

# Лекция 11. Атом водорода по теории Бора

---

# 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.

Было замечено:

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

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

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

# Закономерности в атомных спектрах

В спектроскопии принято характеризовать спектральные линии не частотой, а величиной, обратной длине волны:

Соотношение получено  
опытным путем  
Бальмером в видимом  
диапазоне для 2  
энергетического  
состояния.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} \longrightarrow \lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{или} \quad \nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где } n = 3, 4, 5, \dots$$

$$R' = 1,09 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$$

$$R = R'c = 3,29 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

} постоянные Ридберга

# Закономерности в атомных спектрах



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

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, 4, \dots \quad \text{Серия Лаймона}$$

$$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, 6, \dots \quad \text{Серия Пашена}$$

$$\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 5, 6, 7, \dots \quad \text{Серия Брэкета}$$

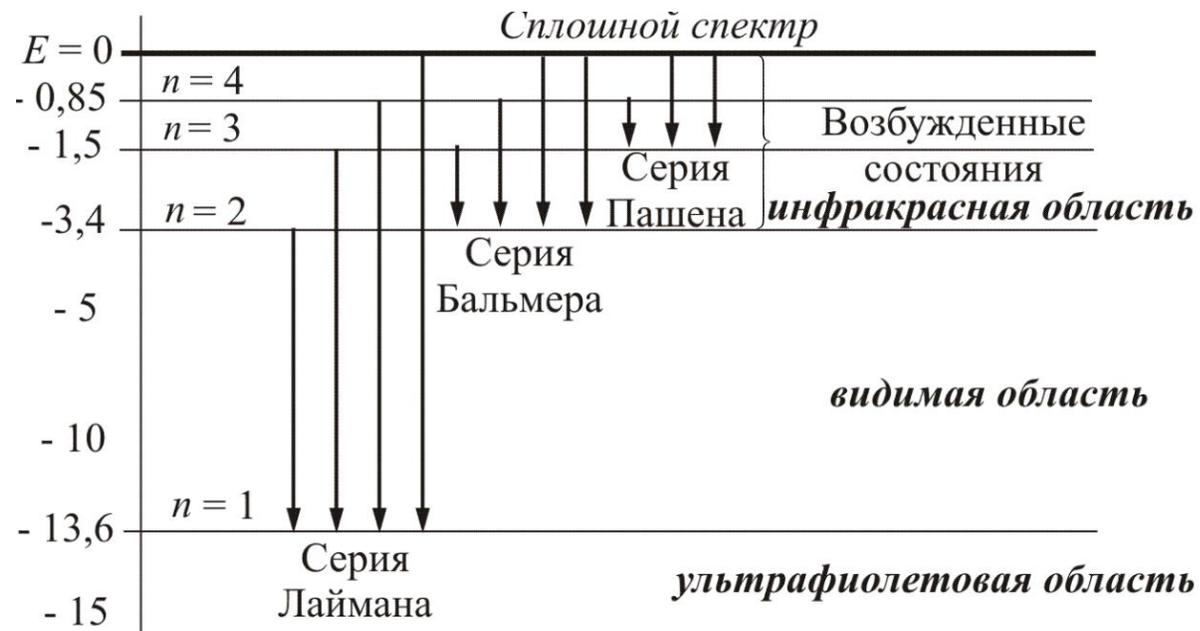
$$\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 6, 7, 8, \dots \quad \text{Серия Пфунда}$$

# Закономерности в атомных спектрах

Обобщенная формула Й. Бальмера:

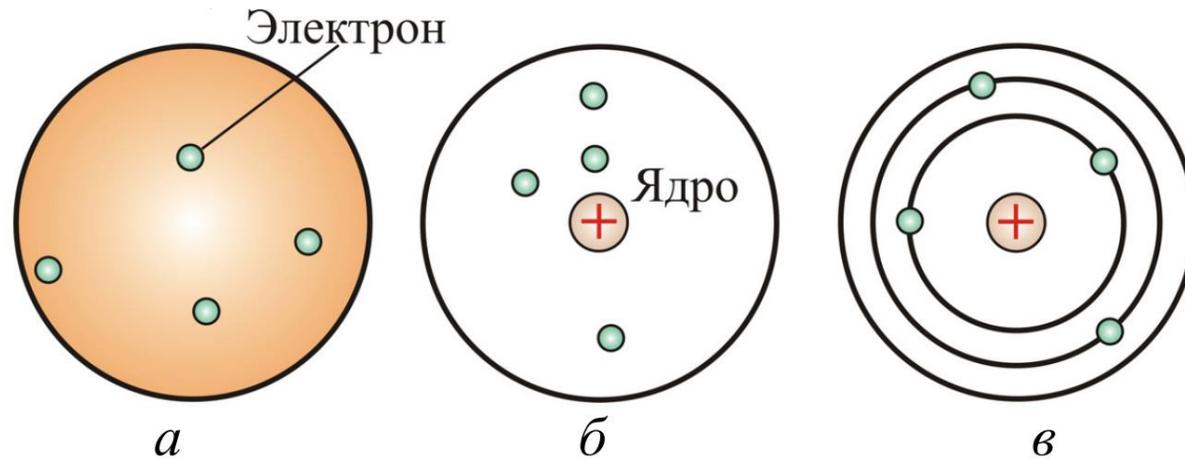
$$\nu = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{или} \quad \frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

