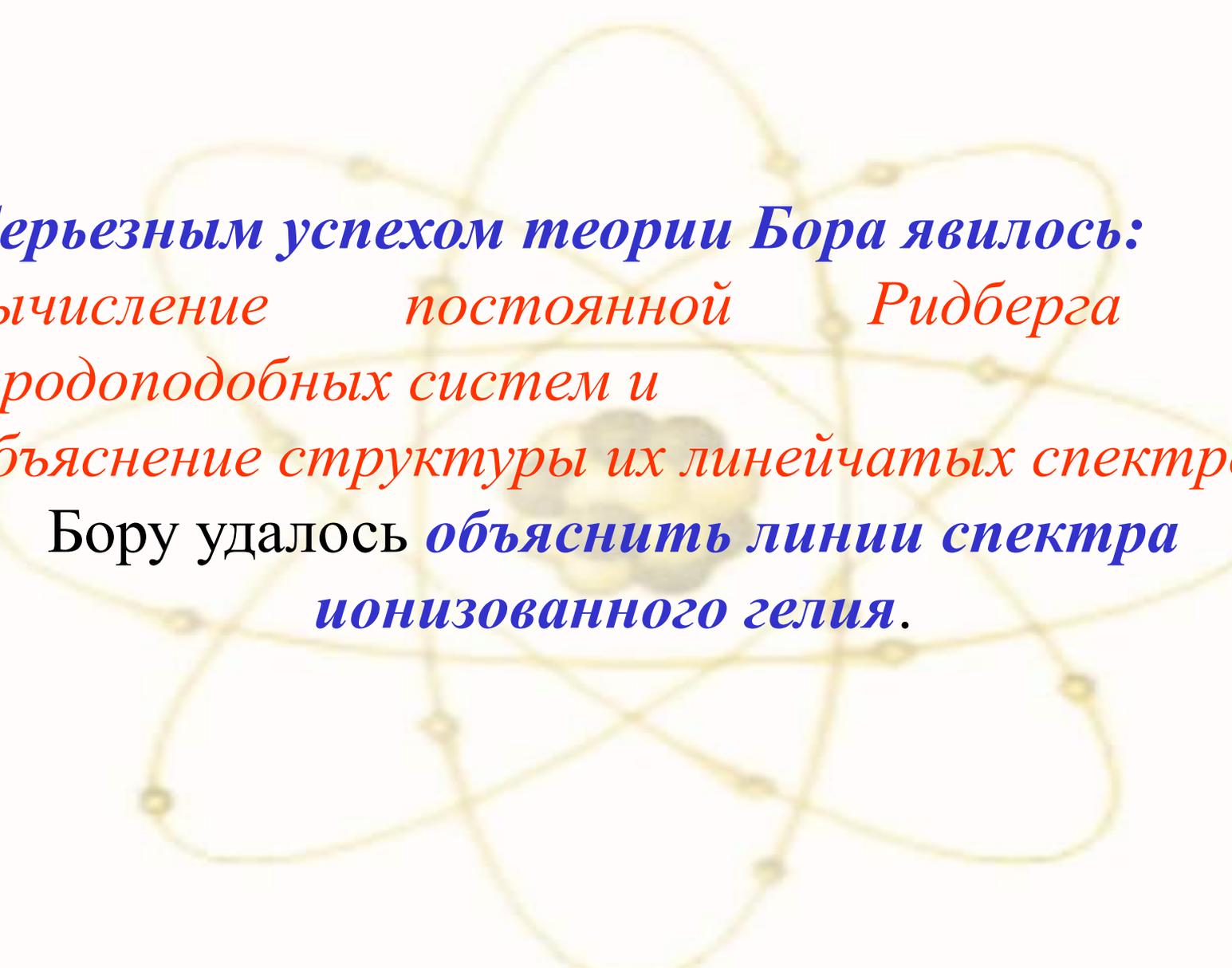
$$h\nu = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

