

***Атом водорода.
Теория атома водорода
по Бору***

Лекция 13-14

***Постникова Екатерина Ивановна,
доцент кафедры экспериментальной физики***

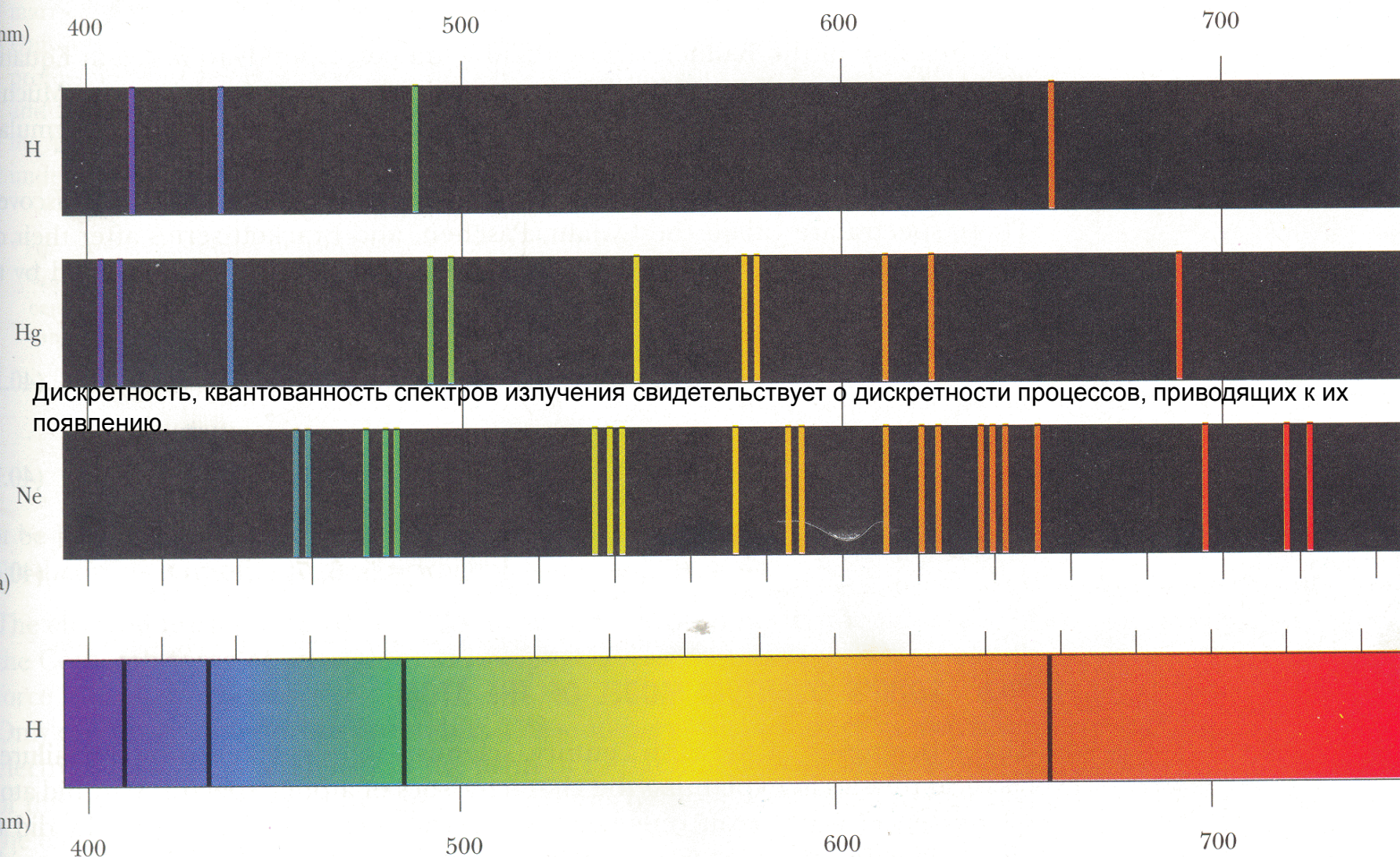


Итак, что же такое атом?

Атом – наименьшая частица химического элемента.
«атомос» -неразложимый (Демокрит, Эпикур,
Лукреций).

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.*

Прежде всего было замечено, что 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.

Атом водорода – простейшая атомная система, содержащая 1 электрон.

Водородоподобные ионы содержат 1 электрон: He^+ ; Li^{2+} ; Be^{3+} .

Спектр излучения водорода (спектр излучения разряженного газа – спектр излучения отдельных атомов): линейчатый (дискретный) описывается **формулой Бальмера**

