

Омский государственный технический университет

Кафедра физики

Калистратова Л.Ф.

**Электронные лекции по разделам оптики,
квантовой механики, атомной и ядерной физики**

9 лекций

(18 аудиторных часов)

Лекция 5. Атом водорода. Волновые свойства частиц

План лекции

- 5.1. Исторические модели строения атома.
- 5.2. Теория атома водорода по Бору.
- 5.3. Спектральные серии атома водорода.
- 5.4. Достоинства и недостатки теории Бора.
- 5.5. Волны де Бройля. Волновые свойства частиц.
- 5.6. Опытные доказательства существования волновых свойств частиц.
- 5.7. Соотношение неопределённостей Гейзенберга.

5.1. Исторические модели строения атома

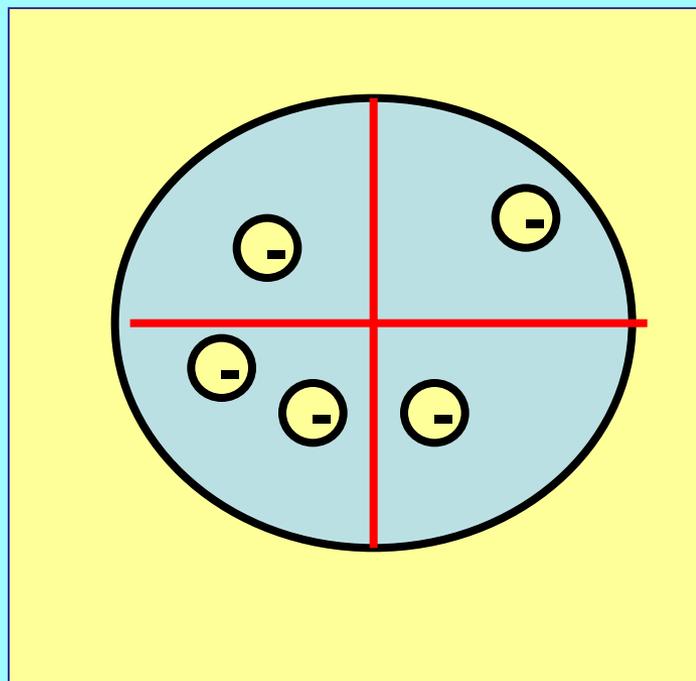
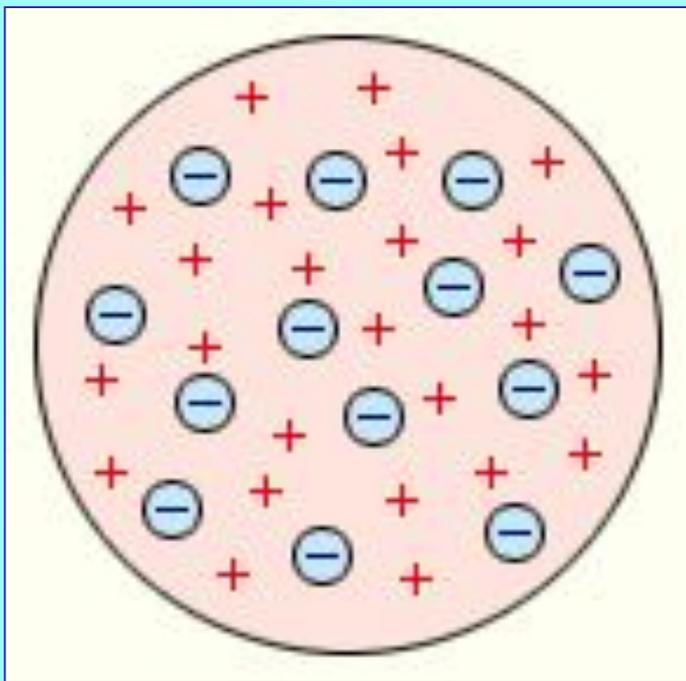
Атом (от греч. atomas – неделимый) – микроскопических размеров часть вещества, являющаяся носителем всех его свойств.

Атом – нейтрален, внутри него находятся электроны.

Модель Томсона (1903 г.) - первая модель атома.

Модель Томсона: атом представляется как положительно заряженный шар, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны.

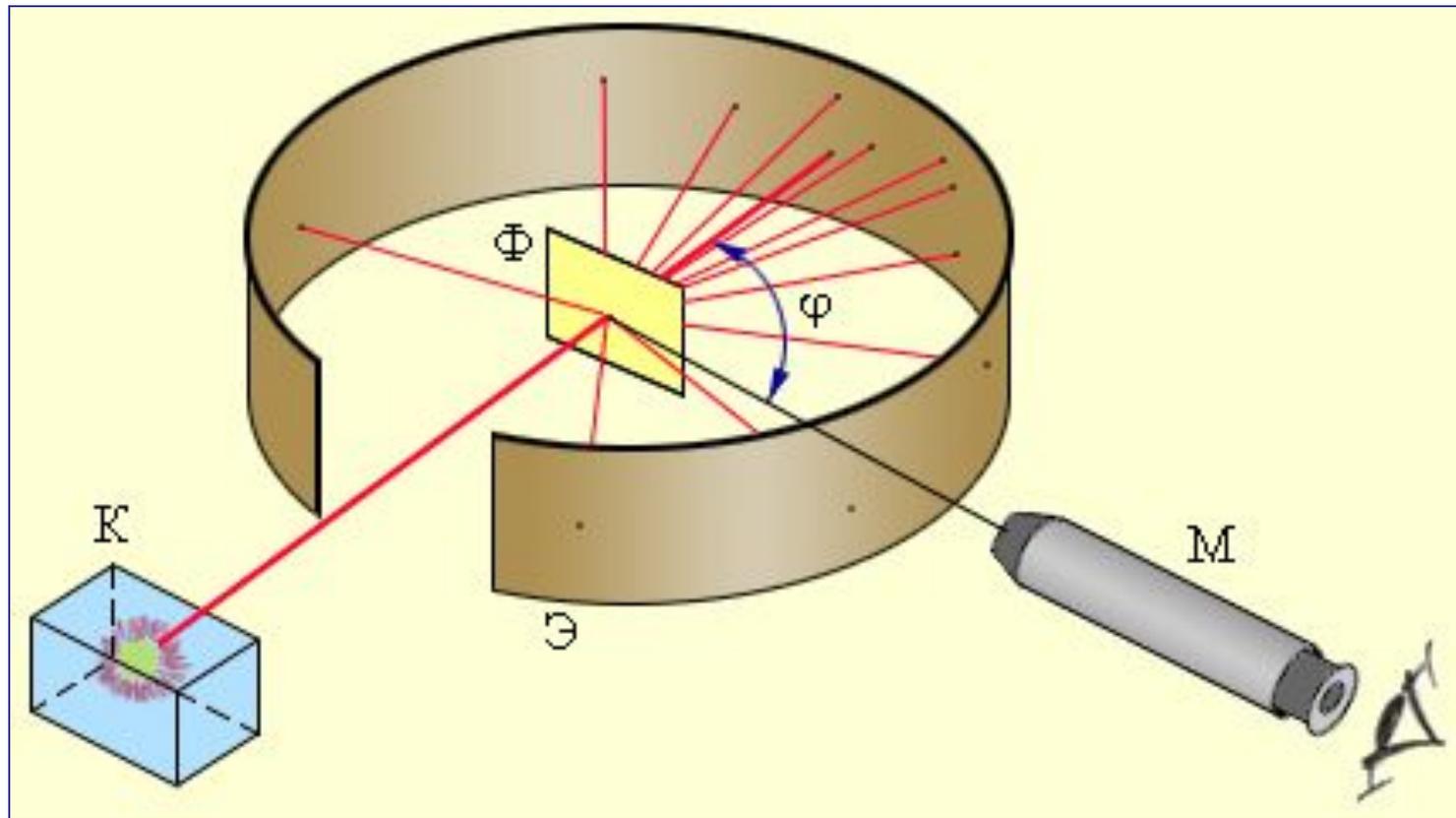
Модель атома Дж. Томсона



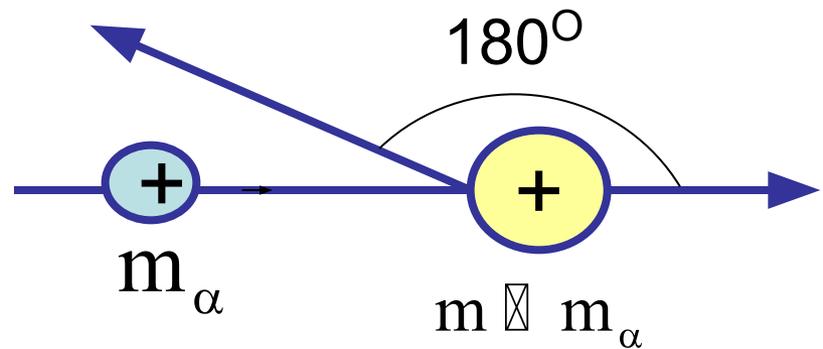
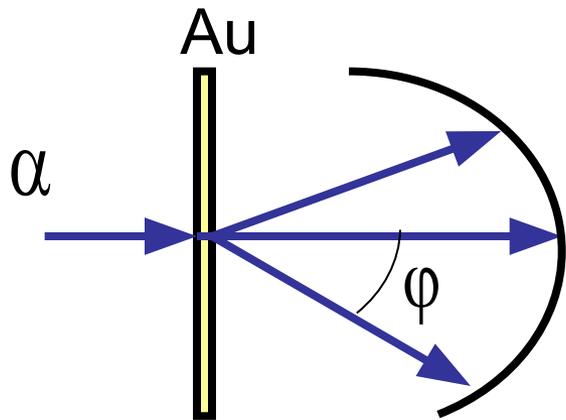
По расчётам Томсона **радиус** шарообразного атома порядка **10^{-10}** м.

Такая модель получила название «изюм в тесте» и имеет только историческое значение.