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.*

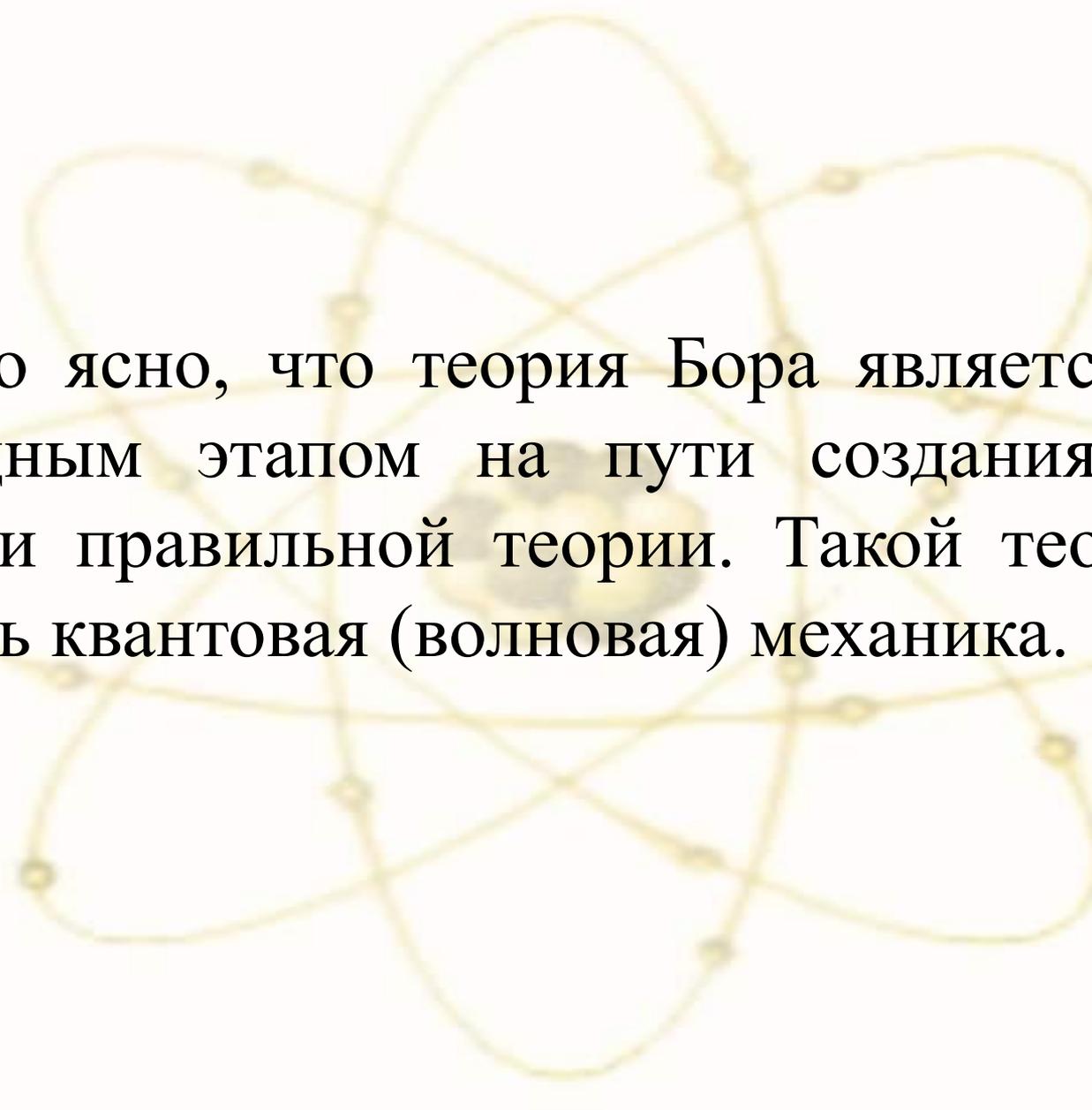
Бор теоретически вычислил отношение массы протона к массе электрона $m_p/m_e = 1847$, это находится в соответствии с экспериментом.

Все это было важным подтверждением основных идей, содержащихся в теории Бора.