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



# Закономерности в атомных спектрах

В конце XIX века учеными рассматривались многие модели атомов



# Ядерная модель атома (модель Резерфорда)



В конце XIX века учеными рассматривались многие модели атомов

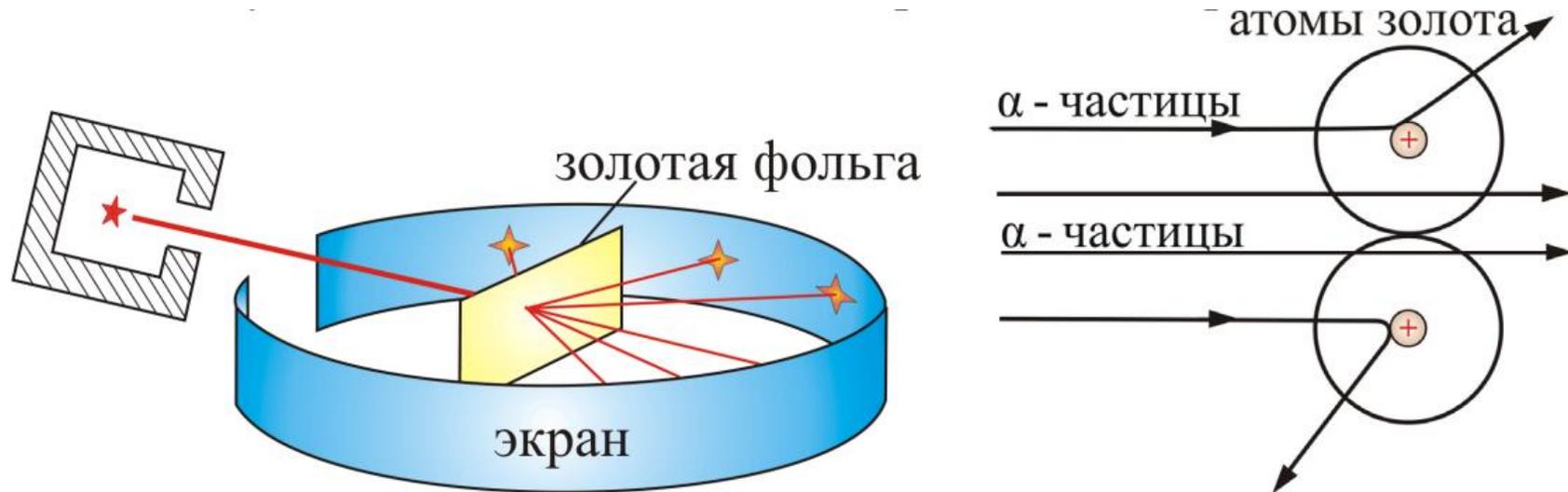
Резерфорд и его сотрудники наблюдали прохождение  $\alpha$ -частиц через тонкую золотую фольгу.

Скорость  $\alpha$ -частиц  $10^7$  м/с.

Экспериментальная установка позволяла наблюдать  $\alpha$ -частицы, отклоненные золотой фольгой под разными углами. В то время было известно, что  $\alpha$ -частица имеет положительный заряд, равный  $+2e$ .

# Ядерная модель атома (модель Резерфорда)

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



Рассеянные частицы ударялись об экран, покрытый ZnS, и вызываемые им вспышки света, **сцинтилляции**, наблюдались в микроскопе. Весь прибор помещался в вакуум, чтобы  $\alpha$ -частицы не рассеивались при столкновении с молекулами воздуха.