Опыт Резерфорда по рассеянию α -частиц



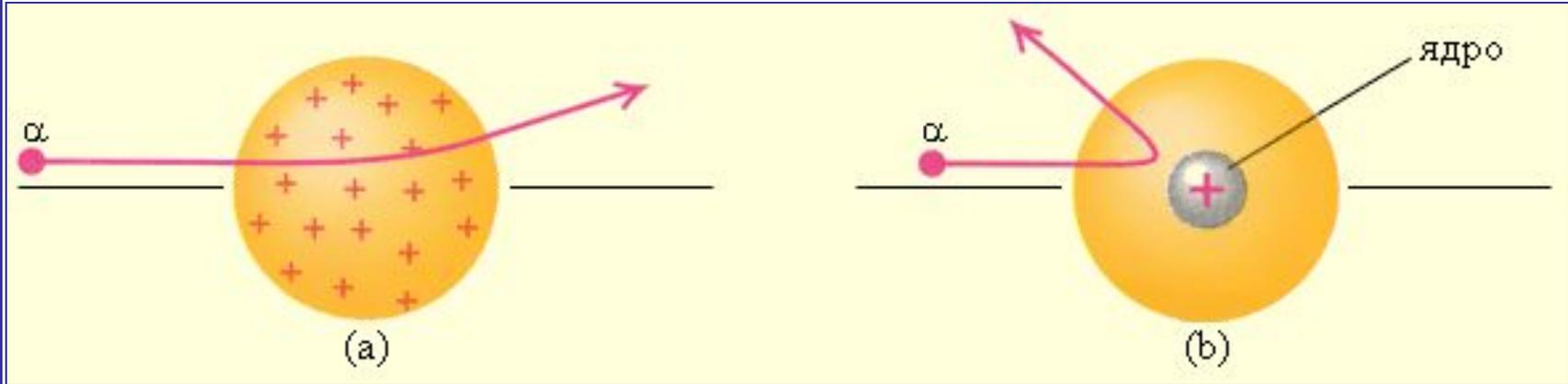
При проведении эксперимента в микроскопе наблюдали и подсчитывали количество вспышек на экране, вызванных α - частицами, рассеянных золотой фольгой под разными углами.



Резерфорд вывел формулу, по которой можно было вычислить количество α - частиц, отклонившихся под конкретным углом φ к первоначальному направлению.

Результаты теории и опыта дали вполне хорошее совпадение.

Рассеяние α -частицы в атоме Томсона (a) и в атоме Резерфорда (b)



Удивительным был результат, что некоторые из них (примерно 1 на 20000 частиц) отклонялись почти на 180° .

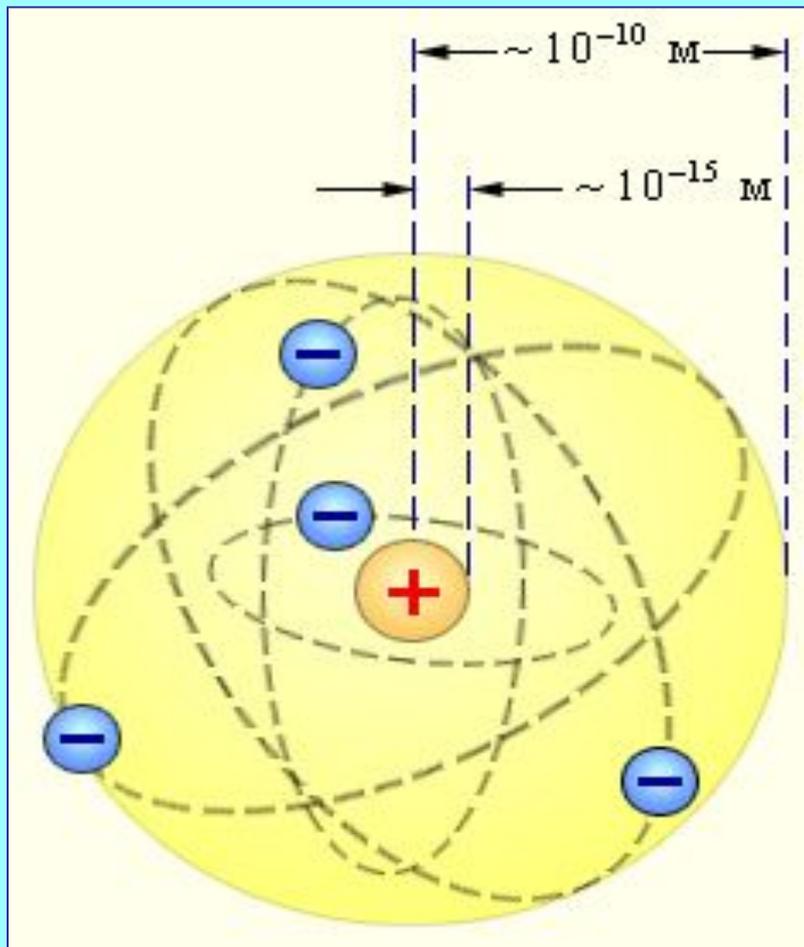
Сильное отклонение положительная по знаку заряда α - частица могла получить только при столкновении с частицей:

- **одноимённого с ней заряда;**
- **значительно большей массы;**
- **примерно одинаковых размеров.**

На основе своих исследований Резерфорд в 1911 г. предложил **планетарную модель атома**:

- атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательных электронов, которые движутся вокруг ядра по круговым орбитам;
- ядро имеет размеры 10^{-15} м, электронная оболочка простирается до расстояний 10^{-10} м;
- электроны движутся по замкнутым траекториям с центростремительным ускорением и испускают электромагнитное излучение любых частот.

Планетарная модель атома Резерфорда



Показаны круговые орбиты четырех электронов

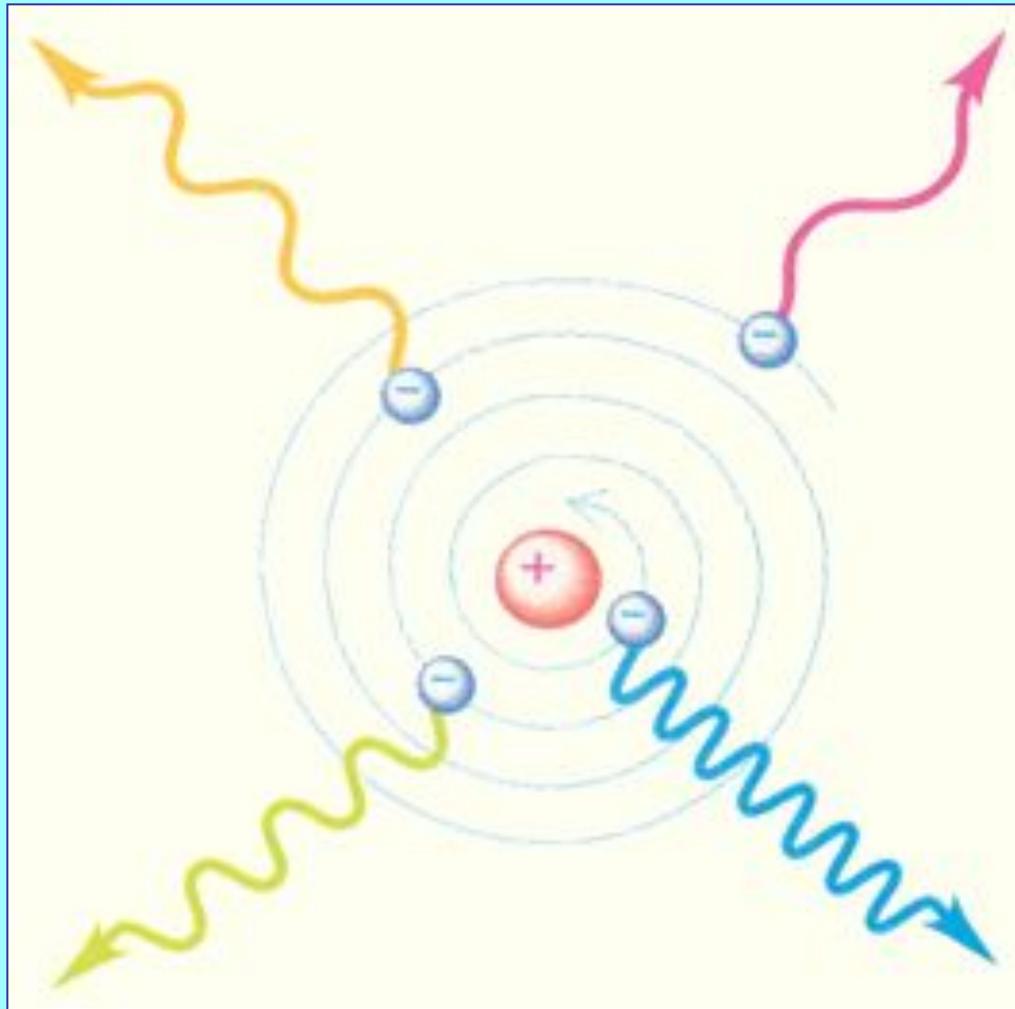
Согласно законам классической электродинамики, **движущиеся с центростремительным ускорением электроны испускают энергию**, а значит их полная энергия должна уменьшаться, что должно привести к уменьшению радиусов орбит.

При достижении электронами ядра произойдёт нейтрализация зарядов и **атом должен исчезнуть**.

Атом – устойчивая система!

Планетарная модель атома по Резерфорду оказалась несостоятельной.

Неустойчивость атома Резерфорда



К этому времени **экспериментально** были изучены спектры излучения многих атомов и определены частоты излучений.

Для **атома водорода** были открыты несколько серий в разное время и разными учёными:

- **серия Лаймана** в ультрафиолетовой области спектра;
- **серия Бальмера** в видимой области спектра;
- **серия Пашена** в инфракрасной области спектра.

Частоты излучений укладывались в простую схему.

Они **определялись как разность** некоторых чисел, названных **спектральными термами**:

$$\nu = T(m) - T(n)$$

Приведённая формула определения частот излучений даже для атома водорода долго **не имела теоретического обоснования**. Преодоление возникших трудностей привело к созданию новой механики – **квантовой**.

В основу квантовой механики положена идея Планка о **квантовании энергии электромагнитного излучения**. Минимальная энергия фотона:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = h\nu = \hbar\omega$$

Беря за основу планетарную модель атома, Н. Бор развивает идею о квантовании других величин, в частности **радиусов электронных орбит и механического момента импульса электрона**.

5.2. Теория атома водорода по Бору

В основу своей теории Н. Бор положил два постулата.

Первый называется **постулатом стационарных орбит.**

Второй постулат касается вопроса **об излучении и поглощении энергии атомом.**



Нильс Бор
1885 -1962

Первый постулат Бора: атомная система может находиться только в особых стационарных (квантовых) состояниях. Каждому стационарному состоянию соответствует определённая энергия E_n .

Вращаясь по стационарной орбите определённого радиуса электрон не меняет своей энергии.

Выбор радиусов стационарных орбит подчиняется условию квантования момента импульса электрона: **момент импульса ($L = mvr$) электрона в стационарных состояниях принимает дискретные значения:**

$$m v_n r_n = n \hbar$$

v - скорость электрона,

r - радиус орбиты,

m – масса электрона,

\hbar - перечёркнутая постоянная Планка,

$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ - номер стационарной орбиты.

$$m v_n r_n = n \hbar$$

Второй постулат Бора: излучение (поглощение) электромагнитного излучения атомом происходит при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние.