$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$


$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга,

$m = 1, 2, 3 \dots,$

$n = (m + 1), (m + 2) \dots$

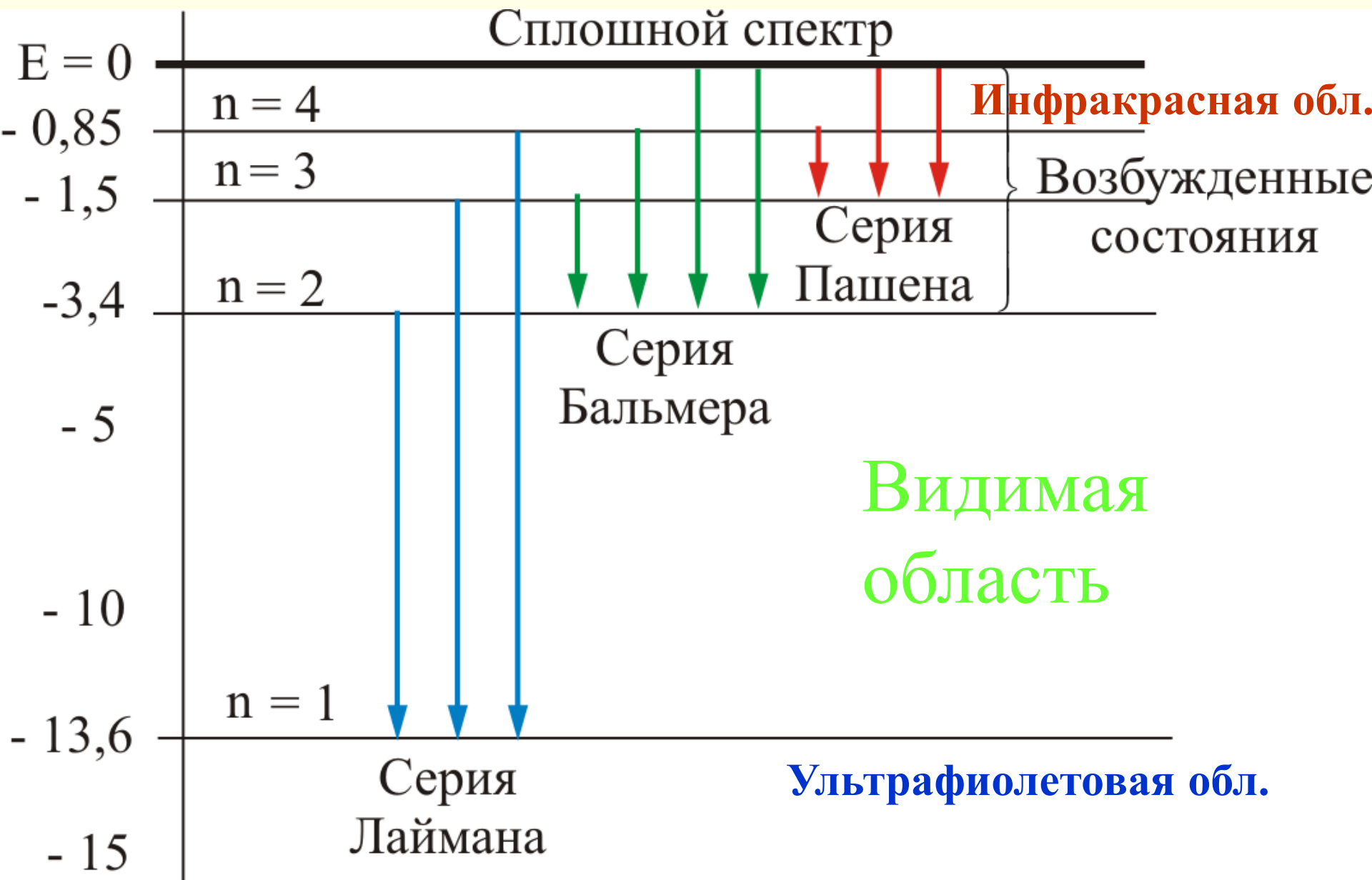
ИЛИ

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

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

$$R = R' \cdot c.$$

Атом сложная система, имеющая сложный спектр



$m = const$ определяет **серию** – группу линий с одинаковым m , при этом n принимает несколько значений.

$m = 1$ – серия Лаймана (ультрафиолетовая область),

$m = 2$ – серия Бальмера (видимая область, $\nu_B < \nu_D$),

$m = 3$ – серия Пашена (инфракрасная область).

Для водородоподобных ионов: **формула Бальмера-Ридберга**

$$\nu_{nm} = Z^2 \cdot R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad Z - \text{порядковый номер элемента.}$$

Для каждого значения m , т.е. для каждой серии при $n = \infty$ есть ν_{\max} –

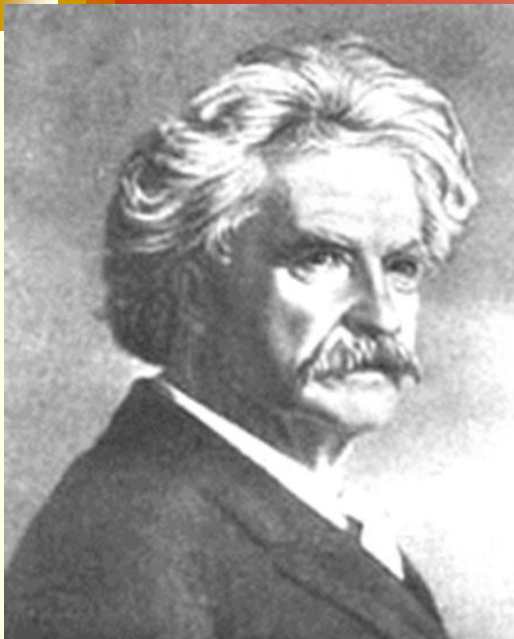
граница серии или **терм**:

