

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**

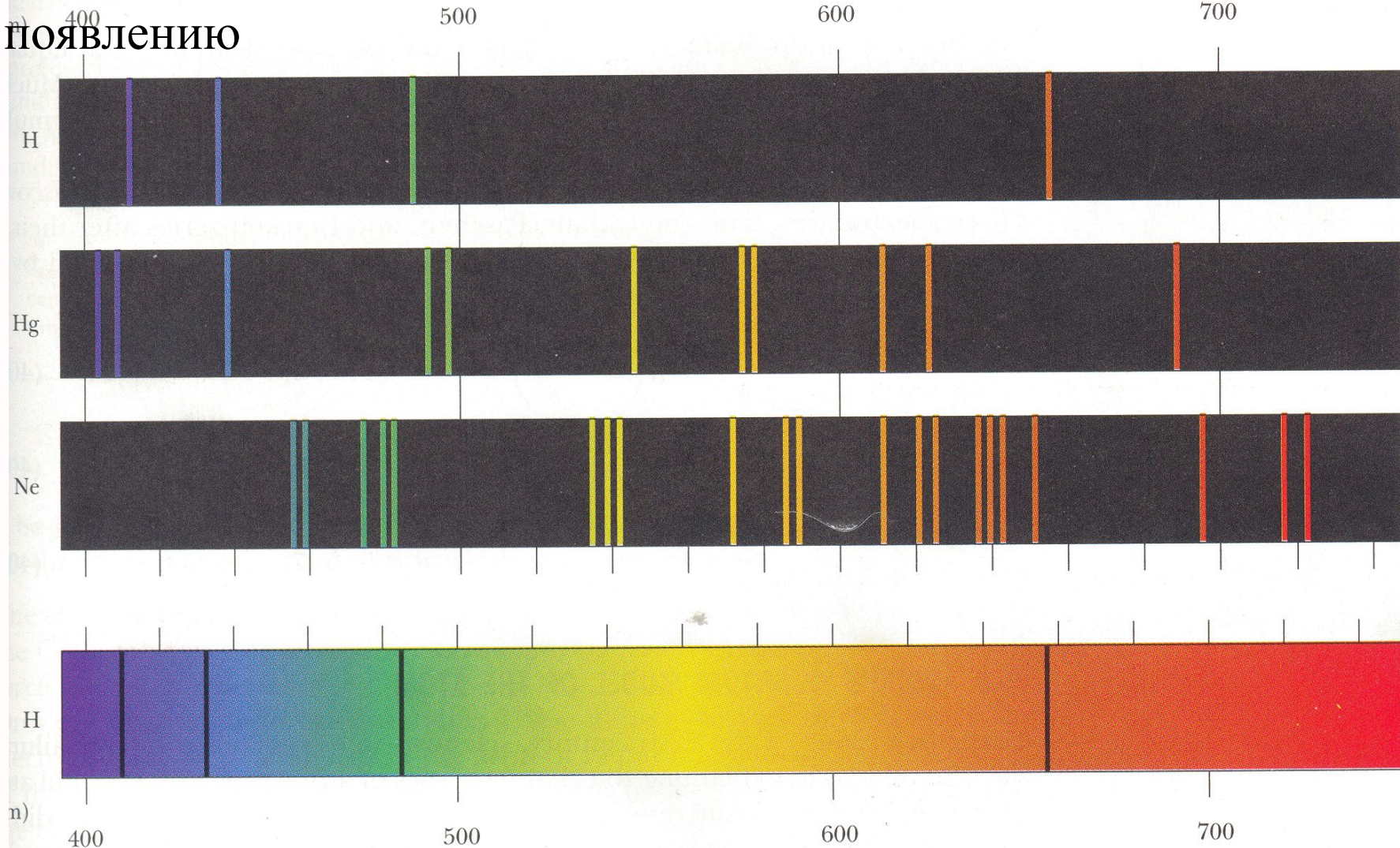
## 7.1. Закономерности в атомных спектрах

*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.

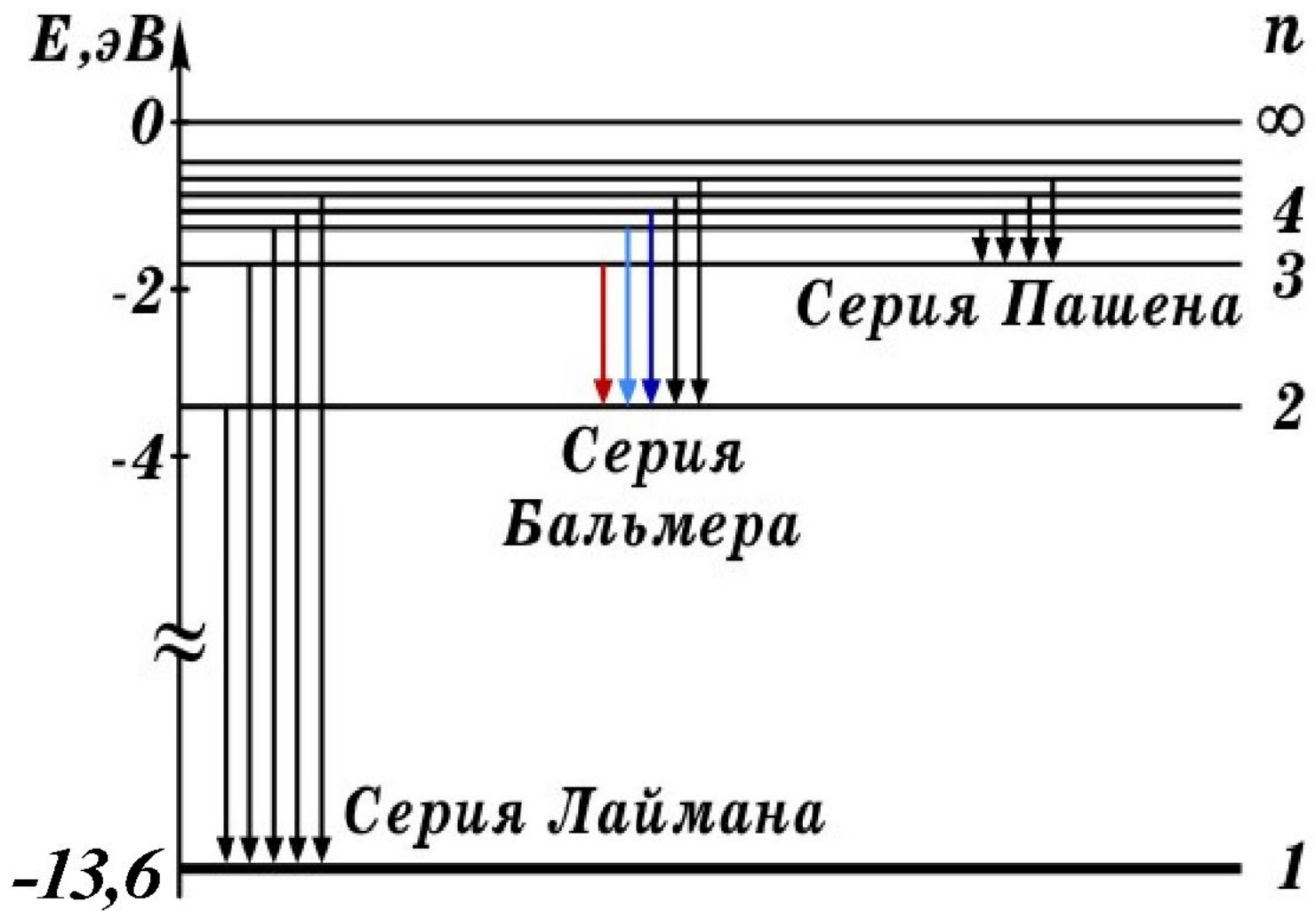
- линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями.
- расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.