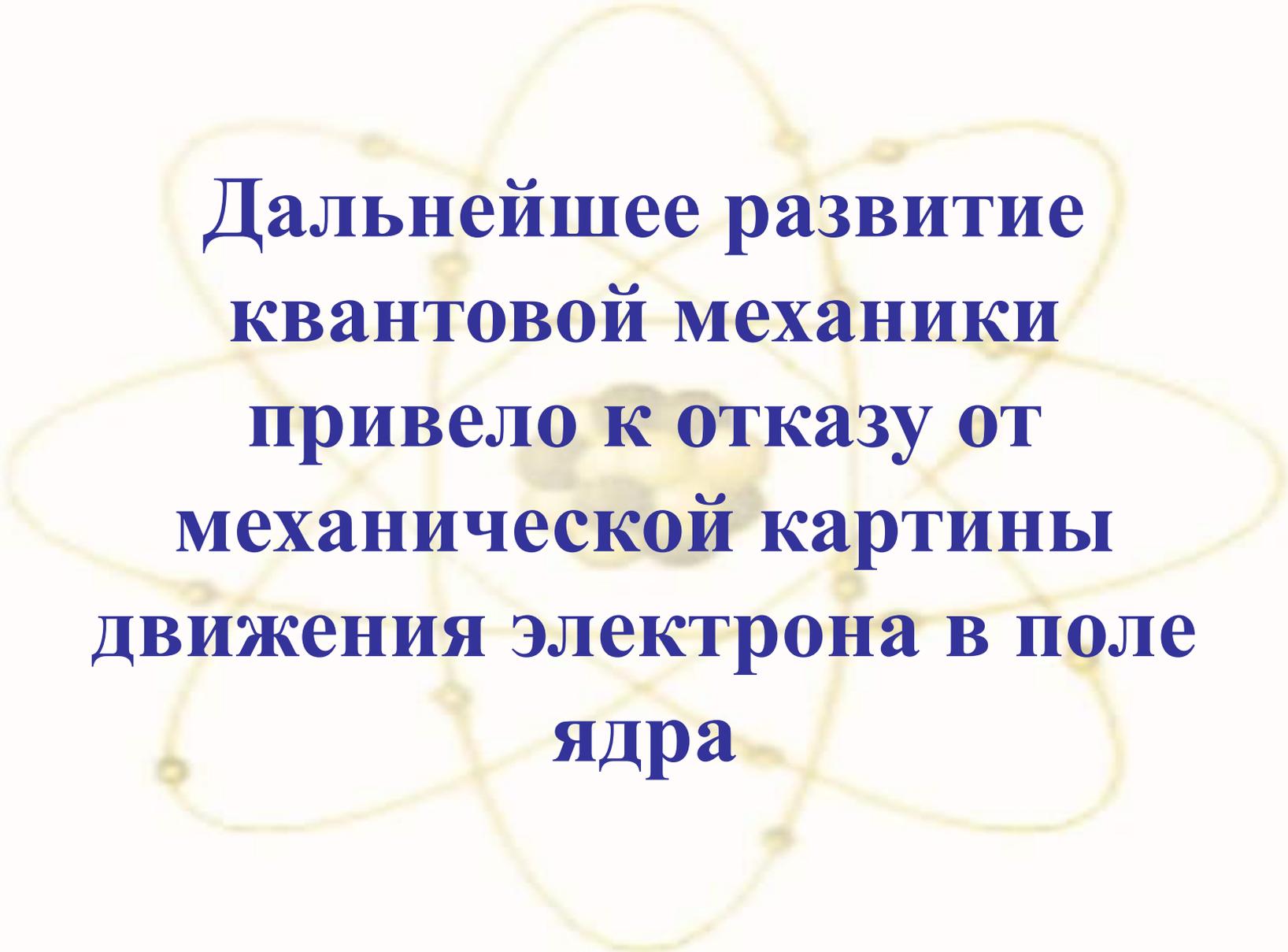
Теория Бора сыграла огромную роль в создании атомной физики. В период ее развития (1913 – 1925 гг.) были сделаны важные открытия.

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.