Т.е. можно было всегда измерить угол отклонения.

# Ядерная модель атома (модель Резерфорда)



В опыте 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. А малая вероятность отклонения на большие углы говорила, что эта положительная частица имеет малые размеры, порядка  $10^{-14}$  м.

**Электроны, по мнению Резерфорда, движутся вокруг ядра.**

Такая модель противоречила классической электродинамике!

т.к. электрон, двигаясь по окружности, т.е. с нормальным ускорением, должен был излучать энергию, следовательно, замедлять скорость и падать на ядро.

# Ядерная модель атома (модель Резерфорда)



Согласно классической теории, должны иметь место:

- непрерывная потеря электроном энергии в виде излучения электромагнитных волн и неустойчивость атома;
- существование только непрерывного спектра спектральных линий не должно быть.

В действительности оказывается, что:

- атом является устойчивой системой;
- атом излучает энергию лишь при определенных условиях;
- излучение атома имеет линейчатый спектр, связанный со строением и свойствами его электронной оболочки.

# Ядерная модель атома (модель Резерфорда)



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

**Нуклоны** — частицы, являющиеся основными составляющими атомного ядра. К нуклонам относятся только протоны и нейтроны.

Если электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U$  «нацелен» в край ядра, имеющего заряд  $Ze$  и радиус  $R$ , то, согласно классической механике, его угол отклонения определяется соотношением

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = k_0 \frac{Ze^2}{RpU}.$$

# Элементарная теория Бора



Нильс Бор получил Нобелевскую премию в 1922 году.

## 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 света ( $h\nu$ ) 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:  $h\nu = E_n - E_k$ .

# Элементарная теория Бора



Изменение энергии атома, связанное с излучением при поглощении фотона, пропорционально частоте  $\nu$ :

$$\nu = \frac{E_n}{h} - \frac{E_k}{h} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{E_n}{\hbar} - \frac{E_k}{\hbar}$$

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

$$m_e \nu r = n\hbar, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots - \text{ главное квантовое число.}$$

# Элементарная теория Бора

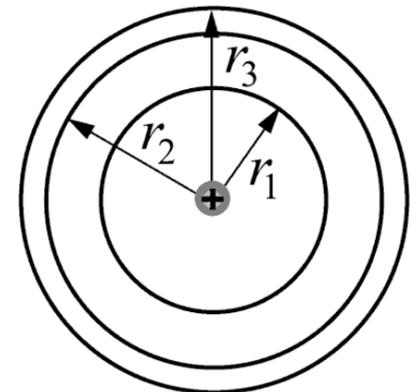
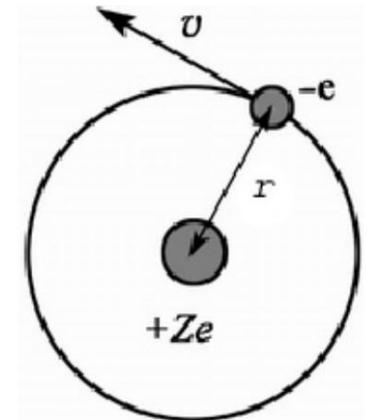
Получим выражение для энергии электрона в атоме. Рассмотрим электрон, движущийся со скоростью  $u$  в поле атомного ядра с зарядом  $Ze$  (при  $Z = 1$  – атом водорода).

Уравнение движения электрона имеет вид:  $m_e \frac{v^2}{r} = k_0 \frac{Ze^2}{r^2}$ .

Центробежная сила равна кулоновской силе, где  $k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ .

Подставив значение скорости из  $m_e v r = n\hbar$ , в  $\frac{m_e v^2}{r} = k_0 \frac{Ze^2}{r^2}$ , получим выражение для радиусов стационарных орбит

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{k_0 m_e Z e^2}.$$



# Элементарная теория Бора

---

Радиус первой орбиты водородного атома называют **боровским радиусом**. При  $n = 1$ ,  $Z = 1$  для водорода имеем:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{k_0 m_e e^2} = 0,529 \text{ \AA} = 0,529 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Внутренняя энергия атома складывается из кинетической энергии электрона (ядро неподвижно) и потенциальной энергией взаимодействия электрона с ядром:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{k_0 r}.$$

Из уравнения движения электрона следует, что  $\frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{k_0 2r}$ .

т.е. кинетическая энергия равна потенциальной. Тогда можно записать:  $E_n = -\frac{1}{2} k_0 \frac{Ze^2}{r_1}$ .