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



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



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*

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

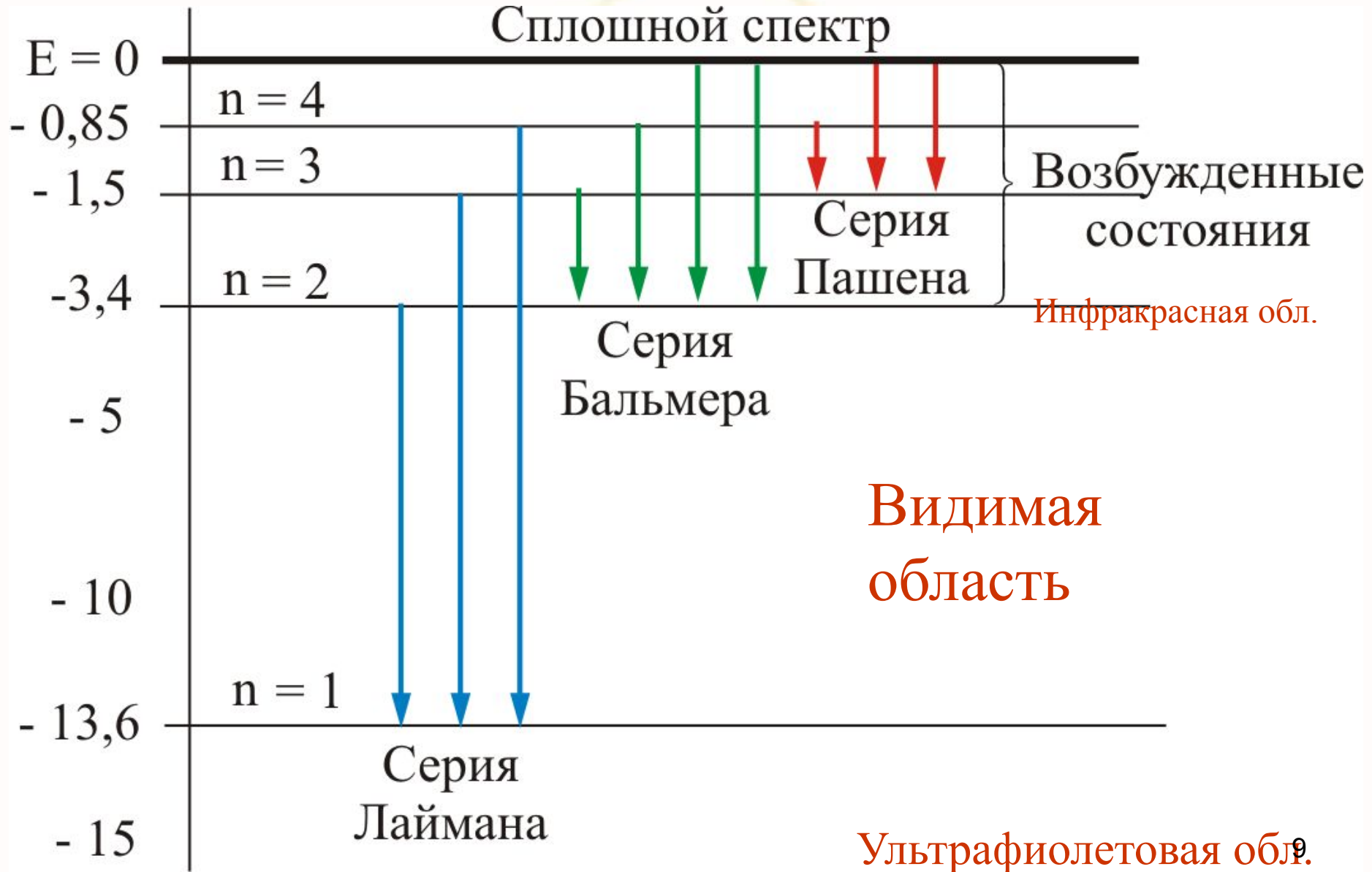
или

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

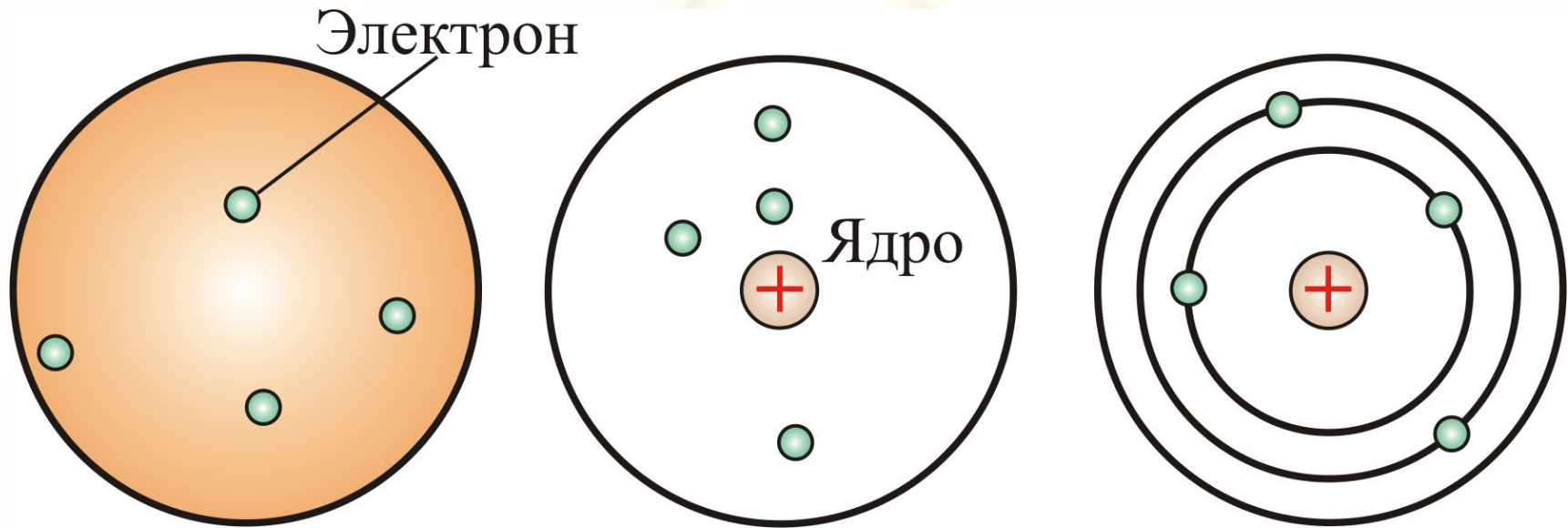
где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $n = k + 1, k + 2, \dots$