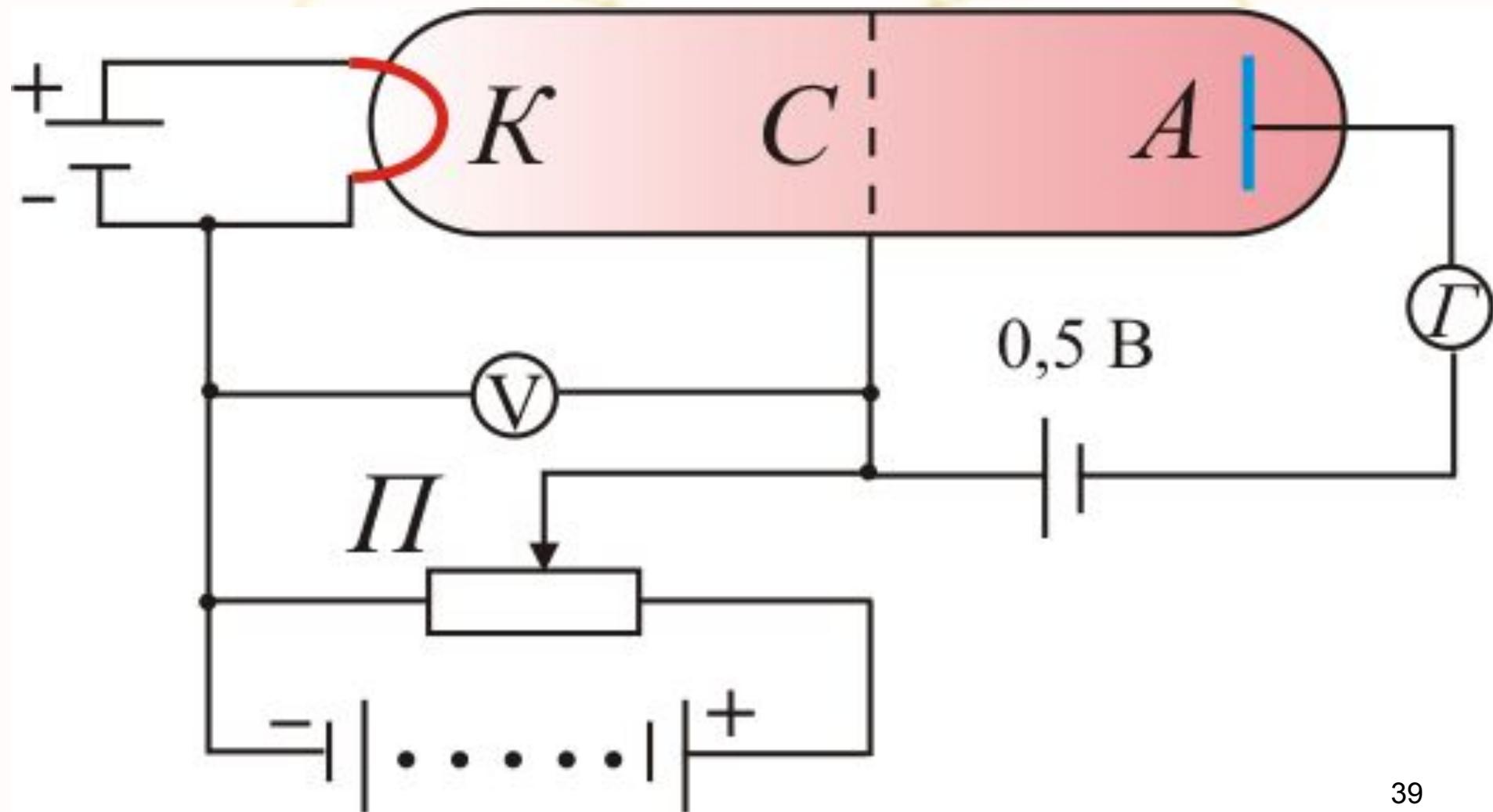
**Дальнейшее развитие
квантовой механики
привело к отказу от
механической картины
движения электрона в поле
ядра**

7.4. Опыт Франка и Герца.

Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытом Франка и Герца.