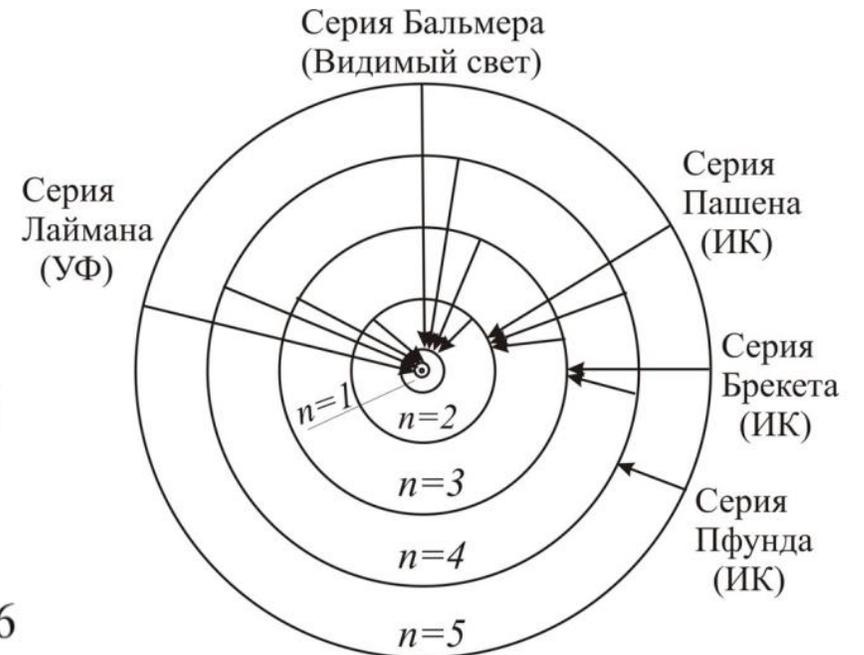
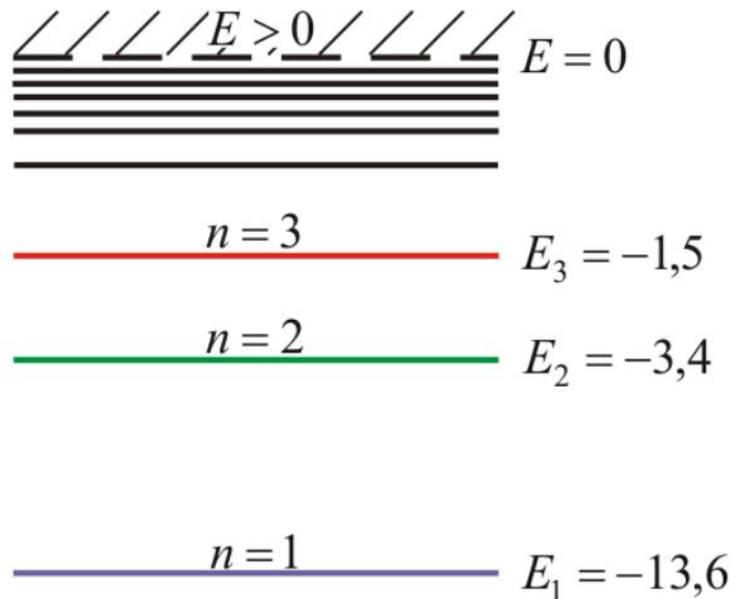
# Элементарная теория Бора

Подставим в  $E_n = -\frac{1}{2}k_0 \frac{Ze^2}{r_1}$  выражение для радиуса первой орбиты и получим:

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

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

Схема энергетических уровней, определяемых уравнением



# Элементарная теория Бора

---

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

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

Частота излучения:

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

Получена обобщенная формула Бальмера, которая хорошо согласуется с экспериментом.