# Атом сложная система, имеющая сложный спектр



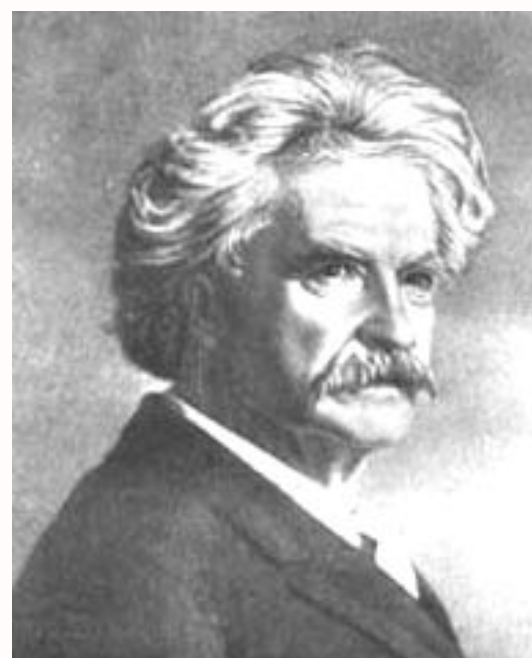
## Существовало **много моделей атомов:**



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**

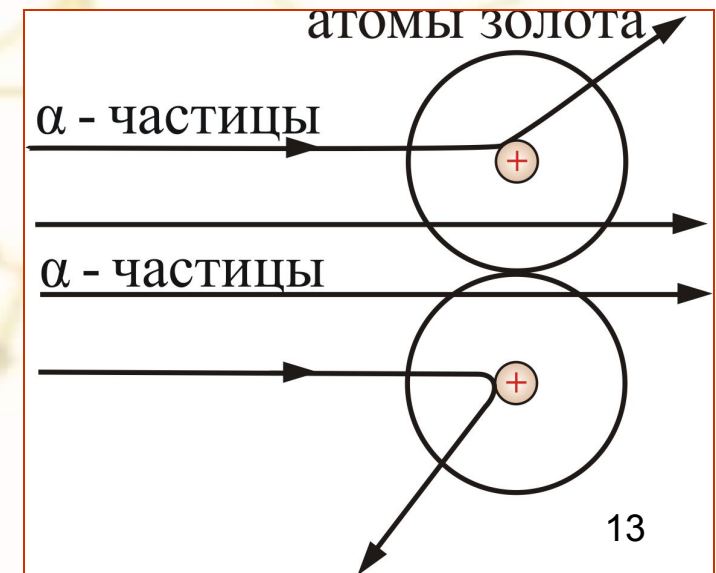
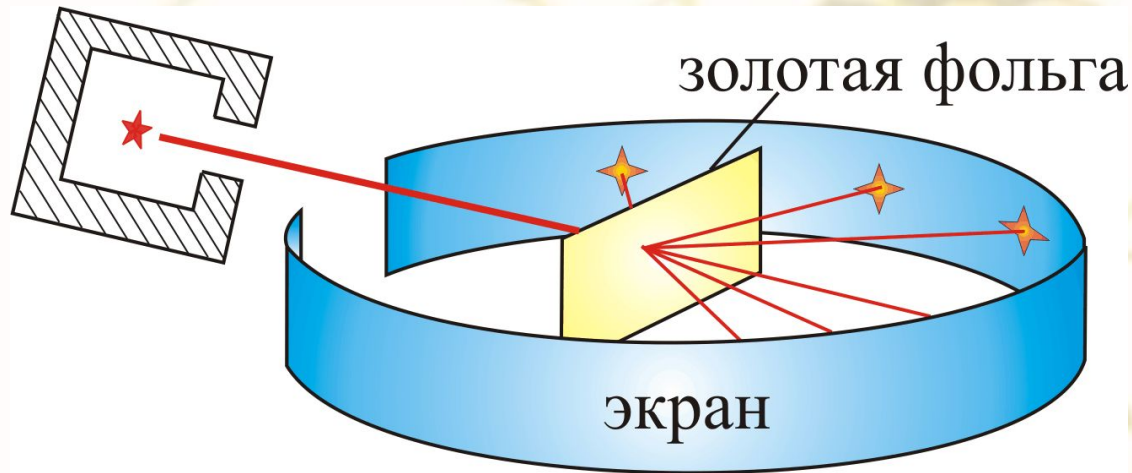


## 7.2. Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

Скорость  $\alpha$  - частиц =  $10^7$  м/с =  $10^4$  км/сек.

$\alpha$  - частица имеет положительный заряд равный  $+2e$ .

*Опыт осуществлялся по схеме*



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

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

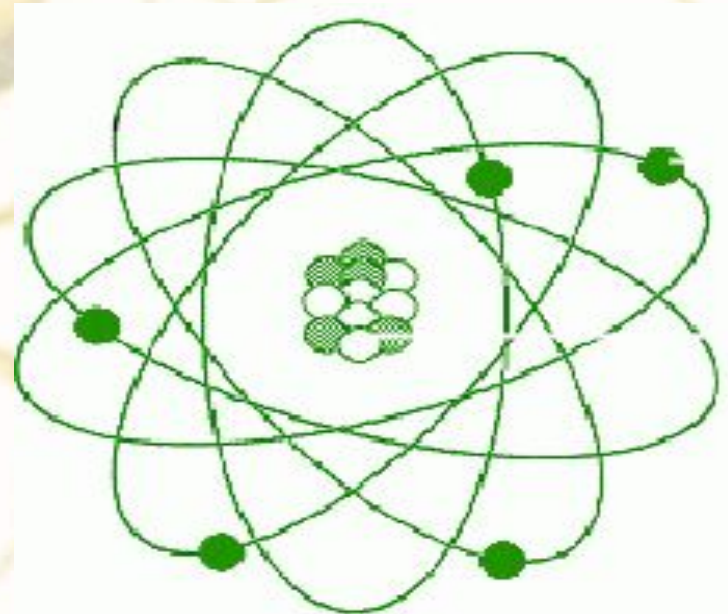
Микроскоп и связанный с ним экран можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр фольги. Т.о. можно было всегда измерить угол отклонения.