$$\nu_{\max} = T_m = \frac{Z^2 R}{m^2}.$$

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

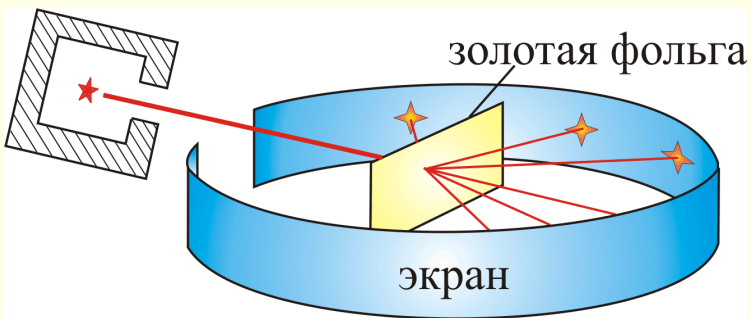
Модели атомов по классической физике

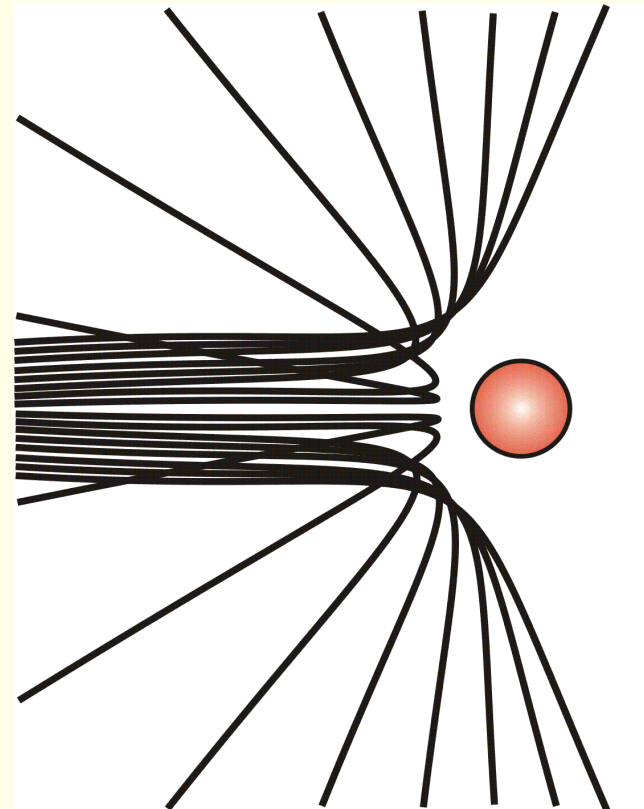
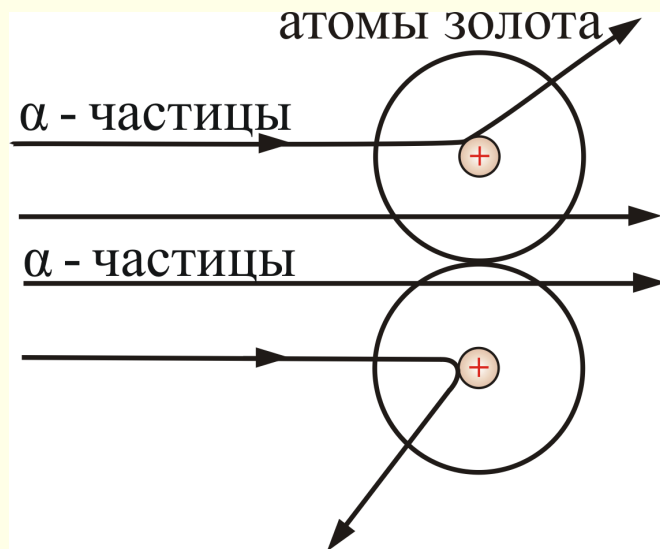
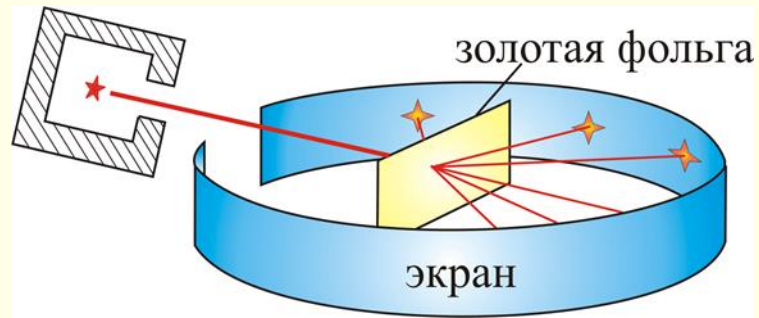
- **Томсон:** модель атома – равномерно положительно заряженная сфера диаметром порядка 10^{-10} м, в которой находятся электроны. Электроны колеблются, следовательно, атом излучает электромагнитные волны. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду сферы, поэтому атом в целом нейтрален.



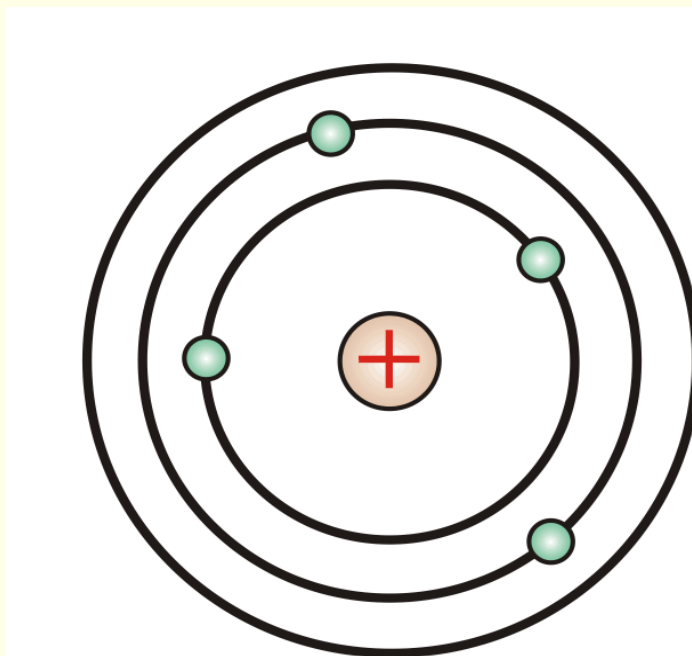
Резерфорд Эрнест (1871–1937) – английский физик.