Энергия излучённого фотона равна разности энергий двух стационарных состояний:

$$\varepsilon_{\delta} = A_n - E_m$$

$$h\nu = E_n - E_m$$

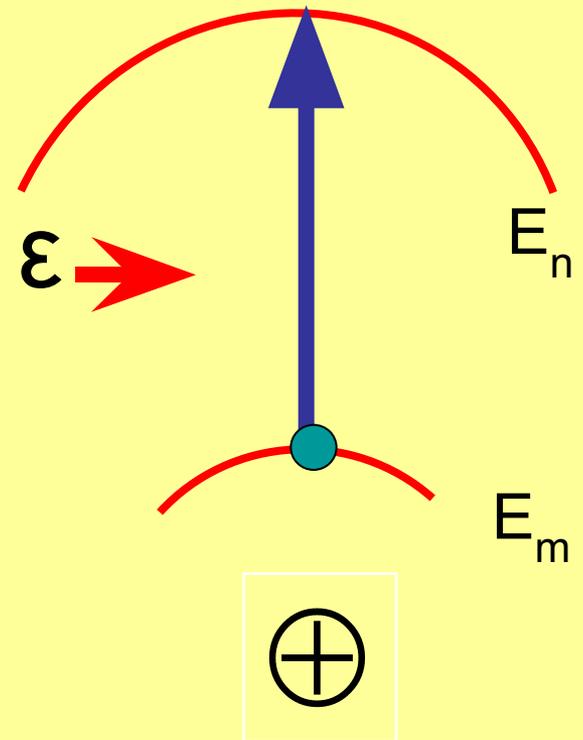
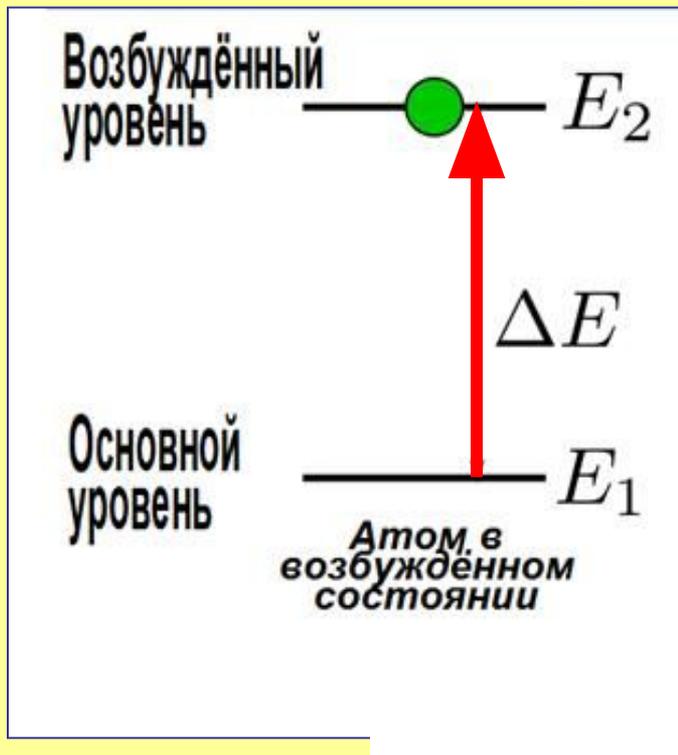
Частота перехода определяется как разность энергетических термов:

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

$$\nu = T(n) - T(m)$$

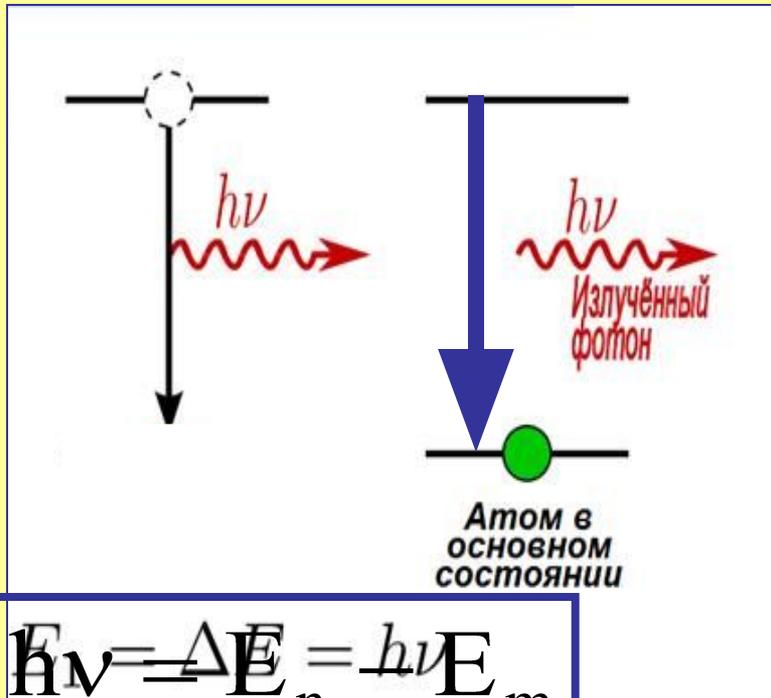
Акт поглощения атомом энергии

Атом поглощает электромагнитное излучение (фотон) при переходе электрона из стационарного состояния с меньшей энергией E_m в стационарное состояние с большей энергией E_n .

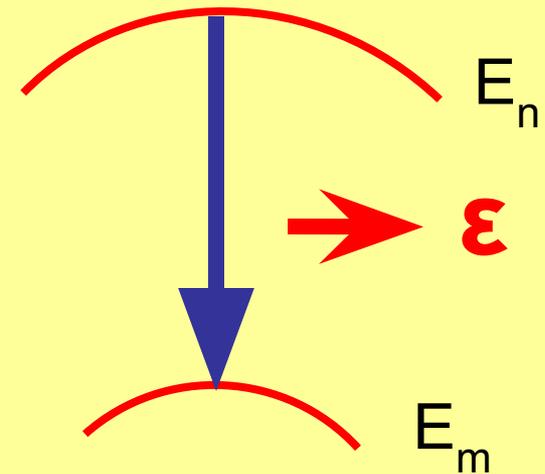


Акт излучения атомом энергии

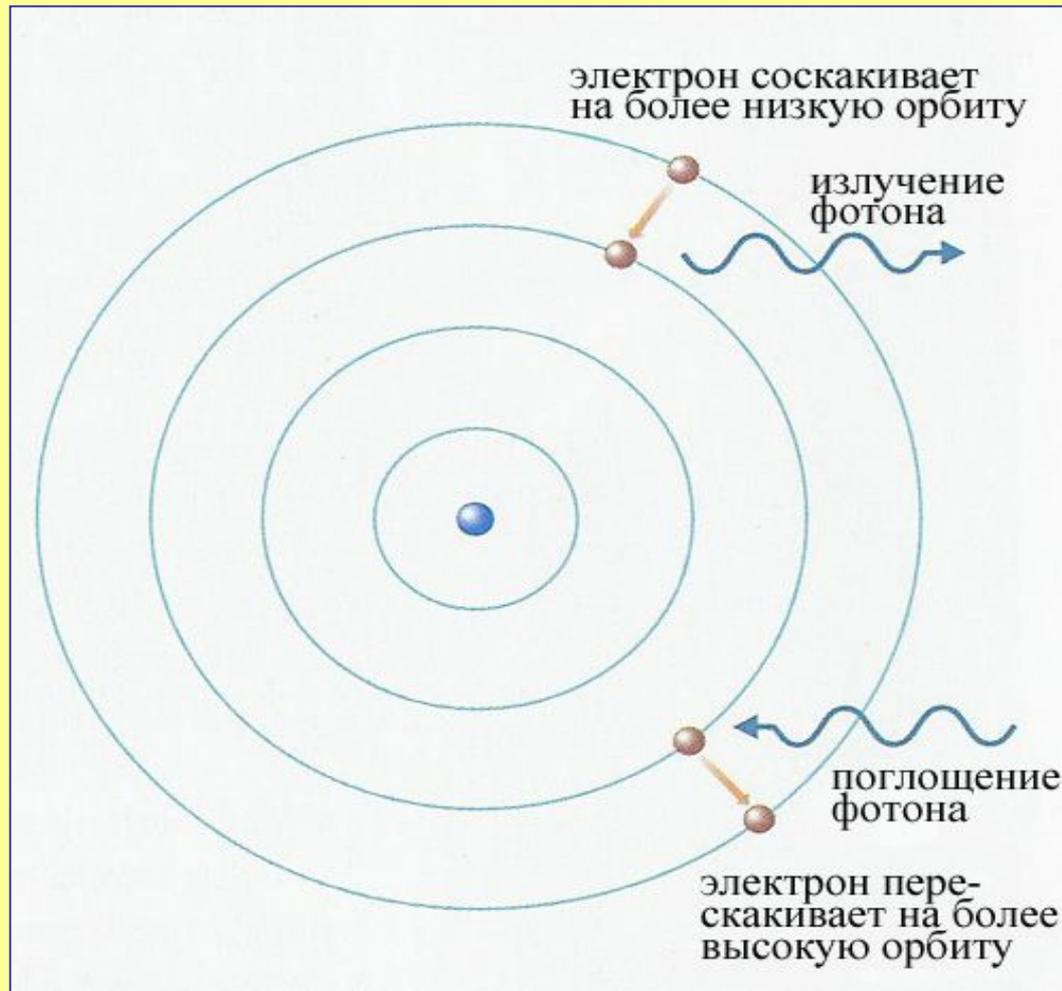
Атом испускает электромагнитное излучение при переходе электрона из стационарного с большей энергией E_n в стационарное состояние с меньшей энергией E_m .



$$h\nu = \Delta E = E_n - E_m$$



Акты испускания и поглощения фотона атомом



Теория атома по Бору

Запишем систему двух уравнений при вращении электрона по круговой орбите вокруг ядра с центростремительным ускорением:

- условие квантования момента импульса электрона;
- второй закон Ньютона: $ma = F$.

$$mvr = n\hbar$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{kZe^2}{r^2}$$

$Z - \ddot{u} \ddot{y} \ddot{a} \acute{e} \acute{i} \acute{a} \acute{u} \acute{e} \quad _ \acute{i} \acute{u} \acute{a} \acute{o} \acute{\delta} \quad _ \acute{y} \acute{e} \acute{a} \acute{i} \acute{a} \acute{i} \acute{o} \acute{a}$

$Z = 1 - \ddot{a} \ddot{e} \ddot{y} \quad _ \grave{a} \acute{o} \acute{u} \acute{a} \quad _ \acute{a} \acute{i} \acute{a} \acute{i} \acute{\delta} \acute{i} \acute{a} \acute{a}$

$e - \zeta \grave{a} \delta \ddot{y} \ddot{a} \quad _ \acute{y} \acute{e} \acute{a} \acute{e} \acute{o} \acute{\delta} \acute{i} \acute{a}$

$Ze - \zeta \grave{a} \delta \ddot{y} \ddot{a} \quad _ \ddot{y} \acute{a} \acute{\delta} \acute{a}$

$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\acute{I} \acute{u}^2}{\acute{E} \acute{e}^2} - \acute{e} \acute{i} \acute{y} \acute{o} \acute{o} \acute{e} \acute{o} \acute{e} \acute{a} \acute{i} \quad \acute{o} \quad _ \zeta \grave{a} \acute{e} \acute{i} \acute{u} \acute{a} \quad _ \acute{E} \acute{o} \acute{e} \acute{i} \acute{u} \acute{a}$