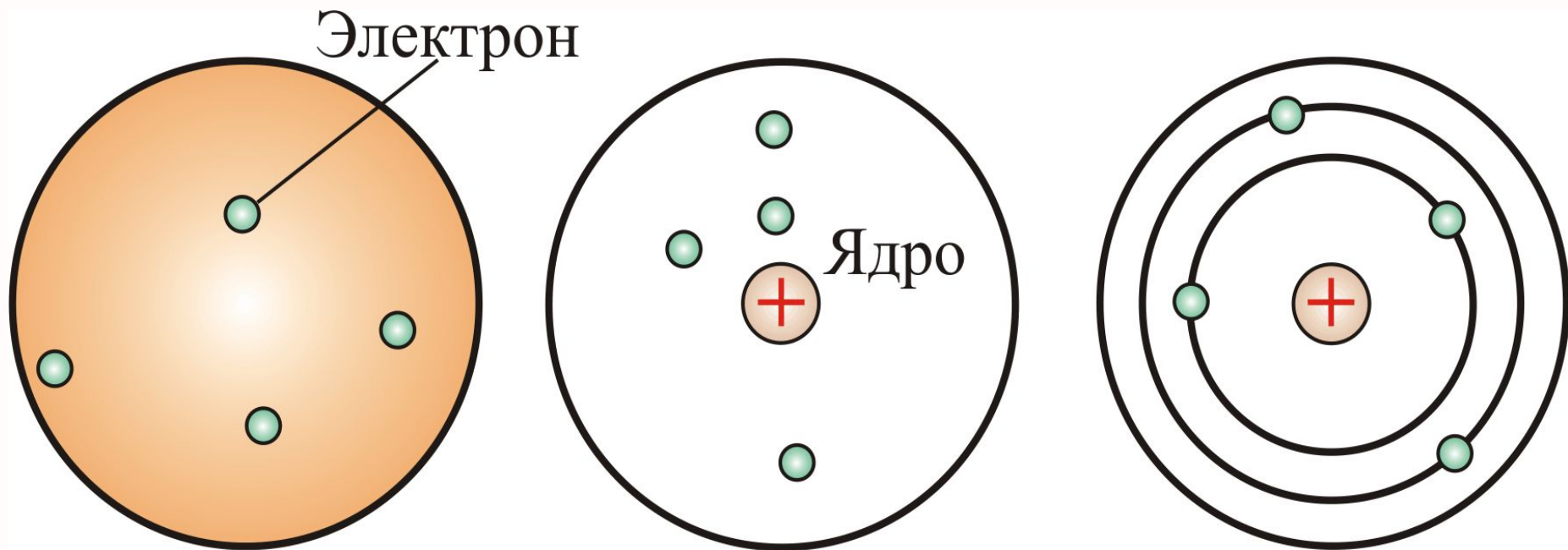
Весь прибор помещался в откачиваемый объем, чтобы устранить рассеяние  $\alpha$ -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха.

*Обнаружилось, что некоторые  $\alpha$ -частицы отклонялись на большие углы, до  $180^\circ$ .* 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**

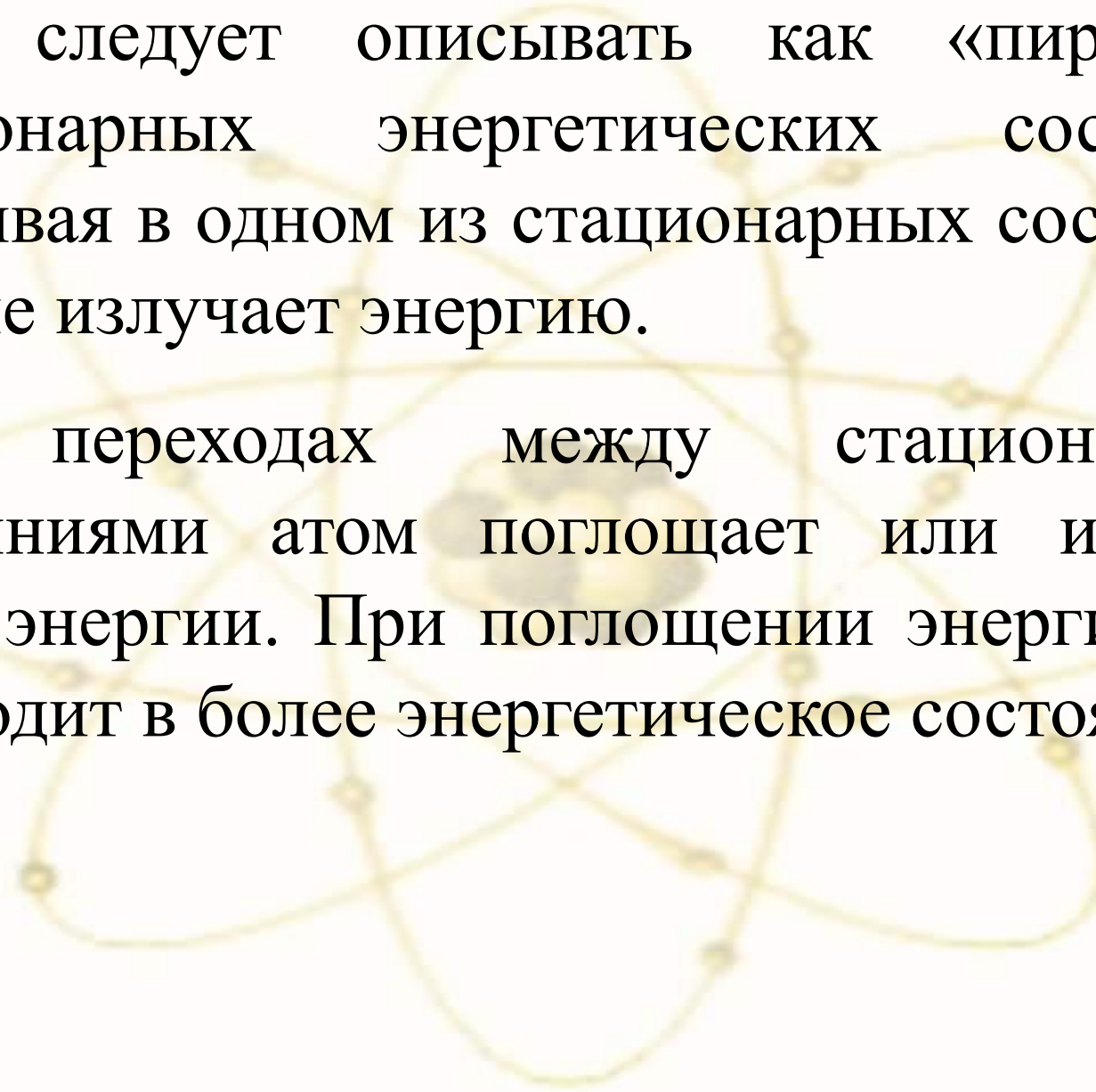


## 7.3. Элементарная теория Бора.



***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

$$m_e v r = n \hbar$$

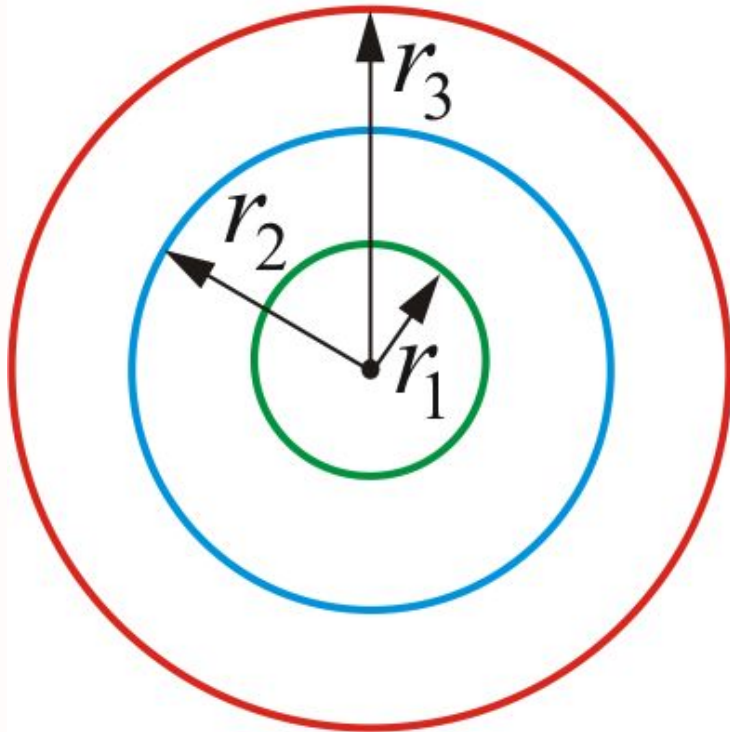
где  $n = 1, 2, 3, \dots$  главное квантовое число.