Резерфорд проверил модель Томсона, облучал тонкую золотую фольгу α - частицами. По Томсону α - частицы не должны проходить фольгу, т.к. атомы заполняют всё пространство фольги. Однако α - частицы проходили фольгу, рассеивались и даже отражались назад. Поэтому Резерфорд предложил другую модель атома.





- **Резерфорд:** внутри атома есть положительно заряженное ядро с $q = Ze$, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и размеры которого $\sim 10^{-15}$ м. Вокруг ядра по круговым орбитам движутся электроны – планетарная модель атома.





Модель атома Резерфорда не объясняла:

1. Эксперимент показывал, что атом устойчив. По Резерфорду электрон движется ускоренно по орбите и должен излучать электромагнитные волны.

Следовательно, он теряет энергию и должен по спирали приближаться к ядру, т.е. не устойчив.

2. Излучение атома по Резерфорду должно быть непрерывным, эксперимент показывал, что спектр излучения дискретный.

Поэтому потребовалось создать *квантовую теорию атома*.

- **Бор:** объяснил ядерную модель атома Резерфорда, линейчатый спектр излучения атома и квантовый характер излучения и поглощения света.



БОР Нильс Хендрик Давид
(1885–1962)

В основу теории положены 3 ***постулата Бора*** (в некоторых книгах I и II постулаты объединяются).



I постулат (постулат стационарных состояний):

В атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает энергии; эти состояния характеризуются определенными дискретными значениями энергии.

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

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса

$$L_n = m \underbrace{v_n}_{p_n} \cdot r_n = n \hbar,$$

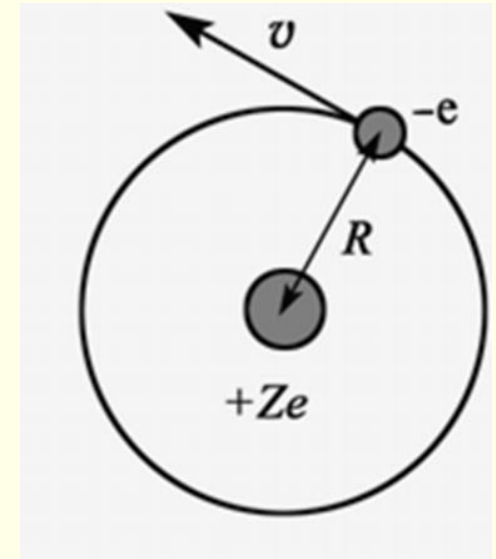
m – масса электрона,

v_n – скорость электрона на n орбите,

r_n – радиус орбиты,

$n = 1, 2, 3 \dots$ – квантовое число,

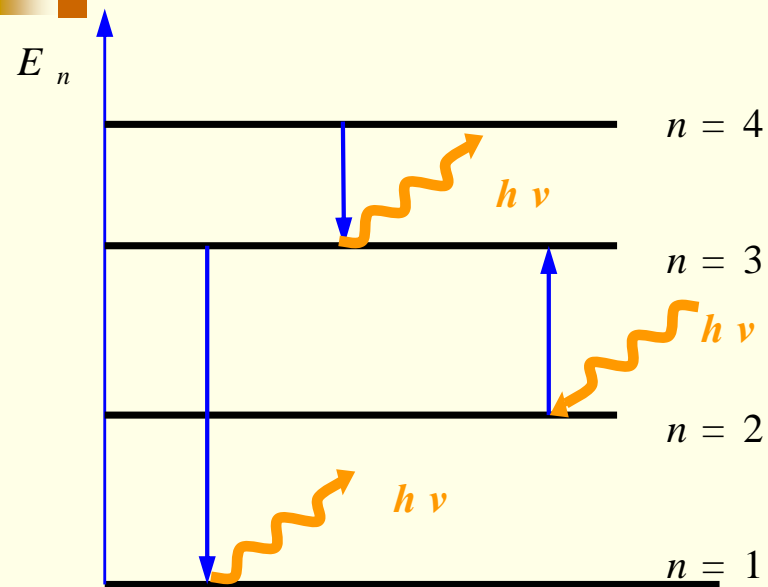
$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).



II постулат (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один квант энергии в виде фотона

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

E_n, E_m – энергия атома в стационарном состоянии.



- Если $E_n > E_m$:

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

излучение фотона при переходе электрона с более удалённой от ядра орбиты на близлежащую.

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

поглощение фотона при переходе электрона в состояние с большей энергией, т.е. переход электрона на более удалённую от ядра орбиту