$n - \acute{i} \acute{u} \acute{a} \acute{o} \acute{\delta} \quad _ \acute{i} \acute{\delta} \acute{a} \acute{e} \acute{o} \acute{u}$

$\boxtimes - \acute{i} \acute{a} \acute{\delta} \acute{a} \acute{\div}, \acute{\delta} \acute{e} \acute{i} \acute{o} \quad \acute{o} \acute{a} \acute{y} \quad _ \acute{i} \acute{i} \acute{n} \acute{o} \acute{i} \acute{y} \acute{i} \acute{a} \acute{y} \quad _ \acute{I} \acute{e} \acute{a} \acute{i} \acute{e} \acute{a}$

Решим систему относительно **радиусов орбит.**

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{kZme^2}$$

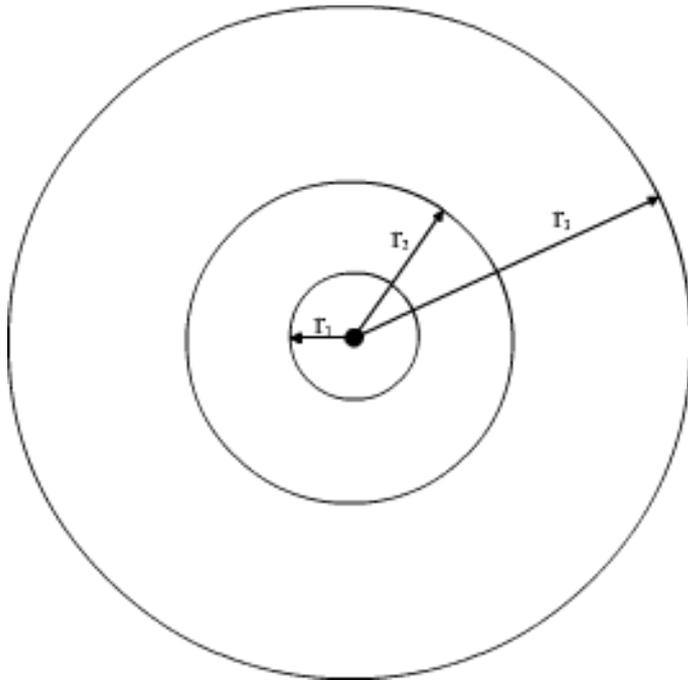
Радиусы боровских орбит меняются дискретно с изменением числа **n** (номера орбиты):

Наименьшим является **радиус первой орбиты:**

при $n = 1$

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kZe^2m} = \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}{9 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 5,29 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,0529 \text{ нм}$$

Радиусы любых стационарных орбит определяются по простой формуле:



$$r_n = n^2 r_1$$

$$r_1 \approx 0,53 \text{ нм}$$

$$r_2 = 4r_1$$

$$r_3 = 9r_1$$

$$r_4 = 16r_1$$

Полная энергия электрона на стационарных орбитах складывается из кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_\pi$$

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{kZe^2}{r}$$

Потенциальная энергия притяжения электрона к ядру имеет отрицательный знак ($E_\pi < 0$) и записывается:

$$E_\pi = -\frac{kZe^2}{r}$$

Из второго закона Ньютона определим величину:

$$mv^2 = \frac{kZe^2}{r}$$

Тогда

$$E = \frac{mkZe^2}{2mr} - \frac{kZe^2}{r} = -\frac{kZe^2}{2r}$$

Подставим формулу радиусов орбит:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{kZme^2}$$



Получим **полную энергию электрона:**

$$E = -\frac{k^2 Z^2 e^4 m}{2\hbar^2 n^2}$$

Особенности энергетического спектра:

1. Энергия электрона в атоме – отрицательна.
2. Энергетический спектр – дискретен.
3. Энергетический спектр – сходящийся (к нулю).

Основным называется состояние атома с наименьшим значением полной энергии (E_1).

$$n = 1$$

$$E_1 = -\frac{k^2 Z^2 m e^4}{2\hbar^2} = \frac{2,168 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = -13,53 \text{ эВ}$$

В основном состоянии атом может находиться сколь угодно долго.

Энергию любого стационарного состояния можно вычислить по простой формуле:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

$$E_1 = -13,6 \text{ эВ}$$

$$E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,4 \text{ эВ}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,5 \text{ эВ}$$

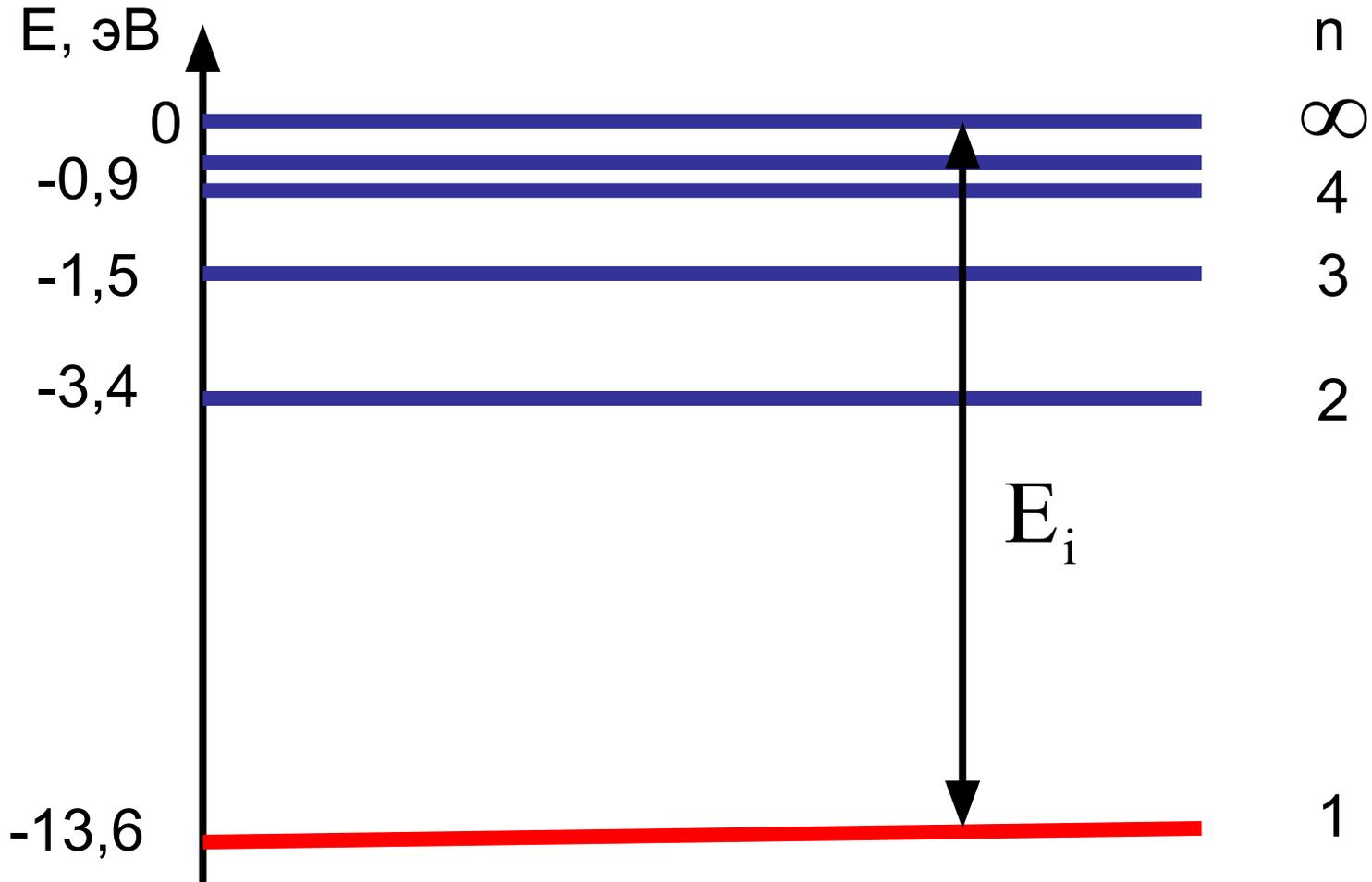
$$E_4 = \frac{E_1}{16} = -0,9 \text{ эВ}$$

Кроме основного состояния все остальные состояния – **возбуждённые**.

Время жизни в возбуждённых состояниях ограничено и равно **10^{-8} с.**

За это время электрон успевает совершить **около ста миллионов оборотов** вокруг ядра.

Схема энергетических уровней атома водорода



E_1 – **основное состояние** атома;

E_2 – **первое возбуждённое состояние** атома;

E_3 – **второе возбуждённое состояние** атома и т. д.

$E = 0$ – **атом ионизуется**: электрон покидает пределы атома и становится свободной частицей.

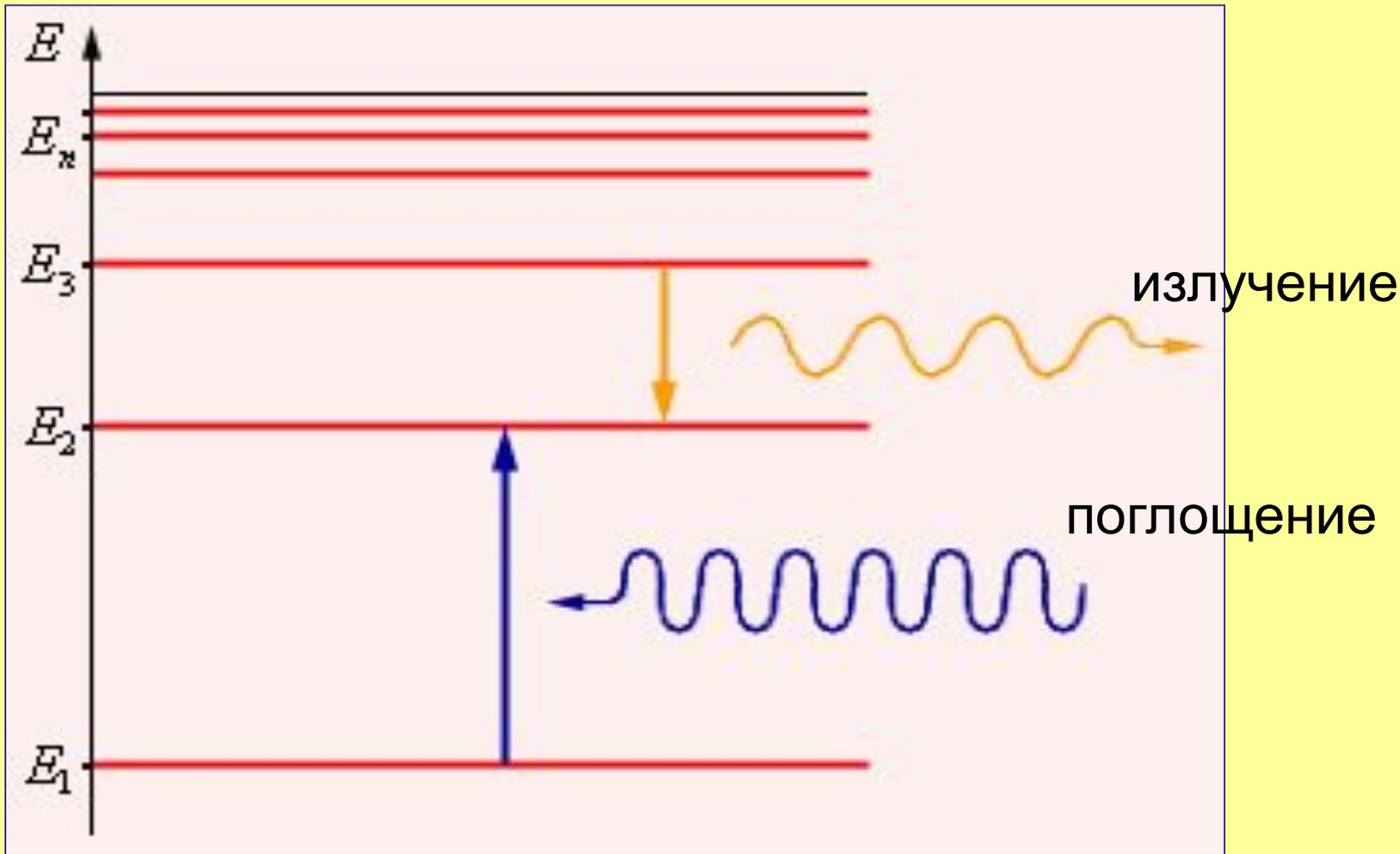
Энергия ионизации – энергия, необходимая для отрыва электрона от атома.