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

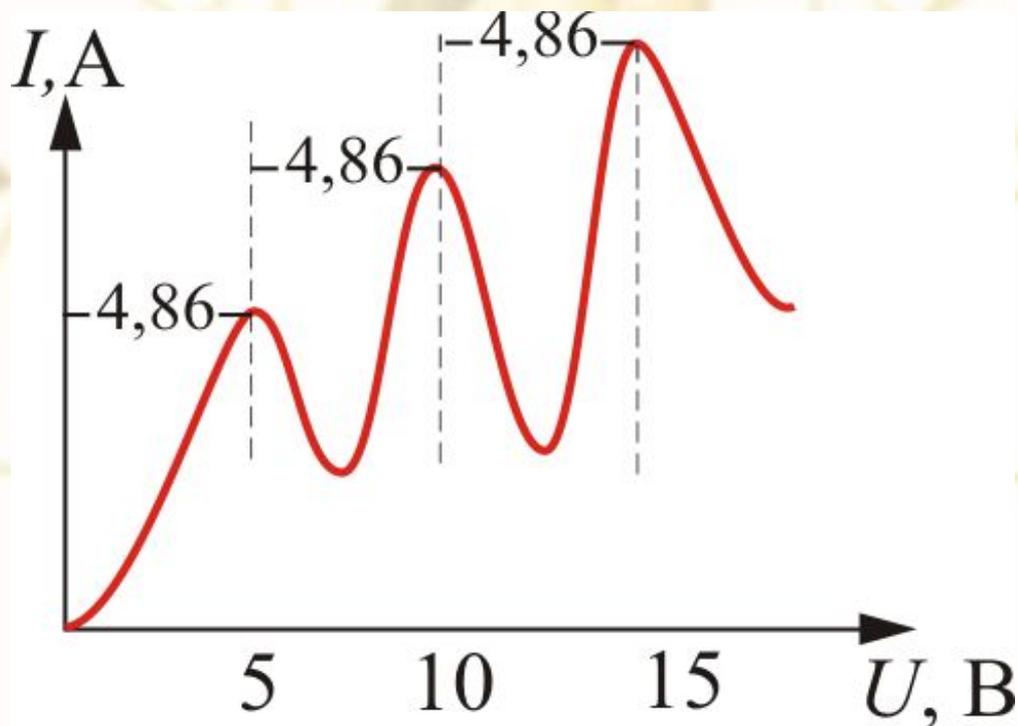
В трубке, заполненной парами ртути при давлении $p \approx 1$ мм рт.ст., три электрода, катод – сетка – анод.