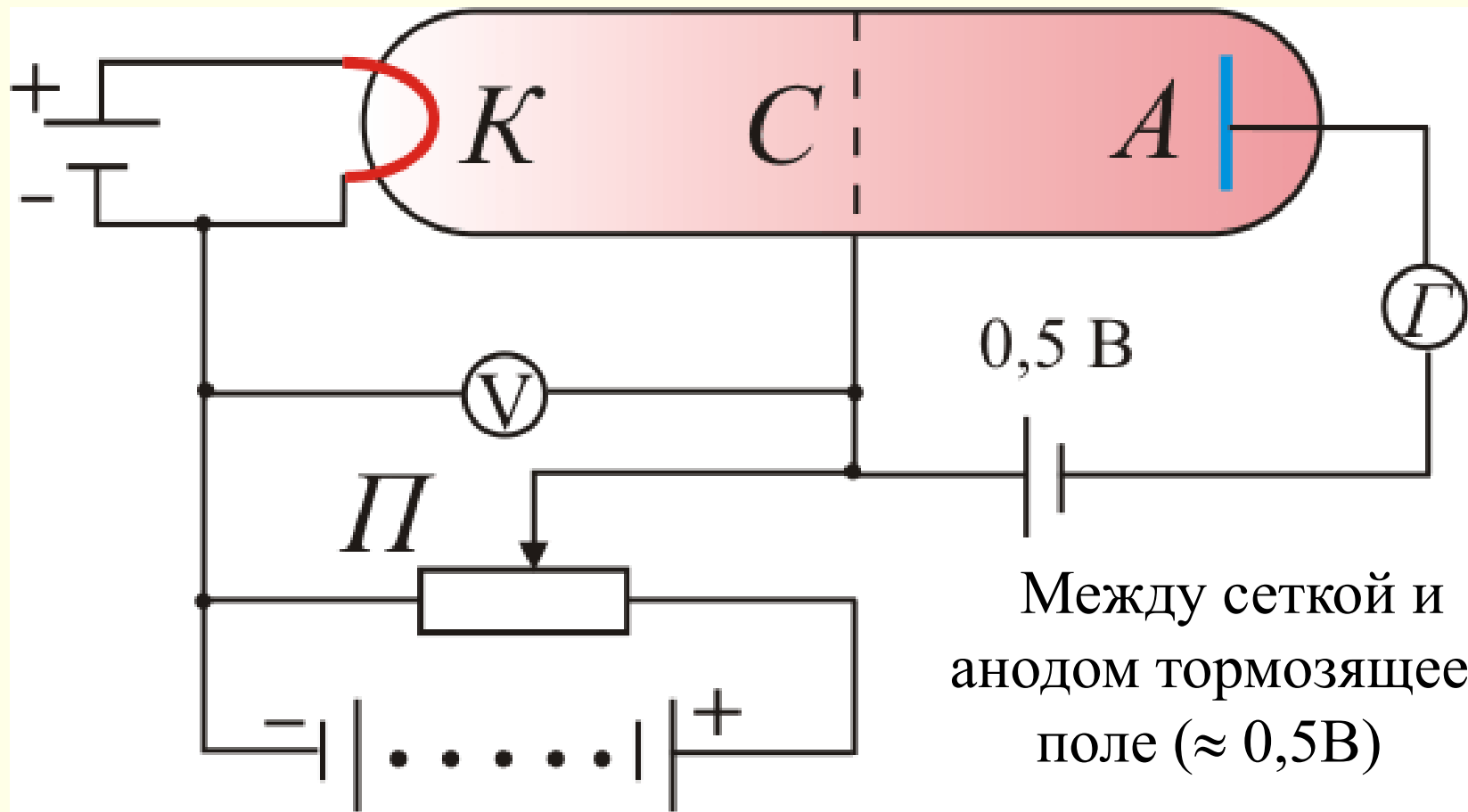
Набор дискретных частот ν_{nm} и определяет линейчатый спектр атома водорода.

Опыт Франка и Герца.

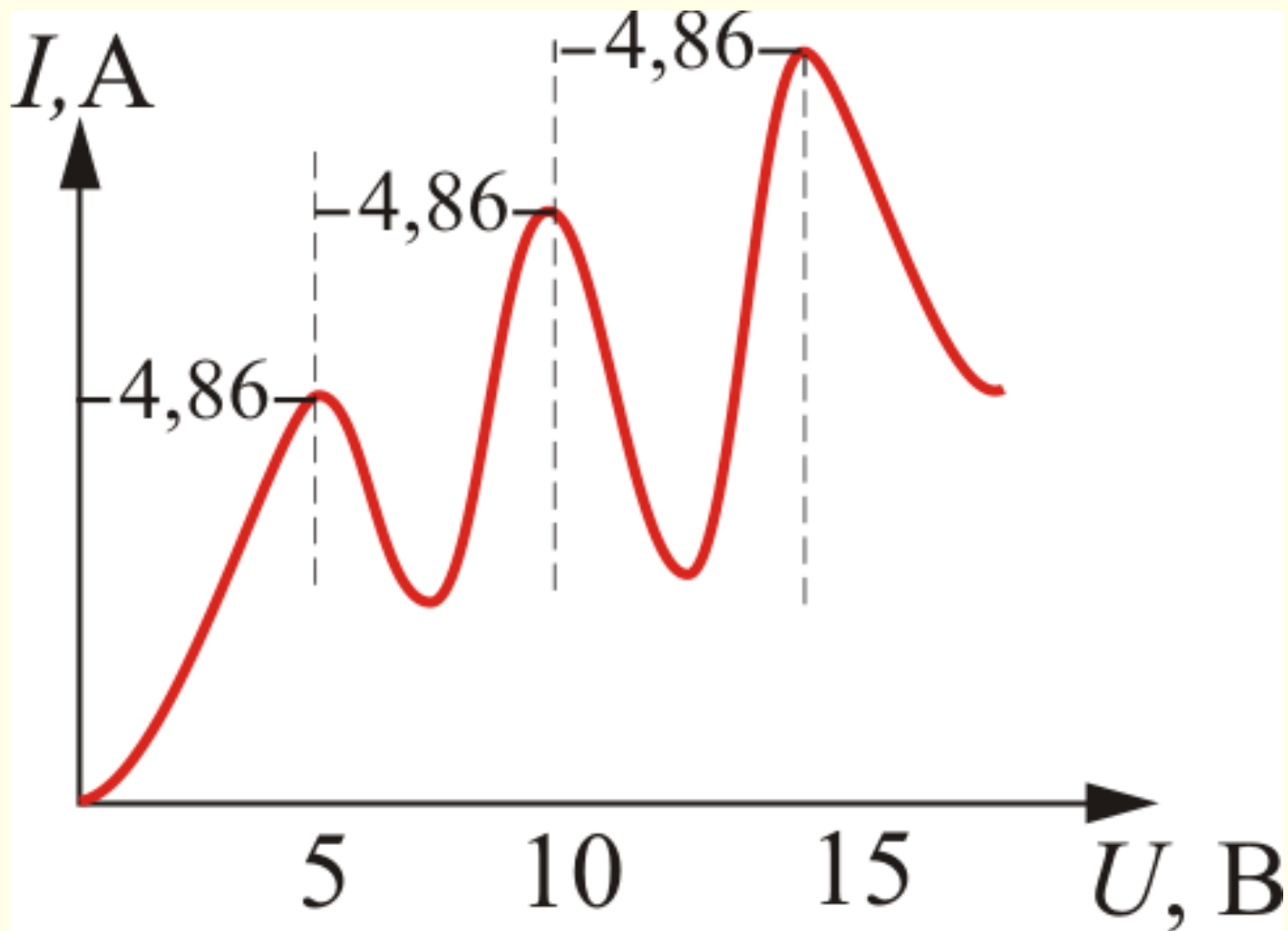
Существование дискретных энергетических уровней атома и доказательство правильности теории Бора подтверждается опытом Франка и Герца.