$$E_i = 0 - E_1$$

Для **атома водорода** энергия ионизации равна **13,6 эВ**.

$$E_i = 0 - (-13,6) = 13,6 \text{ эВ}$$

Процессы излучения и поглощения фотонов на схеме энергетических уровней



5.3. Спектральные серии атома водорода

Теория Бора привела к количественному согласию с экспериментом для значений частот, излучаемых атомом водорода.

Все частоты излучений атома водорода образуют ряд серий, каждому из которых соответствует определенное значение числа m и различные значения n (причём, $n > m$).

В спектре атома водорода наблюдается **6** серий.

Возможные частоты излучения атома водорода всех серий укладываются в формулу:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{k^2 Z^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

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

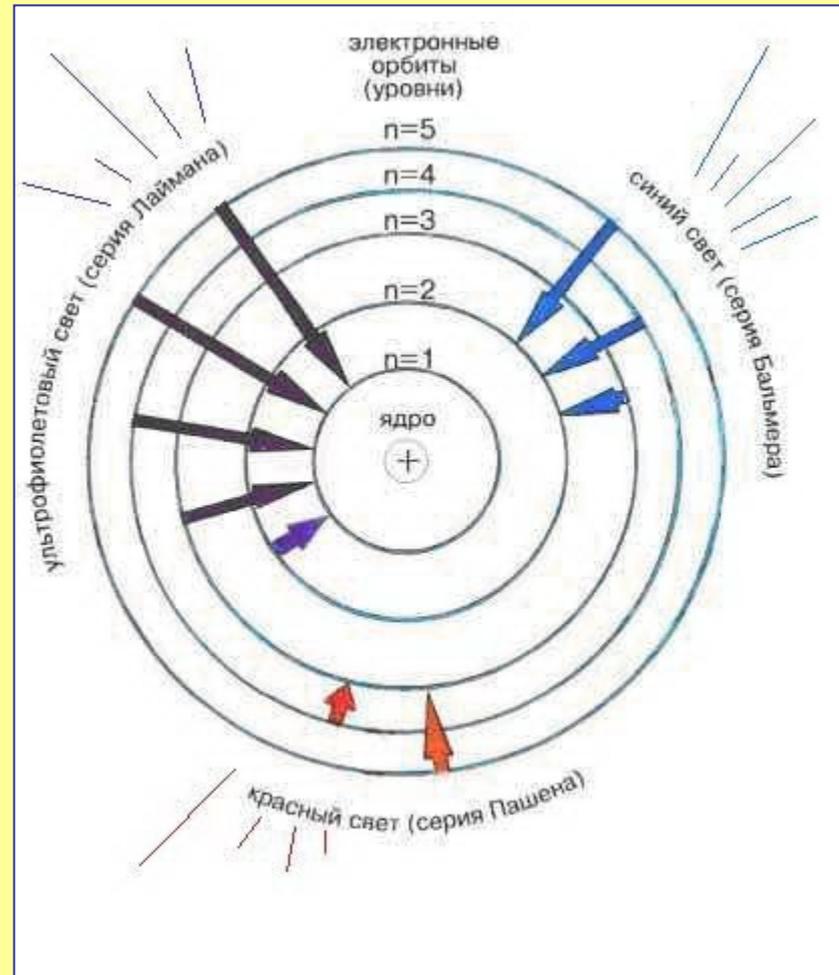
$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Постоянная Ридберга:

$$R = \frac{k^2 Z^2 m e^4}{4\pi\hbar^3} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

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

Серии Лаймана, Бальмера и Пашена



1. Серия Лаймана

Открыта в 1906 г.

1. Данная серия **образуется при переходах электронов с возбуждённых энергетических уровней на первый уровень** в спектре излучения и с первого уровня на все остальные при поглощении.
2. Частоты этой серии относятся к **ультрафиолетовой области** спектра.

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

$$n = 2, 3, 4, \dots$$

2. Серия Бальмера

Открыта в 1885 г.

1. Данная серия **образуется при переходах электронов с возбужденных энергетических уровней на второй уровень** в спектре излучения и со второго уровня на все вышележащие уровни при поглощении.
2. Частоты этой серии относятся к **видимой области** спектра.

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

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

3. Серия Пашена

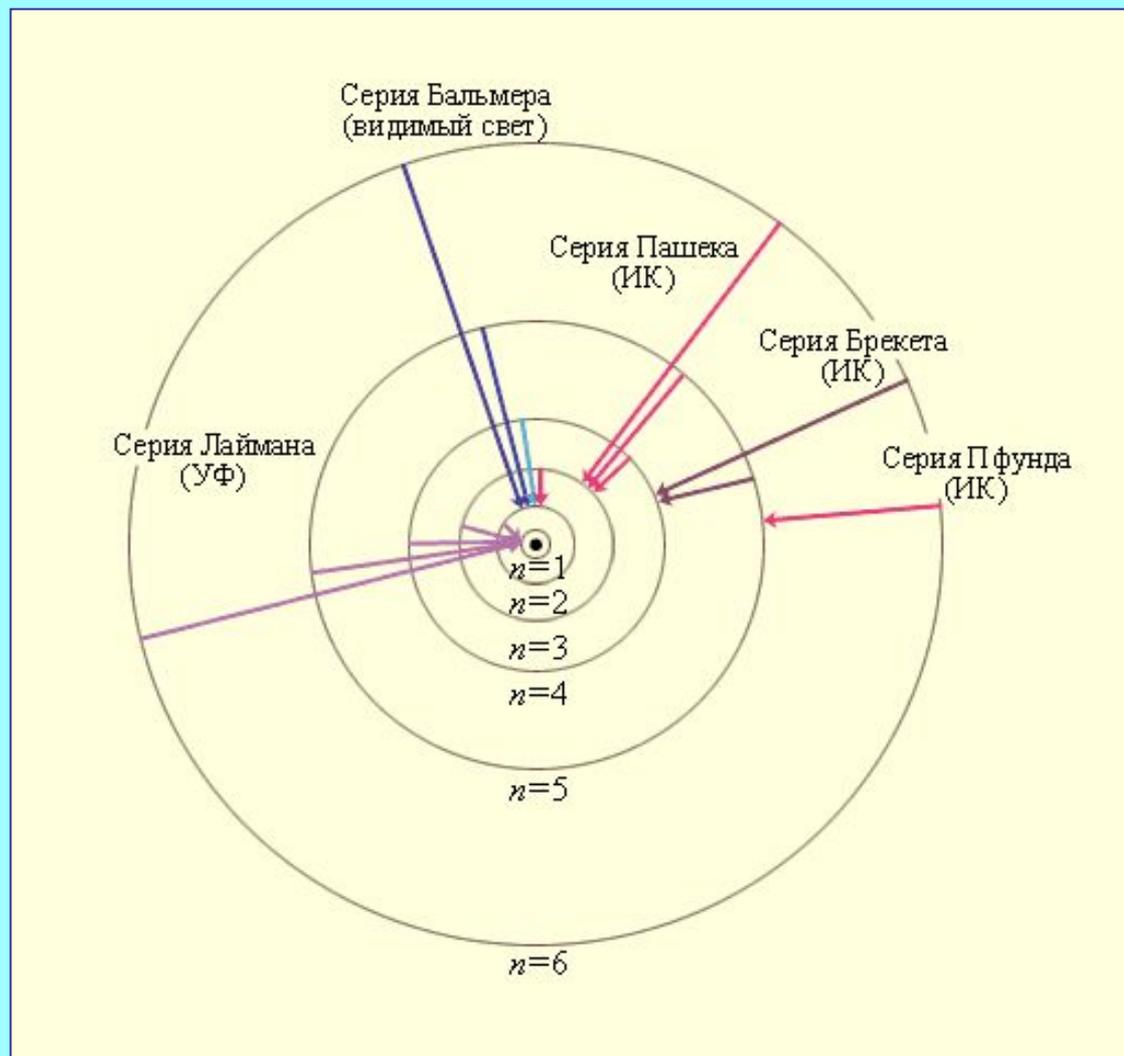
Открыта в 1908 г.

1. Данная серия **образуется при переходах электронов с возбужденных энергетических уровней на третий уровень** в спектре излучения и с третьего уровня на все вышележащие уровни при поглощении.
2. Частоты этой серии относятся к **инфракрасной области** спектра.