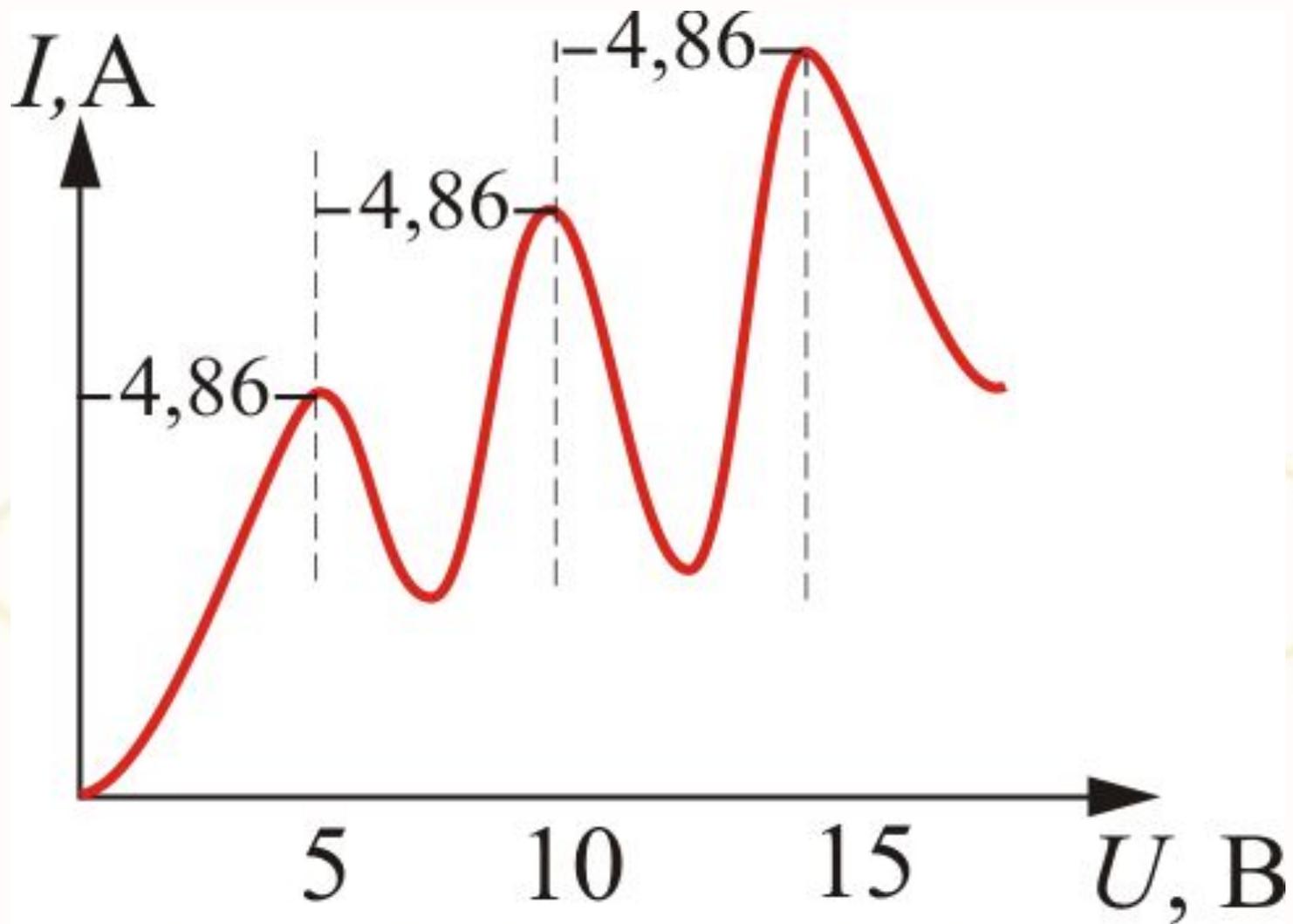


Электронны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно было изменять с помощью потенциометра Π . Между сеткой и анодом тормозящее поле ($\approx 0,5\text{В}$).

Определялась зависимость тока через гальванометр (I) от разности потенциалов между катодом и сеткой (U).

Они получили такую зависимость:





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

Согласно Боровский теории: *каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя в одно из возбужденных состояний* поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то *электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями*, равными разности энергии соответствующих стационарных состояний атома.

Из опыта следует, что *при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В анодный ток возрастает монотонно, его значение проходит через максимум (4,86 В), затем резко уменьшается и возрастает вновь.*