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

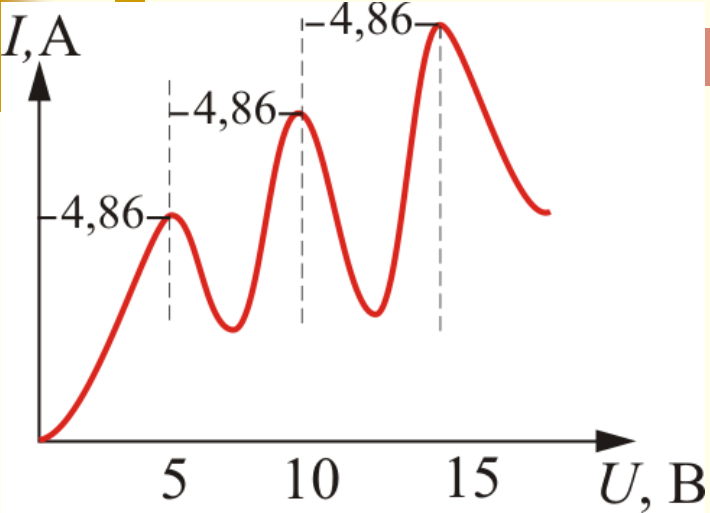
В трубке, заполненной парами ртути при давлении $p \approx 1$ мм рт. ст., три электрода, катод – сетка – анод. Электроны ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой.



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



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



- С ростом U ток I в цепи растёт. При $U < 4,9$ В электрон испытывает при встрече с атомом ртути только упругое соударение.

- При $e \cdot \varphi = 4,9$ эВ (4,9 эВ – первое возбуждённое состояние атома ртути) электрон при встрече с атомом ртути отдаёт ему всю свою кинетическую энергию.

При этом один электрон атома ртути переходит из основного состояния в возбуждённое, т.е. на следующий энергетический уровень. Следовательно, удар неупругий и электрон, потерявший свою кинетическую энергию, не может преодолеть тормозящее электрическое поле сетки и ток I в цепи падает.

Атом ртути, возвращаясь из возбуждённого состояния в основное, испускает квант $h\nu$ (ультрафиолетовое излучение с $\lambda \approx 255$ нм), что подтверждает I постулат Бора.

Атом водорода: $Z = 1$, для первой орбиты $n = 1$:
 $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $E_1 = 13,6 \text{ эВ}$.

По II постулату Бора при переходе атома водорода из стационарного состояния n в стационарное состояние m с меньшей энергией, т.е. при переходе электрона с n орбиты на m орбиту, испускается квант с частотой

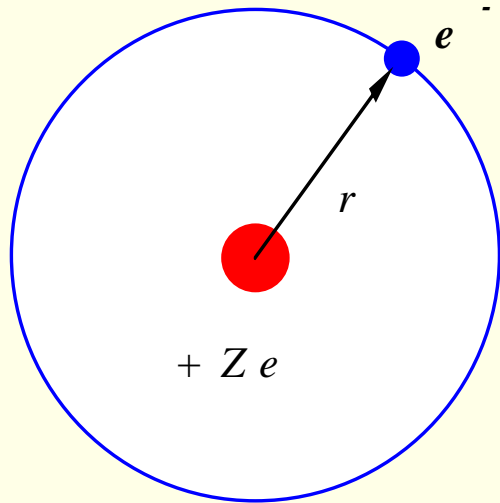
$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h} = \underbrace{\frac{me^4}{8h^3\epsilon_0}}_R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) - \text{формула Бальмера-Бора,}$$

$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Недостатки теории Бора.

1. Основывается на квантовых постулатах, но применяются законы классической физики. Следовательно, есть внутреннее противоречие.
2. Не объясняет:
 - интенсивность спектральных линий,
 - причину совершения тех или иных переходов.
3. Не описывает спектры атома *He* – простейшего атома, следующего за атомом *H*.