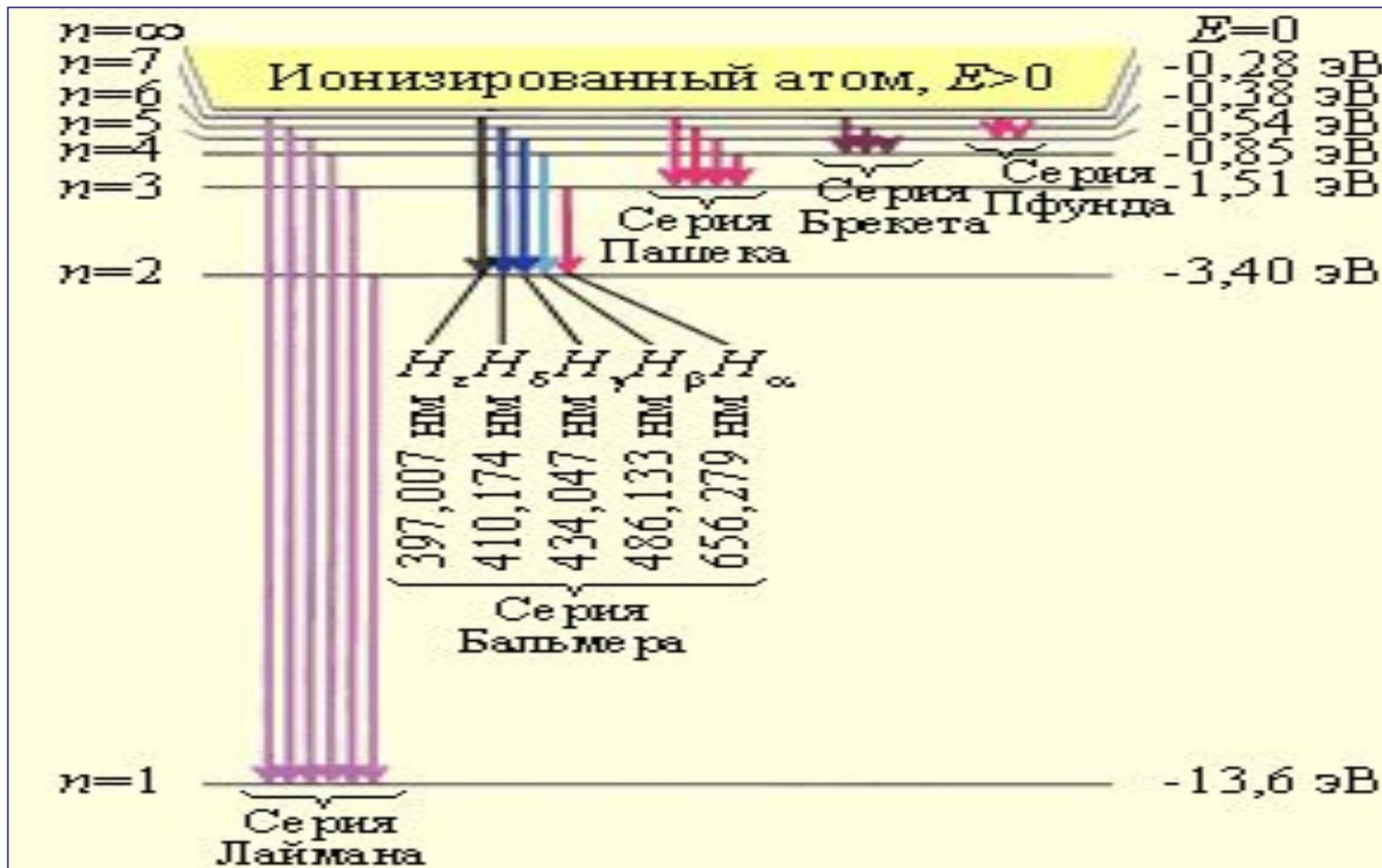
$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

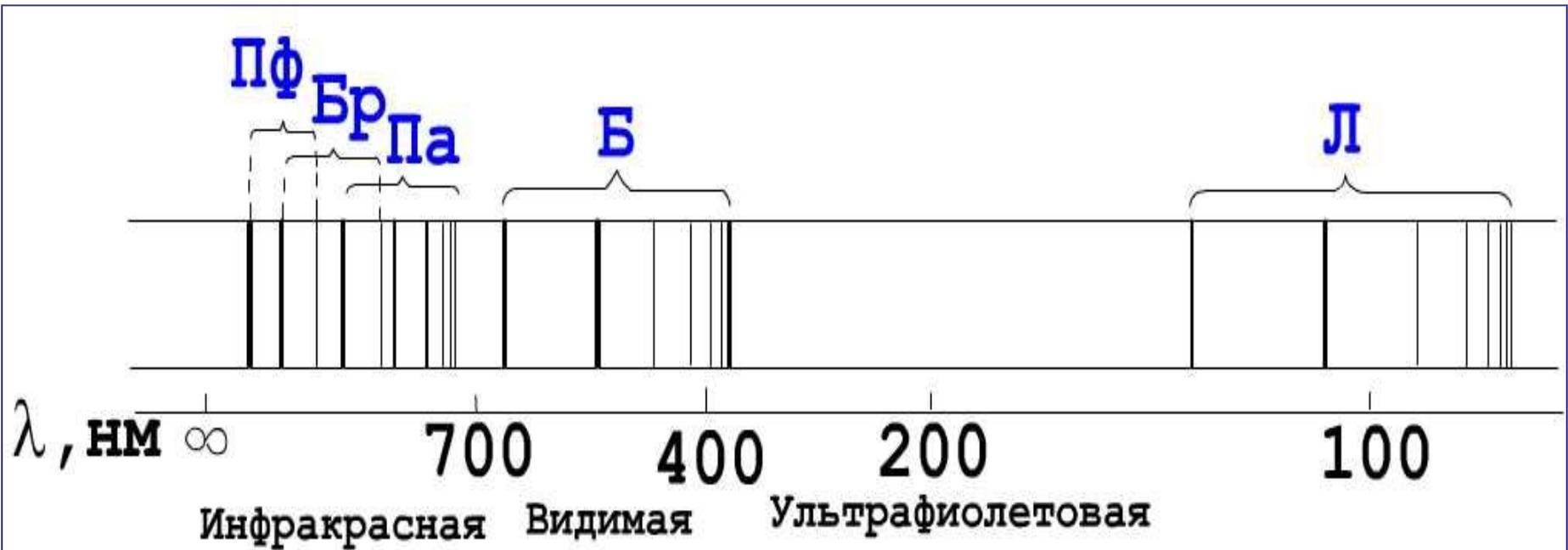
$$n = 4, 5, 6, \dots$$

Спектральные серии атома водорода



Спектральные серии на схеме энергетических уровней





Серии: Пф - Пфунда;
 Br - Бреккета;
 Па - Пашена;
 Б - Бальмера;
 Л - Лаймана;
 серия Br перекрывается
 сериями Пф и Па.

5.4. Достоинства и недостатки теории Бора

Достоинства теории Бора:

- построила количественную теорию спектра атома водорода;
- Теоретически вычисленные значения частот полностью совпали с экспериментальными значениями;
- позволила сделать качественные заключения о водородоподобных атомах (ионизированный атом гелия $Z = 2$ и дважды ионизированный атом лития $Z = 3$).

Недостатки теории Бора:

- не удалось создать количественную теорию водородоподобных атомов;
- не является последовательно классической теорией (электрон – классическая частица, но его энергия квантуется);
- не является последовательно квантовой теорией (электрон движется по круговым орбитам, но для квантовой частицы не применимо понятие траектории).

Современной теорией атома является квантовая теория, в которой для электрона учитываются как его корпускулярные, так и волновые свойства.

5.5. Волны де Бройля. Волновые свойства частиц

В результате углубления представлений о природе света выяснилось, что в оптических явлениях обнаруживается **корпускулярно-волновой дуализм света.**

В 1924 г. Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу: **корпускулярно - волновой дуализм** не является особенностью одних только оптических явлений, он **имеет универсальное значение.**

Гипотеза де Бройля:

частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами обладают свойствами волны.

Электромагнитная волна

Имеет энергию:

$$\varepsilon_{\Phi} = h\nu$$

Имеет импульс:

$$p_{\Phi} = \frac{h}{\lambda}$$

Имеет длину волны:

$$\lambda = \frac{h}{p_{\Phi}}$$

Частица

Волны, связанные с микрочастицами, называются **волнами де Бройля**.

Движение частицы массой **m** со скоростью **v** уподобляется волновому процессу, **длина волны** которого равна

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{p}$$

Микрочастицами называются частицы, у которых обнаруживаются волновые свойства.

Представить **частицу – волну (микрочастицу)** в рамках классической физики невозможно.

До тех пор, пока «частица-волна» движется в пространстве свободно – это частица (электрон, протон).

При взаимодействии объекта «частица-волна» с веществом у него проявляются волновые свойства (способны к дифракции).

Область локализации микрочастицы определяется объёмом волнового пакета, в котором сосредоточена почти вся энергия волнового пакета.

1. Порядок величины длины волны де Бройля.

а) Классическая частица массой **1 г**, летящая со скоростью **1 м/с**.

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-3} \cdot 1} = 6,63 \cdot 10^{-31} \text{ м}$$

б) Молекула кислорода, имеющая при комнатной температуре скорость **500 м/с**.

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{5,32 \cdot 10^{-26} \cdot 500} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,025 \text{ нм}$$

Для этих двух случаев рассчитанная длина волны де Бройля лежит за пределами доступных измеряемых расстояний; поэтому **волновыми свойствами частиц можно пренебречь**.

В) **Электрон в атоме водорода** имеет вполне определяемую длину волны и **его можно считать микрочастицей**.

$$\lambda_{\text{Б}} = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 2,2 \cdot 10^7} = 3,3 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,33 \text{ нм}$$

Вывод: **реально измеряемый интервал длин волн де Бройля микрочастиц – нанометровый диапазон**.

Решая систему, уравнений получим выражение:

$$\begin{aligned} mvr &= n\hbar \\ \lambda_{\text{Б}} &= \frac{2\pi\hbar}{mv} \end{aligned}$$



$$2\pi r = n\lambda_{\text{Б}}$$

2. На длине окружности стационарной орбиты в атоме водорода должно укладываться целое число волн де Бройля электрона.

На первой орбите укладывается **1** длина волны де Бройля, причём её величина равна

$$\lambda_{Б1} = 2\pi r_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0529 = 0,3322 \text{ нм}$$

На второй орбите укладывается **2** длины волны де Бройля, причём её величина равна

$$\lambda_{Б2} = \frac{2\pi r_2}{2} = \frac{2\pi \cdot 4r_1}{2} = 2 \cdot 2\pi r_1 = 2 \cdot 0,33 = 0,66 \text{ нм}$$