**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

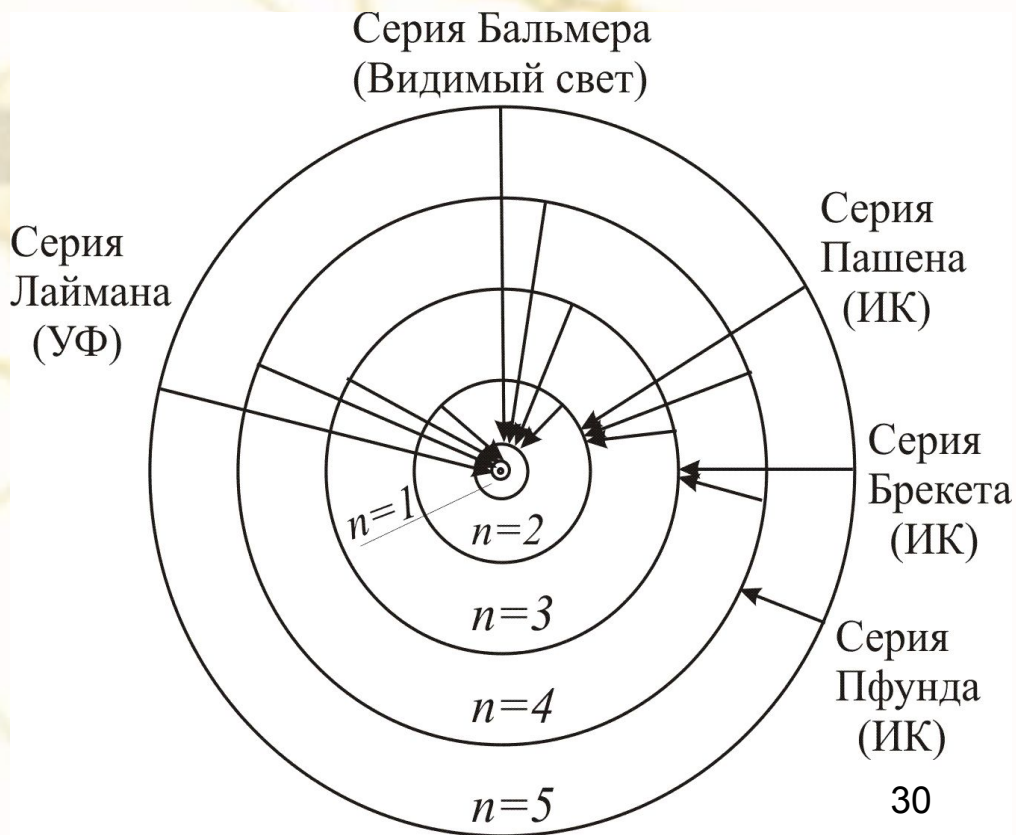
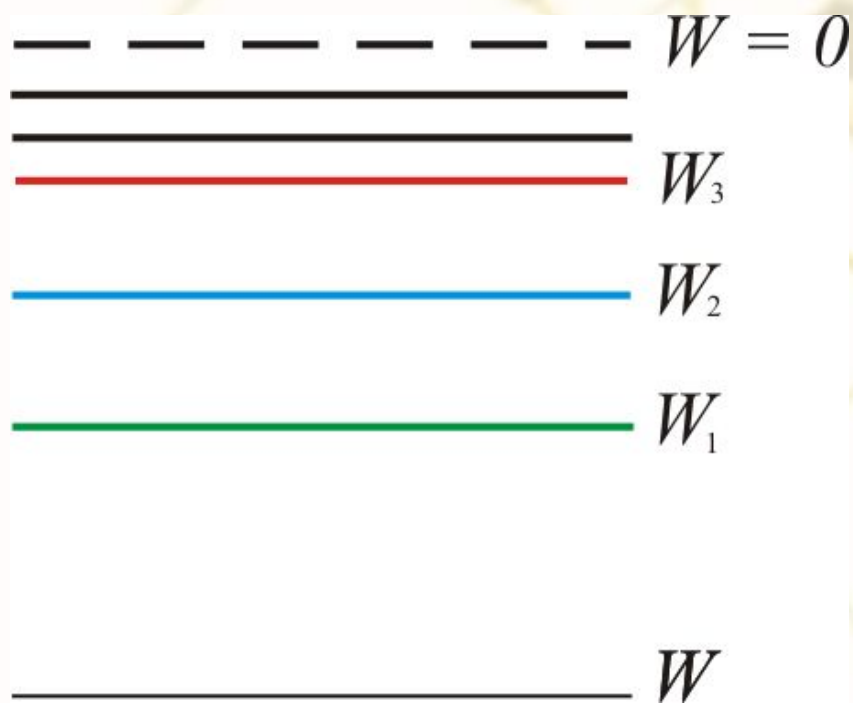
$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{2r} \quad \text{— кинетическая энергия равна} \\ \text{потенциальной.}$$