Спектры атома водорода по Бору



Водородоподобная система.
Движение электрона по орбите происходит под действием центростремительной силы.

$$F_{ц.с} = F_{Кулон} \Rightarrow \frac{m v^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \Rightarrow$$

Радиус орбиты:

$$r = \frac{m v^2 4\pi\epsilon_0 r^2}{Ze^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 m^2 v^2 r^2}{mZe^2} \cdot \underbrace{\frac{L_n^2}{m^2 v^2 r^2}}_{1}$$

Учитывая правило квантования орбит:

$$L_n = m v_n \cdot r_n = n \hbar.$$

Получим радиус n -ой стационарной орбиты:

$$r_n = \frac{4 \pi \varepsilon_0 \hbar^2}{m Z e^2} \cdot n^2.$$

Полная энергия электрона равна сумме его кинетической энергии и потенциальной энергии в электростатическом поле ядра:

$$E = E_{\kappa} + E_p = \frac{m v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \left(m v^2 = r F_{\text{Кулон}} \right) =$$

$$\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} r - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = - \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Для n -ой орбиты: $E_n = - \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r_n} = - \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{mZe^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2} =$

$$\left(4\pi^2 \hbar^2 = h^2 \right) = - \frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2}.$$

- Энергия принимает дискретные значения и зависит от n .
- Знак « $-$ » указывает на то, что энергия электрона внутри атома отрицательная, т.е. электрон находится в связанном состоянии. Вне атома (в свободном состоянии) электрон имеет положительную энергию.

n — **главное квантовое число**, оно определяет:

1. номер орбиты,
2. энергию электрона в поле ядра.

$n = 1$: энергетическое состояние электрона **основное** (невозбуждённое); $E < 0$ и минимальная.

$n > 1$: энергетическое состояние электрона **возбуждённое**.

$n = \infty$: **ионизация атома**, $E_{\max} = 0$, и электрон вылетает из атома.

Энергия ионизации – энергия, которую необходимо потратить на перевод электрона из n – состояния (с r_n орбиты и энергией E_n) в свободное (ионизированное) состояние с $E_{\max} = 0$: $\Delta E = E_{\max} - E_n = 0 - (-E_n) = E_n$.

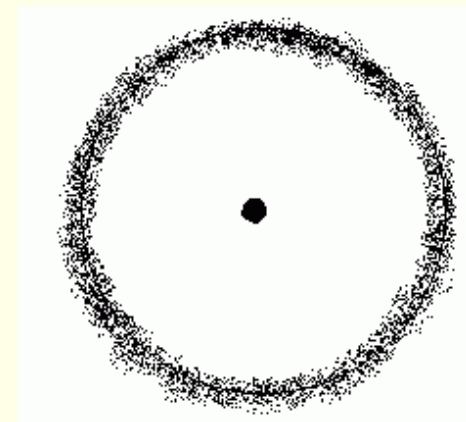
Потенциал ионизации:

$$\varphi_i = \frac{\Delta E}{e} [\text{эВ}] = \frac{me^4}{8h^3 \varepsilon_0^2} h \frac{Z^2}{n^2} \frac{1}{e} = R \frac{Z^2 h}{en^2}.$$

Согласно квантовой механике, не существует определенных круговых орбит электронов, как в теории Бора.

В силу волновой природы электрон «размазан» в пространстве, подобно «облаку» отрицательного заряда.

Электронное облако в основном состоянии водорода сферически-симметрично.

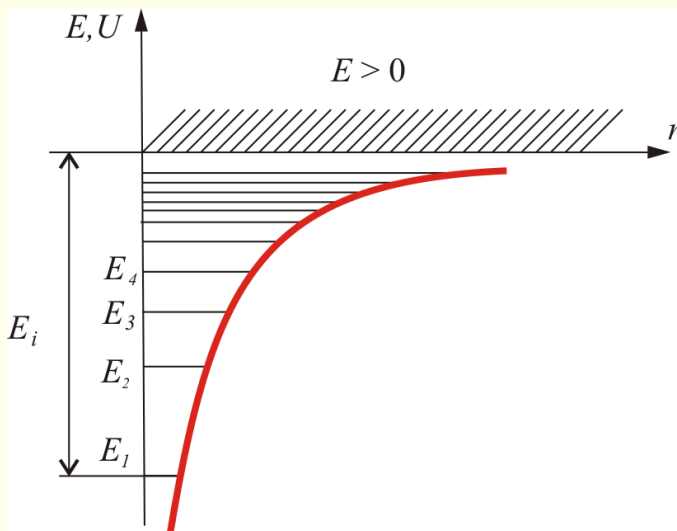


Электронное облако грубо характеризует «размеры» атома, но, поскольку облако может не иметь четко выраженные границы, *атомы также не имеют ни точной границы, ни одного определенного размера.*


Атом водорода в квантовой механике

Электрон в атоме водорода находится в кулоновском поле ядра. Следовательно, для определения энергетических уровней электрона в атоме водорода необходимо решить задачу о движении электрона в кулоновском поле ядра, т.е. решить уравнение Шредингера с потенциальной энергией взаимодействия электрона с ядром:

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$



Ze – заряд ядра для водородоподобных систем (для H_2 $Z = 1$),
 r – расстояние между электроном и ядром.



Уравнение Шредингера:
$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0,$$

m – масса электрона,

E – полная энергия электрона в атоме.

С учётом того, что ψ – функция однозначна, конечна, непрерывна, уравнение Шредингера имеет решение только при собственных значениях энергии:

$$E_n = - \frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

т.е. для дискретного набора отрицательных значений энергии.