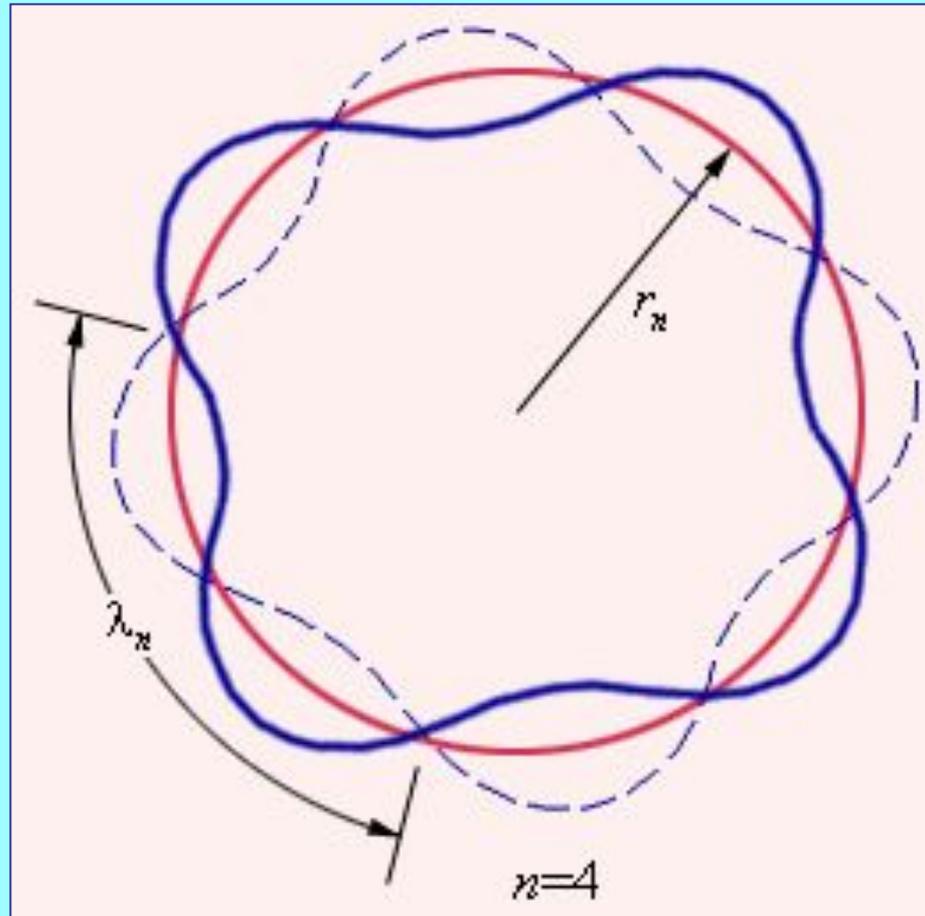
С увеличением номера орбиты длина волны де Бройля электрона увеличивается.

$$\lambda_{Бn} = n\lambda_{Б1}$$

Чем дальше электрон находится от ядра, тем менее проявляются его волновые свойства;

При отрыве электрона от атома он становится свободной частицей, проявляя только свои корпускулярные свойства.

Стоячие волн де Бройля электрона на 4 - ой стационарной орбите



3. Волны де Бройля несут вероятностный смысл: квадрат модуля амплитуды этих волн равен плотности вероятности нахождения частицы в заданном объёме.

4. Волны де Бройля имеют фазовую и групповую скорости.

Групповая скорость волн де Бройля классической частицы равна скорости её движения и она не может быть больше скорости света.

Фазовая скорость волн де Бройля может быть как меньше, так и больше скорости света.

5. Волны де Бройля испытывают дисперсию: скорость волн де Бройля зависит от длины волны.

Характерные свойства микрообъекта

как **ВОЛНЫ:**

- волна делится на части;
- занимает весь объём;
- понятие траектории к ней не применимо.

как **ЧАСТИЦЫ:**

- частица неделима;
- занимает в пространстве строго определённый объём (локализована в пространстве);
- к ней применимо понятие траектории.

Отличие микрочастицы от волны заключается в том, что она всегда обнаруживается как единое целое: никто никогда не наблюдал пол-электрона.

В то же время волну можно разделить на части и затем наблюдать каждую часть в отдельности.

Отличие микрочастицы от механической частицы заключается в том, что для нее неприменимо привычное нам понятие траектории.

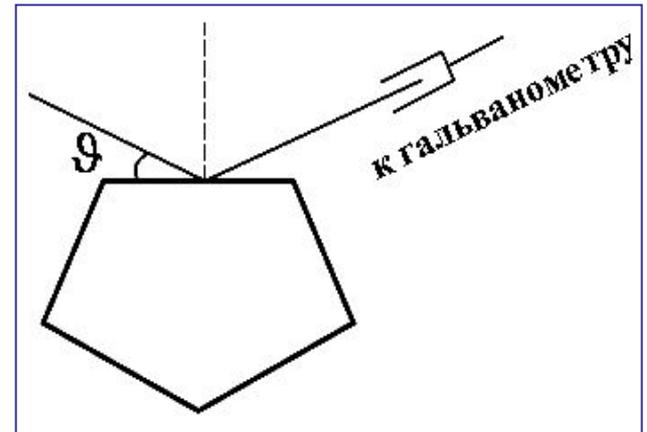
Нельзя описывать микрочастицы даже в виде **волновых пакетов**, составленных из волн де Бройля, поскольку волновой пакет быстро «расплывается» (примерно за 10^{-26} с) и исчезает.

5.6. Опытные доказательства существования волновых свойств частиц

1. Опыт Дэвиссона и Джермера (1927 г.)

Узкий пучок моноэнергетических электронов направлялся на поверхность монокристалла никеля и наблюдалось отражение электронов от его поверхности.

Интенсивность отраженного пучка оценивалась по силе тока, текущего через гальванометр.



Варьировались скорость электронов и угол ϑ .

Оказалось, что рассеяние является особенно интенсивным при соблюдении условия (закона Вульфа- Брэгга)

$$2d \sin \vartheta = n\lambda_{\text{Б}}$$

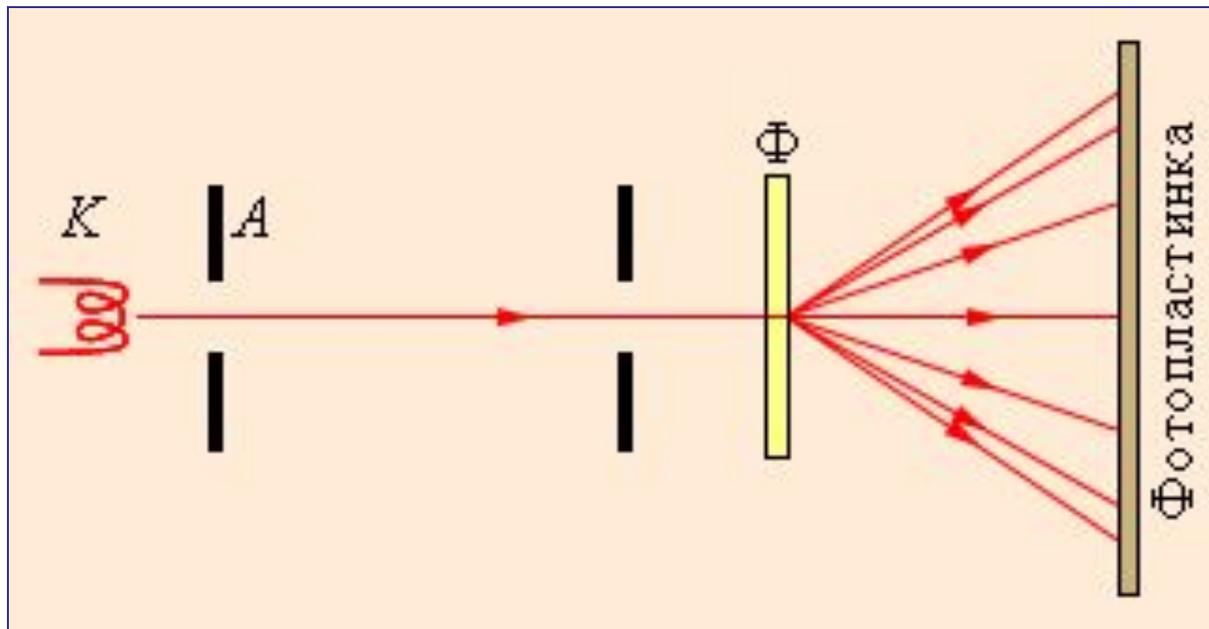
где d – межплоскостное расстояние; ϑ – угол скольжения; $\lambda_{\text{Б}}$ – длина волны, рассчитанная по формуле де Бройля.

Таким образом, **волны де Бройля электронов** испытывают **дифракцию** по тем же законам, что и рентгеновские лучи. Это явилось блестящим подтверждением гипотезы де Бройля.

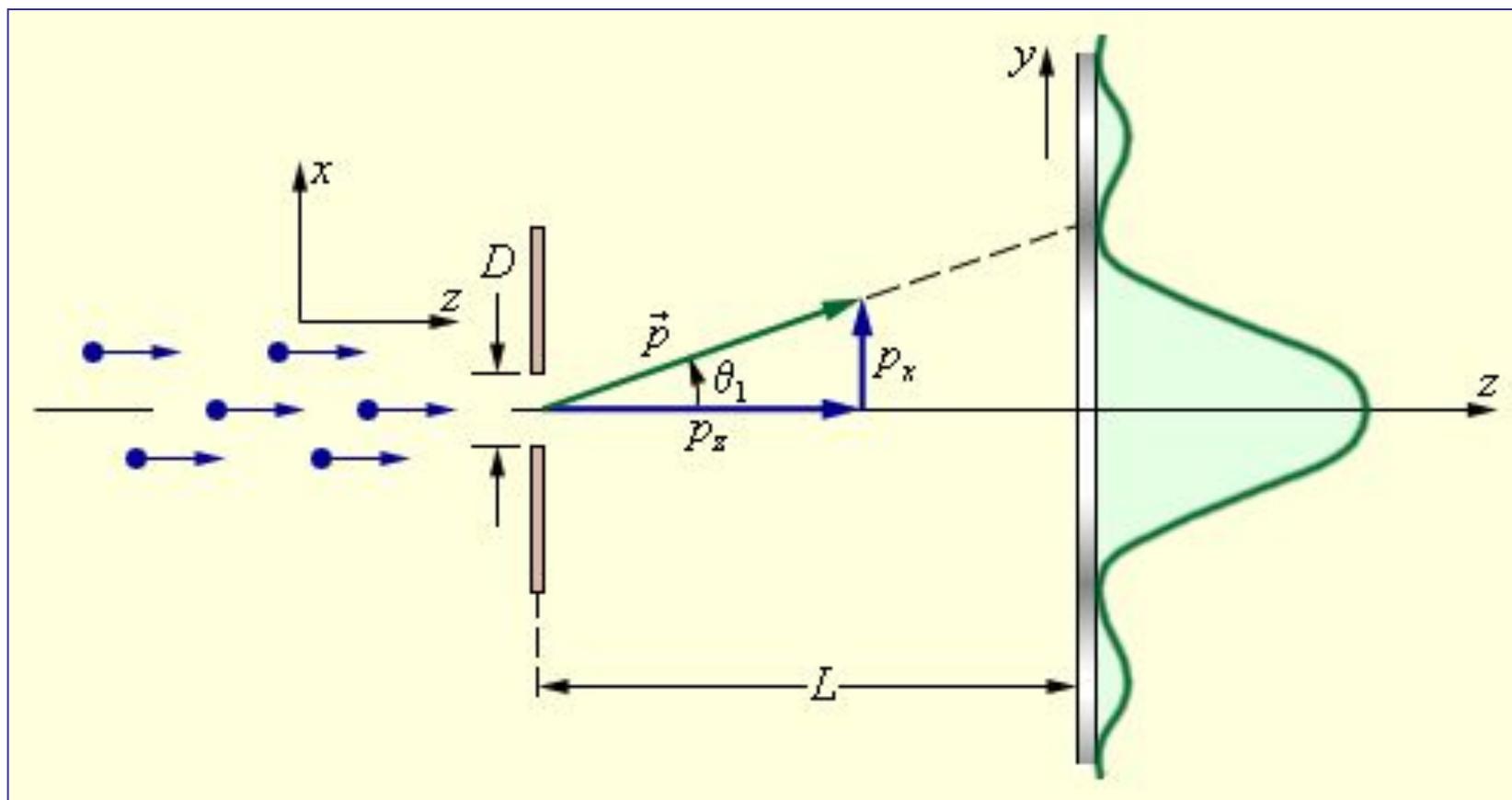
2. Опыт Томсона и Тартаковского (1927 г.)