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.  $n = 1, 2, 3, \dots$

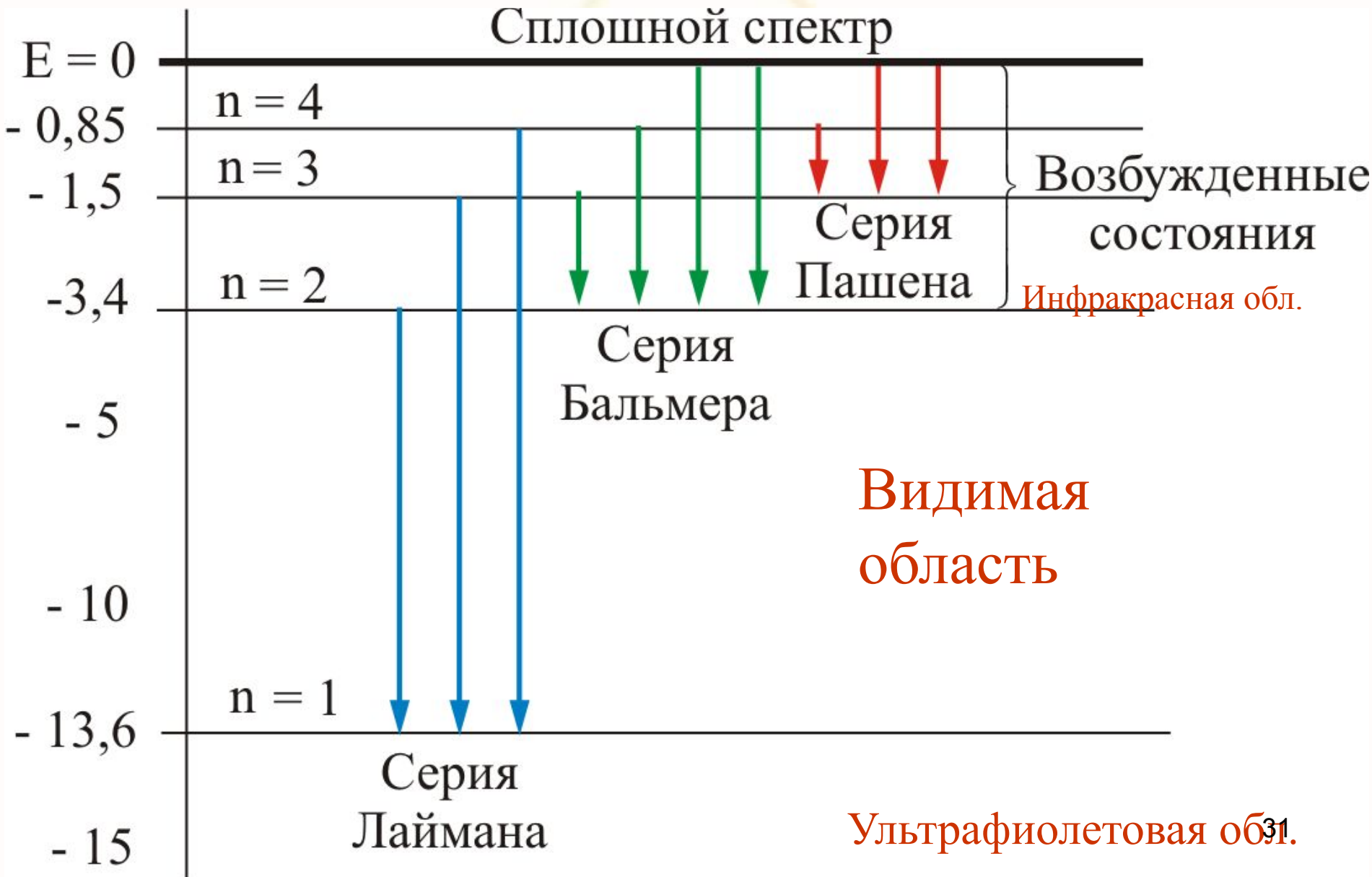
Схема энергетических уровней определяемых

$$(W_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}) \text{ показана на рисунке}$$





# 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.

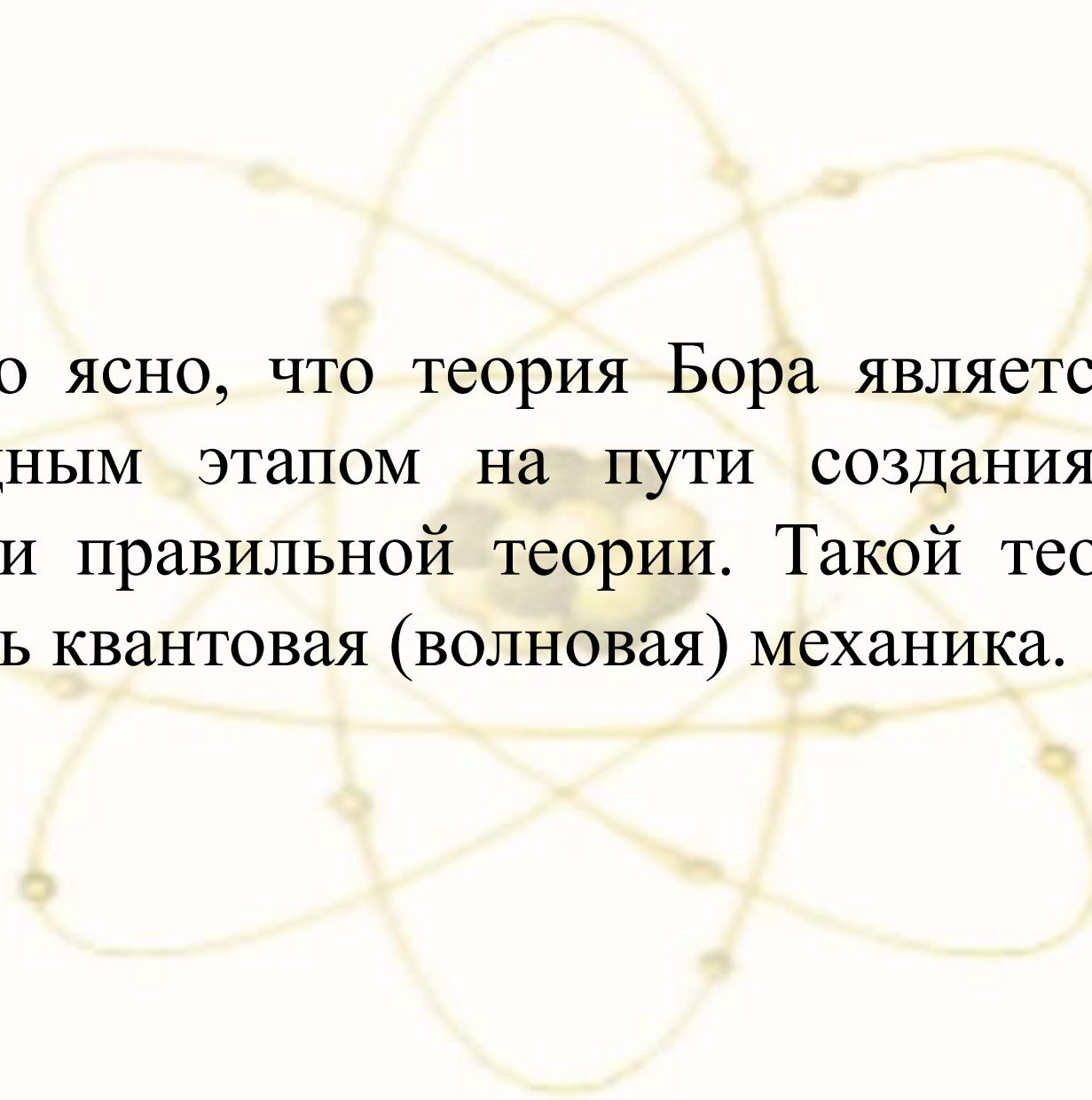
Все это было важным подтверждением основных идей, содержащихся в теории Бора.

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 обнаружались **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.