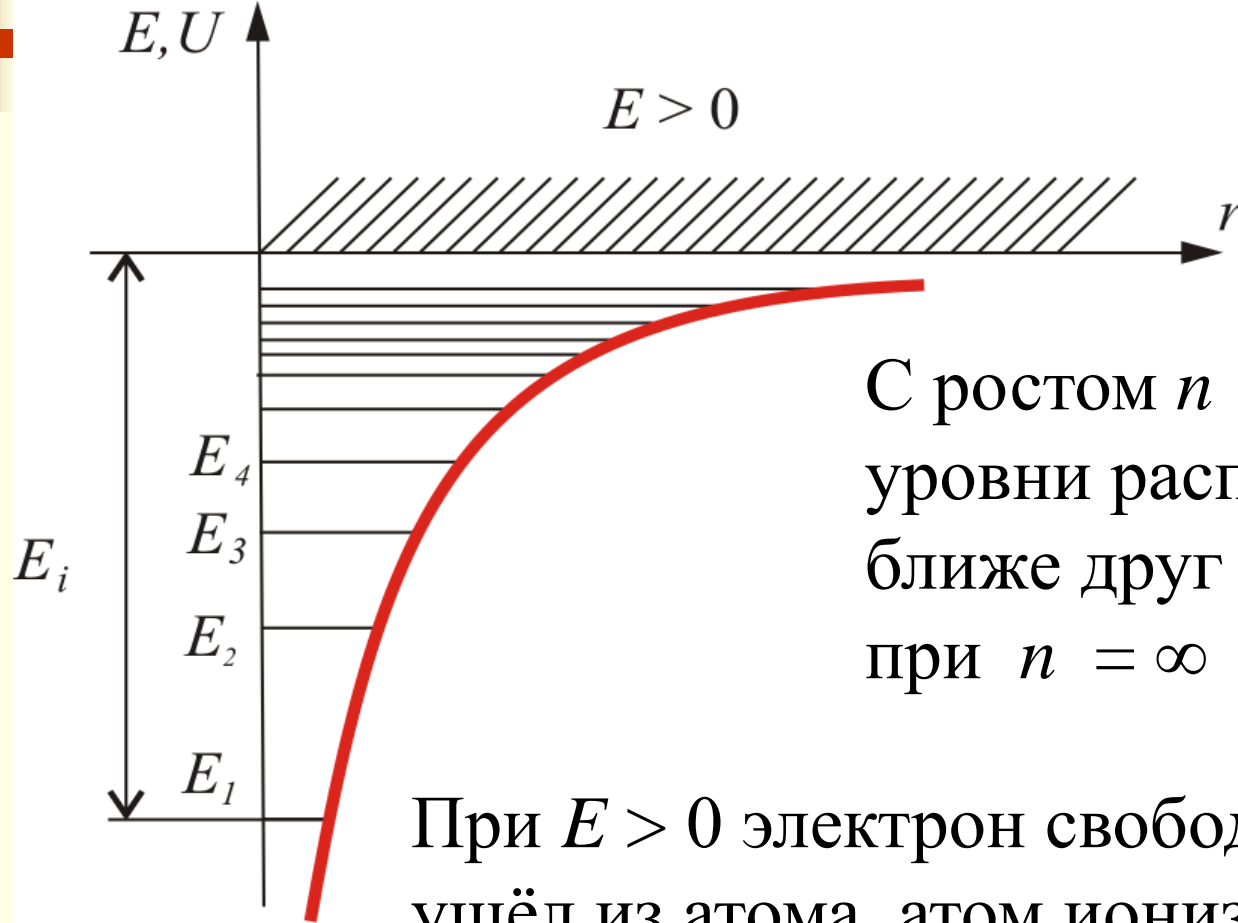
Дискретные энергетические уровни.

E_1 – основной уровень с минимальной энергией.

$E_2, E_3 \dots E_n$ – возбуждённые уровни.

n – главное квантовое число.

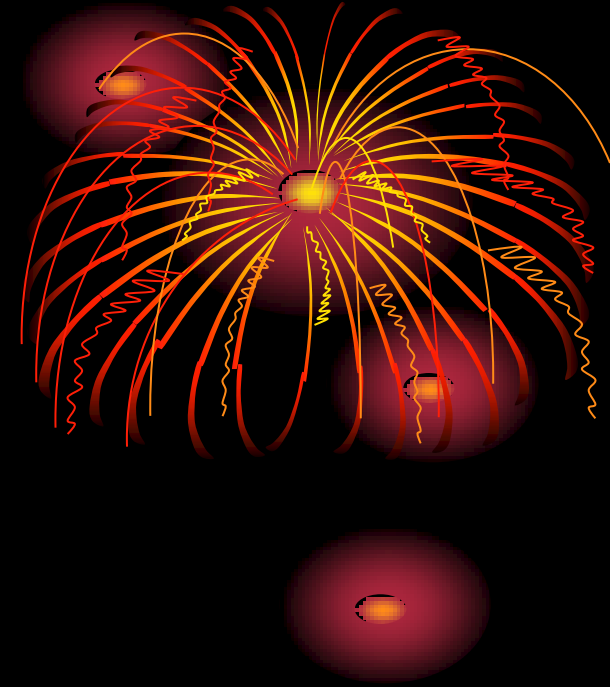
При $E < 0$ движение электрона связанное, он находится внутри гиперболической потенциальной яме.



С ростом n энергетические уровни располагаются ближе друг к другу, при $n = \infty$ $E_{\infty} = 0$.

При $E > 0$ электрон свободный, электрон ушёл из атома, атом ионизовался, спектр непрерывный.

Энергия ионизации атома H_2 :
$$E_i = -E_1 = \frac{me^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} = 13,6 \text{ эВ} .$$



Конец лекции