Выражение перед скобками, как уже было сказано, носит название постоянной Ридберга:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

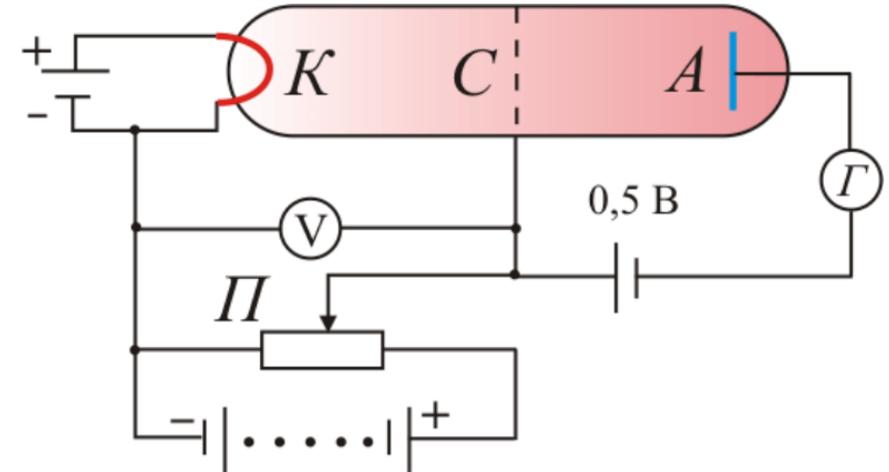
# Опыт Франка и Герца

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

В опытах использовалась трубка, заполненная парами ртути при давлении  $p \approx 1$  мм рт. ст. и три электрода: катод, сетка и анод.

Электроны ускорялись разностью потенциалов  $U$  между катодом и сеткой. Эту разность потенциалов можно было изменять с помощью потенциометра  $\Pi$ .

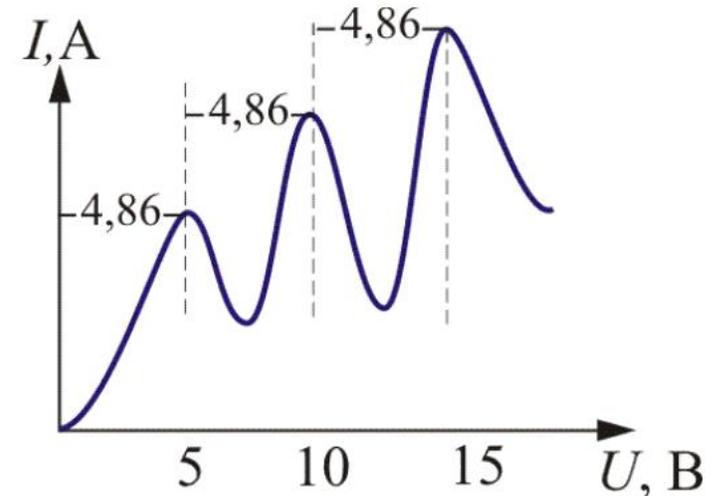
Определялась зависимость тока через гальванометр  $\Gamma$  от разности потенциалов между катодом и сеткой  $U$ .



# Опыт Франка и Герца

Согласно боровской теории, каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя в одно из возбужденных состояний.

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.



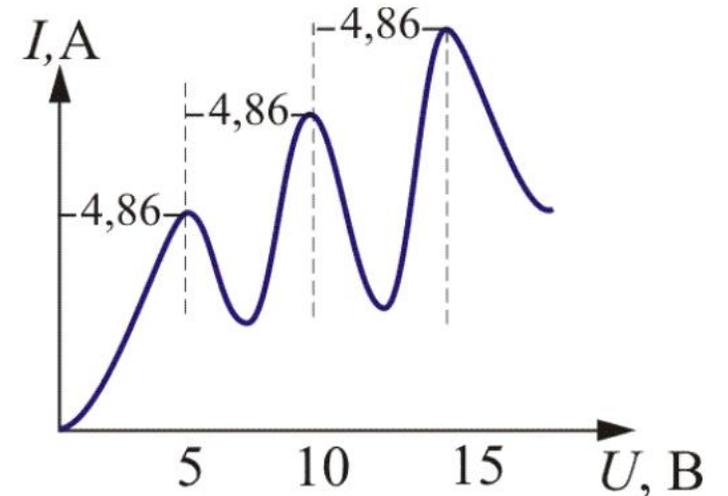
$U=4,86$  В – соответствует первому потенциалу возбуждения.

# Опыт Франка и Герца

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. При этом они полностью теряют свою энергию и не достигают анода, т.е. наблюдается резкое падение анодного тока.

Электроны передают свою энергию атомам ртути порциями, причем 4,86 эВ – наименьшая возможная порция, которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии.

Теория Бора подтверждается экспериментом.



$U=4,86$  В – соответствует первому потенциалу возбуждения.

# Опыт Франка и Герца

---

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

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}.$$

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

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

Атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,86 эВ, являются источником ультрафиолетового излучения с  $\lambda \approx 255 \text{ нм}$ ! Подтверждено экспериментально!

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