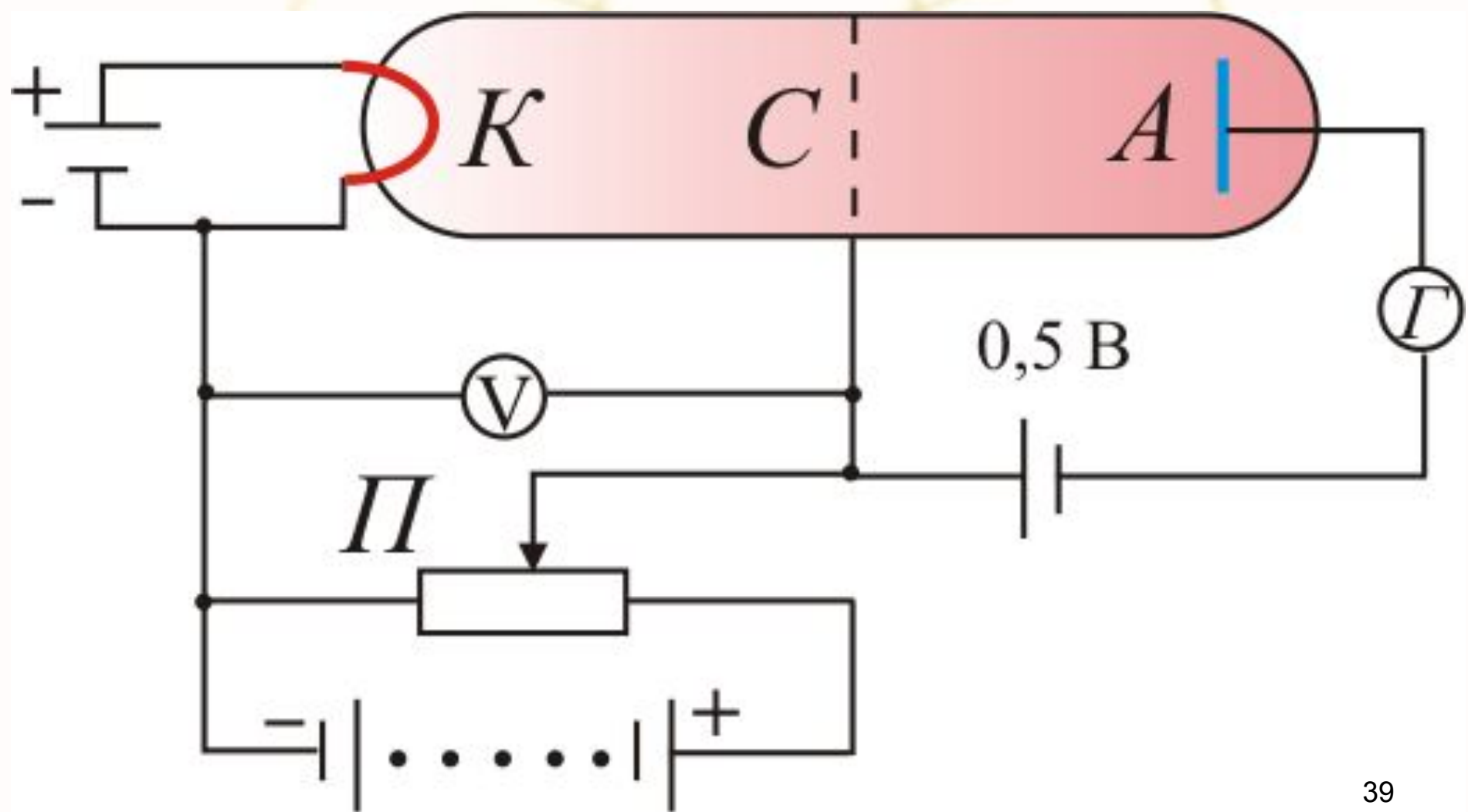
**Дальнейшее развитие  
квантовой механики  
привело к отказу от  
механической картины  
движения электрона в поле  
ядра**

## 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.

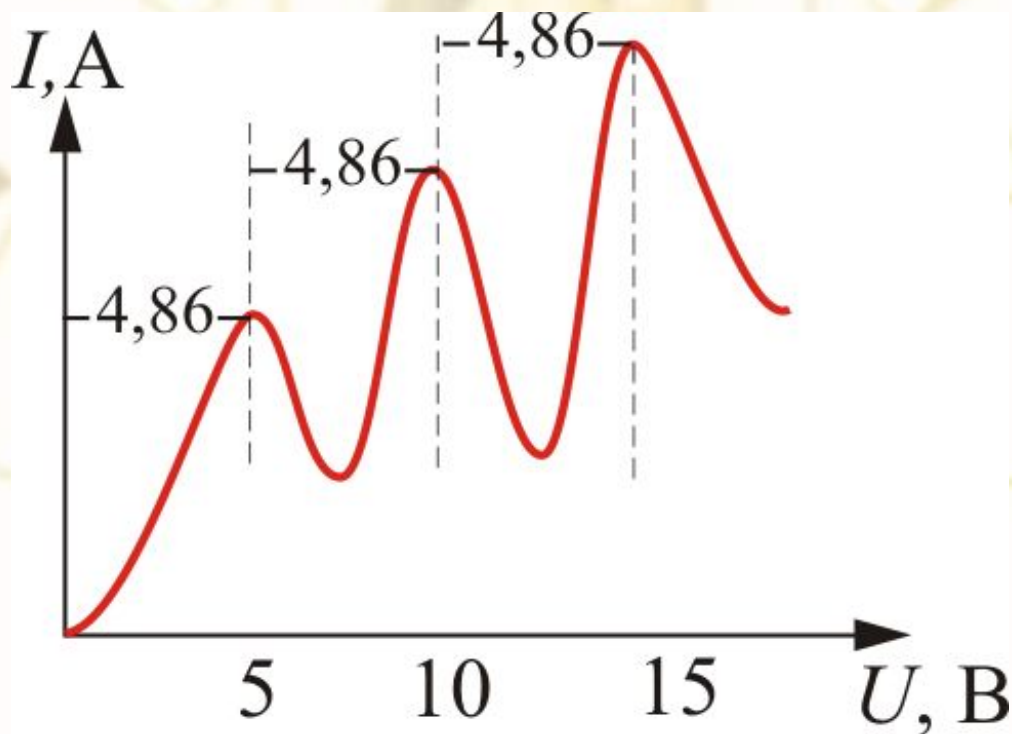
В трубке, заполненной парами ртути при давлении  $p \approx 1$  мм рт.ст., три электрода, катод – сетка – анод.