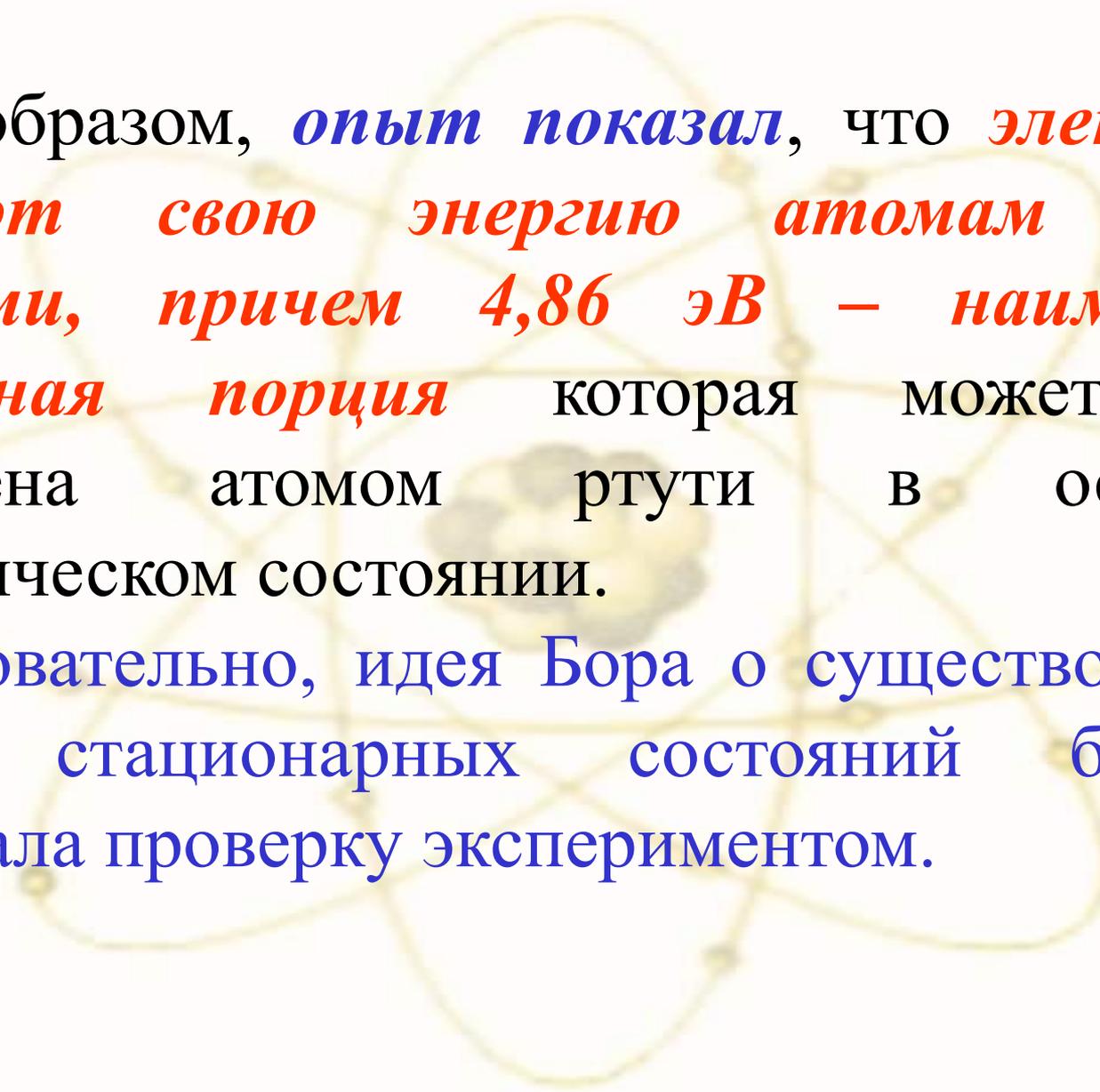
Дальнейшие максимумы наблюдаются при $2 \cdot 4.86 \text{ В}$ и $3 \cdot 4.86 \text{ В}$.

Ближайшим к основному, невозбужденному состоянию атома ртути является возбужденное состояние, отстоящее по шкале энергий на 4,86 В.

Пока разность потенциалов между катодом и сеткой меньше 4,86 В, электроны, встречая на своем пути атомы ртути, испытывают с ними только *упругие соударения*.

При $e\varphi = 4,86$ эВ энергия *электрона становится достаточной, чтобы вызвать неупругий удар, при котором электрон отдает атому ртути всю кинетическую энергию*, возбуждая переход одного из электронов атома из нормального состояния в возбужденное.

Электроны, потерявшие свою кинетическую энергию уже не смогут преодолеть тормозящий потенциал и достигнуть анода. Этим и объясняется резкое падение анодного тока при $e\varphi = 4,86$ эВ. При значениях энергии, кратных 4,86, электроны могут испытывать с атомами ртути 2, 3, ... неупругих соударения, потеряв при этом полностью свою энергию и не достигнуть анода, т.е. должно наблюдаться резкое падение анодного тока. Что действительно наблюдалось на опыте.



Таким образом, *опыт показал*, что *электроны передают свою энергию атомам ртути порциями, причем 4,86 эВ – наименьшая возможная порция* которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии.

Следовательно, идея Бора о существовании в атомах стационарных состояний блестяще выдержала проверку экспериментом.

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию ΔE , переходят в возбужденное состояние и должны вернуться в основное, *излучая при этом, согласно второму постулату Бора, квант света с частотой*

$$\nu = \Delta E / h$$

По известному значению $\Delta E = 4,86 \text{ В}$ можно вычислить длину волны светового кванта

$$\lambda = hc / \Delta E \approx 255 \text{ нм}$$

Таким образом, если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,86 эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с $\lambda \approx 255$ нм, что действительно обнаруживает одну ***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.