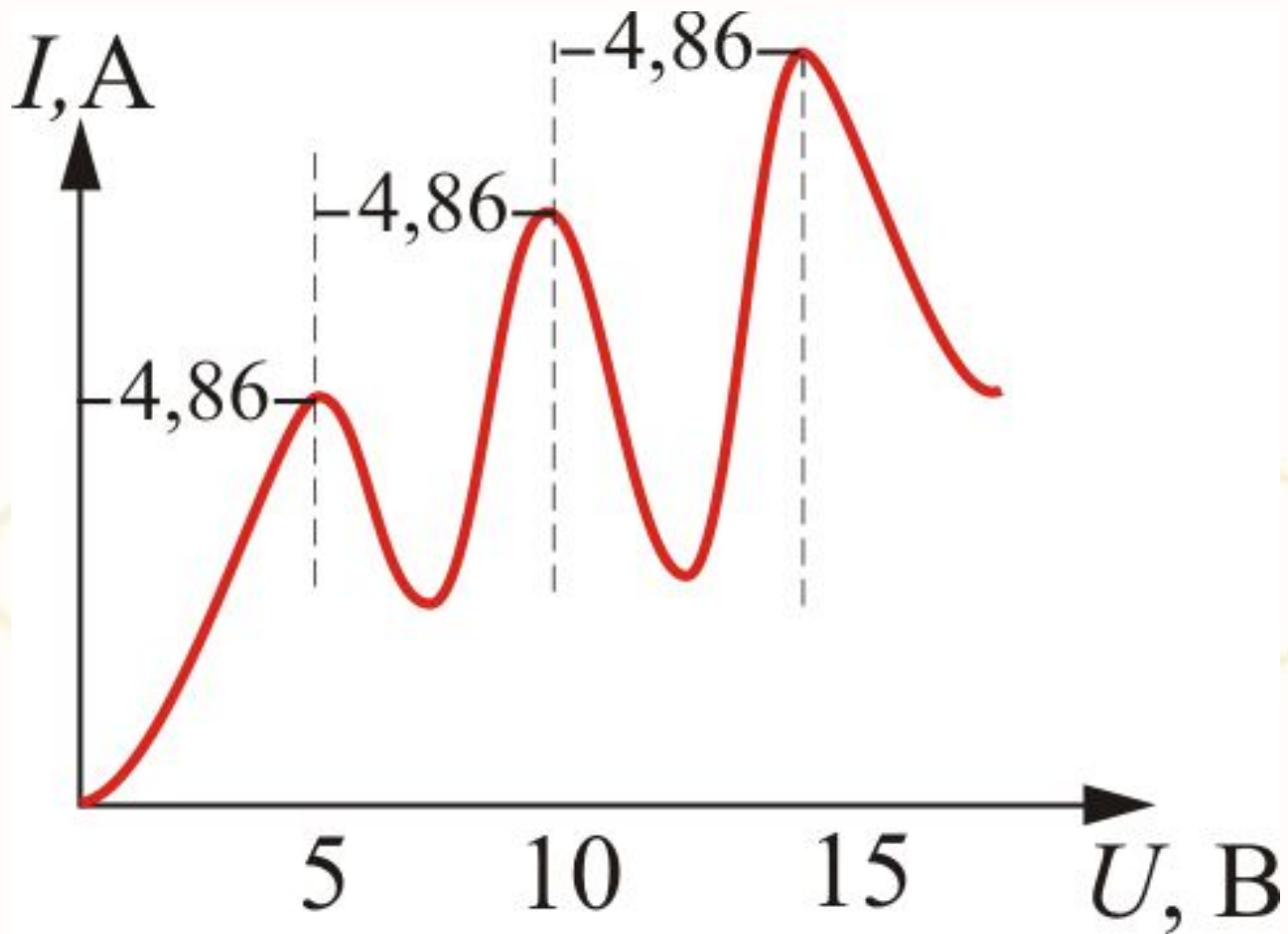
Электронны ускорялись разностью потенциалов  $U$  между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно было изменять с помощью потенциометра  $\Pi$ . Между сеткой и анодом тормозящее поле ( $\approx 0,5\text{В}$ ).

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.*

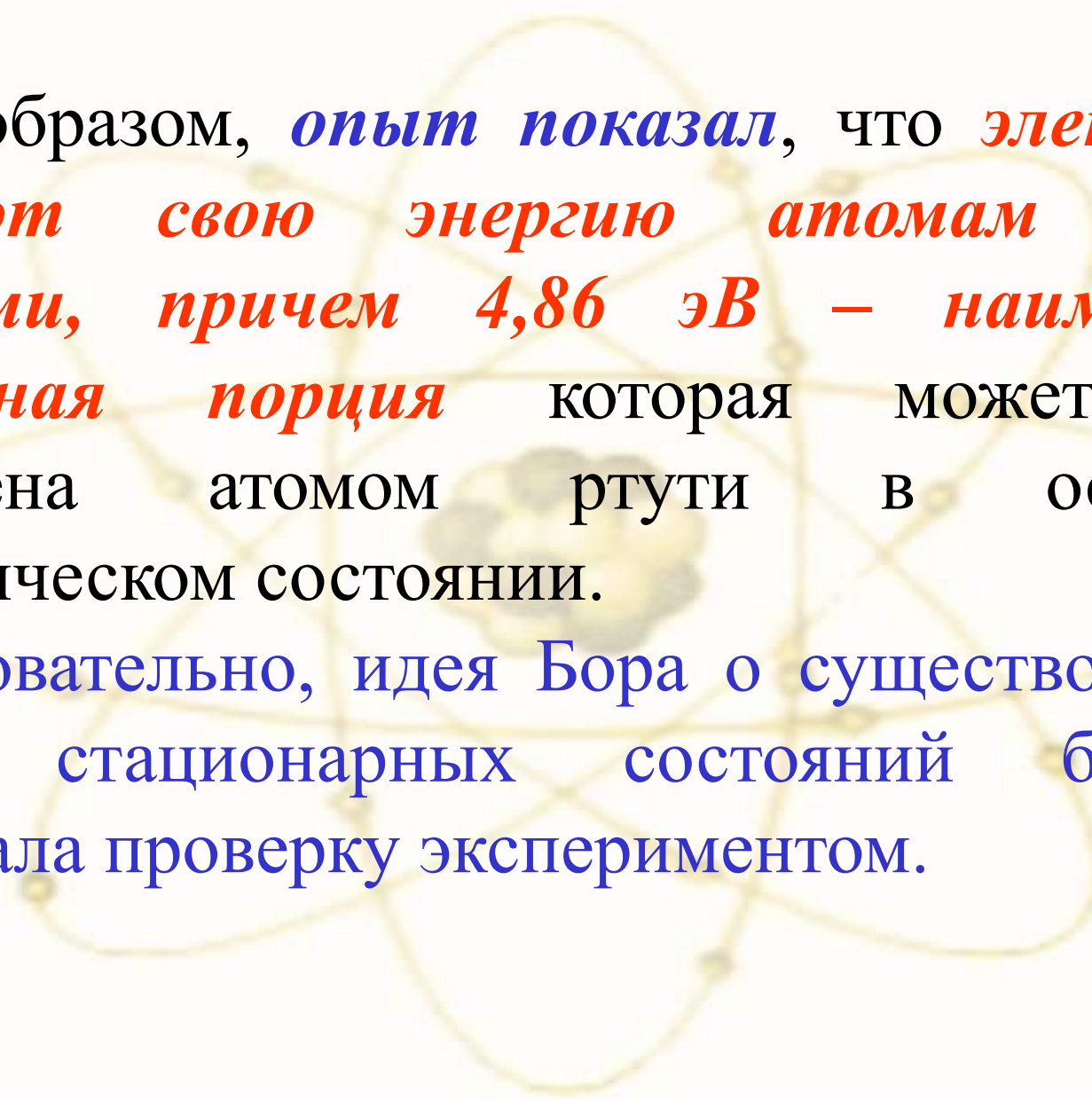
Дальнейшие максимумы наблюдаются при  $2 \cdot 4.86 \text{ В}$  и  $3 \cdot 4.86 \text{ В}$ .

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  $\Delta E$ , 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.