Они получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу.

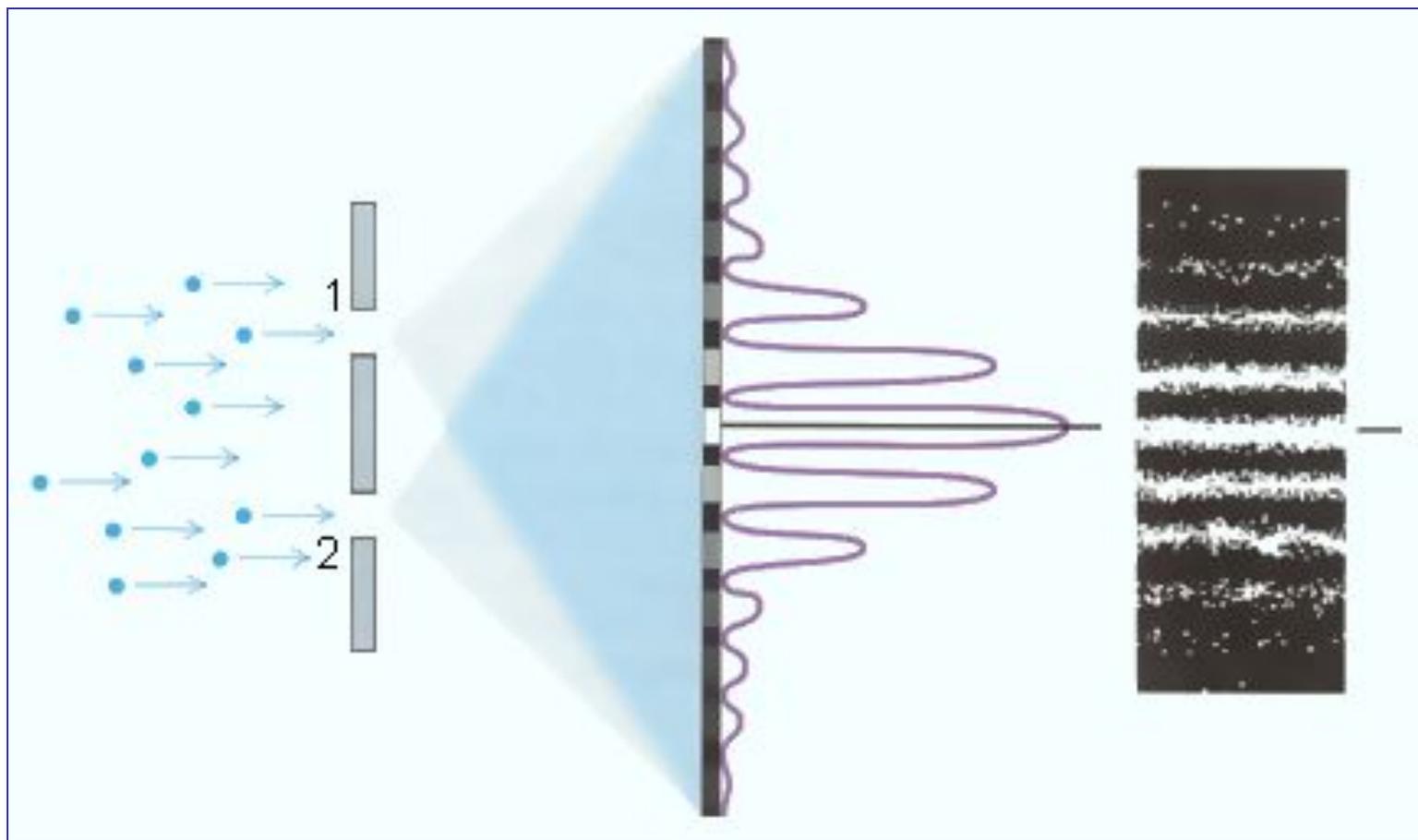
Электроннограмма сравнивалась с полученной в аналогичных условиях **рентгенограммой**.



Дифракция электронов на одной щели



Дифракция электронов на двух щелях



Дифракционная картина аналогична как полученной при дифракции света

3. Опыт Бибермана, Сушкина, Фабриканта (1949 г.)

Наблюдаемая дифракционная картина в опытах Дэвиссона, Джермера и Томсона обусловлена одновременным участием в процессе большого числа электронов.

Может быть отдельный электрон, проходя через кристалл, дифракции не обнаруживает?

Советские физики провели эксперимент, в котором интенсивность электронного пучка была настолько слабой, что **электроны проходили через прибор заведомо поодиночке.**

Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями электронов через кристалл примерно в **30000** раз превосходил время, затраченное электроном на прохождение всего прибора.

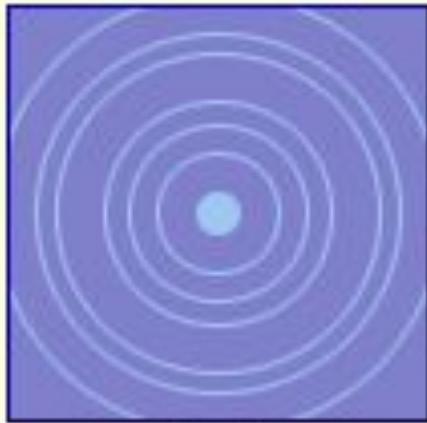
При достаточной экспозиции была получена дифракционная картина, ничем не отличающаяся от той, какая наблюдалась при обычной интенсивности пучка.

Вывод: волновые свойства присущи каждому отдельному электрону, а не только пучку электронов.

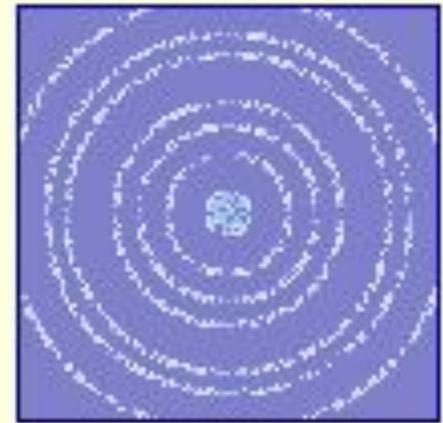
В настоящее время существуют методы исследования, основанные на дифракции микрочастиц (электронов, нейтронов, протонов).

Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б).

В случае (б) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку



(а)



(б)

5.7. Соотношение неопределённостей Гейзенберга

Одним из **основных принципов квантовой механики** является так называемый **принцип неопределенности**, который указывает:

- **в какой мере можно пользоваться понятиями классической механики применительно к микрочастицам?**
- **с какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц?**

В классической механике **состояние классической частицы** определяется заданием динамических переменных:

- **координат, импульсов (скоростей); энергии** и т. д.
Все эти величины **известны довольно точно** в любой момент времени.

Информацию о микрочастицах мы получаем, наблюдая их взаимодействия с приборами.

В соответствии с этим **состояния микрочастиц** определяется измеренными значениями тех же динамических переменных, но для **микрочастицы** значения измеренных динамических величин получаются **с определённой погрешностью**.

Соотношение неопределённостей для некоторых динамических величин было установлено в 1927 г. **Гейзенбергом.**

Величины, связанные между собой соотношением неопределённостей носят название **канонических.**

Среди них:

- **координата и проекция импульса на ось;**
- **полная энергия и время, в течение которого частица имеет эту энергию.**

1. Соотношение неопределённостей

для координат микрочастицы и проекций её импульса на оси

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h$$

$$\Delta X \cdot \Delta p_x \geq h$$

Математическая формулировка: произведение неопределённости координаты микрочастицы на неопределённость проекции её импульса на соответствующую ось не может быть меньше постоянной Планка.

Физический смысл: нельзя одновременно с одинаковой точностью определить координату микрочастицы и проекцию её импульса на соответствующую ось.

Рассмотрим как соотношение неопределенностей указывает на пределы применимости понятия **траектории** к движению микрочастиц.

Движение по траектории характеризуется вполне определенными значениями координат и скорости в каждый момент времени.

$$p_x = mv_x$$

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{m}$$

Видно: - чем больше масса частицы, тем меньше неопределенности ее координаты и скорости; - с тем большей точностью можно применять понятие траектории.

1. **Классические частицы** имеют **большую массу**, поэтому погрешности в определении величин x и v оказываются для них бесконечно малыми, выходящими за пределы точности измерений, так что её **движение** будет неотличимо от движения **по траектории**.
2. Оценим теперь неопределенность положения **электрона в атоме**. Пусть он находится на **первой стационарной орбите**.

Импульс электрона определим из первого постулата Бора

$$mv_1 r_1 = \hbar$$

как

$$p_1 = \frac{\hbar}{r_1}$$

Пусть неопределенность импульса равна самому импульсу:

$$\Delta p = p_1$$

Подставим величину p_1 в соотношение неопределённостей и получим:

$$\Delta x \cdot \frac{\hbar}{r_1} = 2\pi\hbar$$

$$\Delta x = 2\pi r_1$$

Вывод: неопределенность координаты электрона в атоме имеет величину порядка размеров самого атома.

Ни о какой траектории микрочастиц не может быть и речи.

2. Соотношение неопределённостей для полной энергии микрочастицы и времени

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Математическая формулировка: произведение неопределённости полной энергии микрочастицы на время, в течение которого она имеет эту энергию, не может быть меньше постоянной Планка.

Физический смысл: нельзя одновременно с одинаковой точностью определить полную энергию микрочастицы и время, в течение которого она имеет эту энергию.

Соотношением

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

можно объяснить существование **естественной ширины спектральных линий**, которая обусловлена шириной энергетических уровней.

В **основном состоянии** с энергией, равной **-13,6 эВ**, атом водорода может находиться сколь угодно долго (**t стремится к бесконечности**).

Тогда ширина этого энергетического уровня равна нулю:

$$\Delta E_1 = \frac{h}{\infty} = 0$$

В **первом возбуждённом состоянии** с энергией, равной **– 3,4 эВ**, атом водорода может находиться **10^{-8} с**.

Ширина **второго** энергетического уровня:

$$\Delta E_2 = \frac{h}{\Delta t} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-8} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$$

При переходе электрона с уровня E_2 на уровень E_1 атом излучает фотон с частотой:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{(-3,4 - (-13,6)) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 2,46 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Разброс значений по частотам составляет величину:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E_2 - \Delta E_1}{h} = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 0,97 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

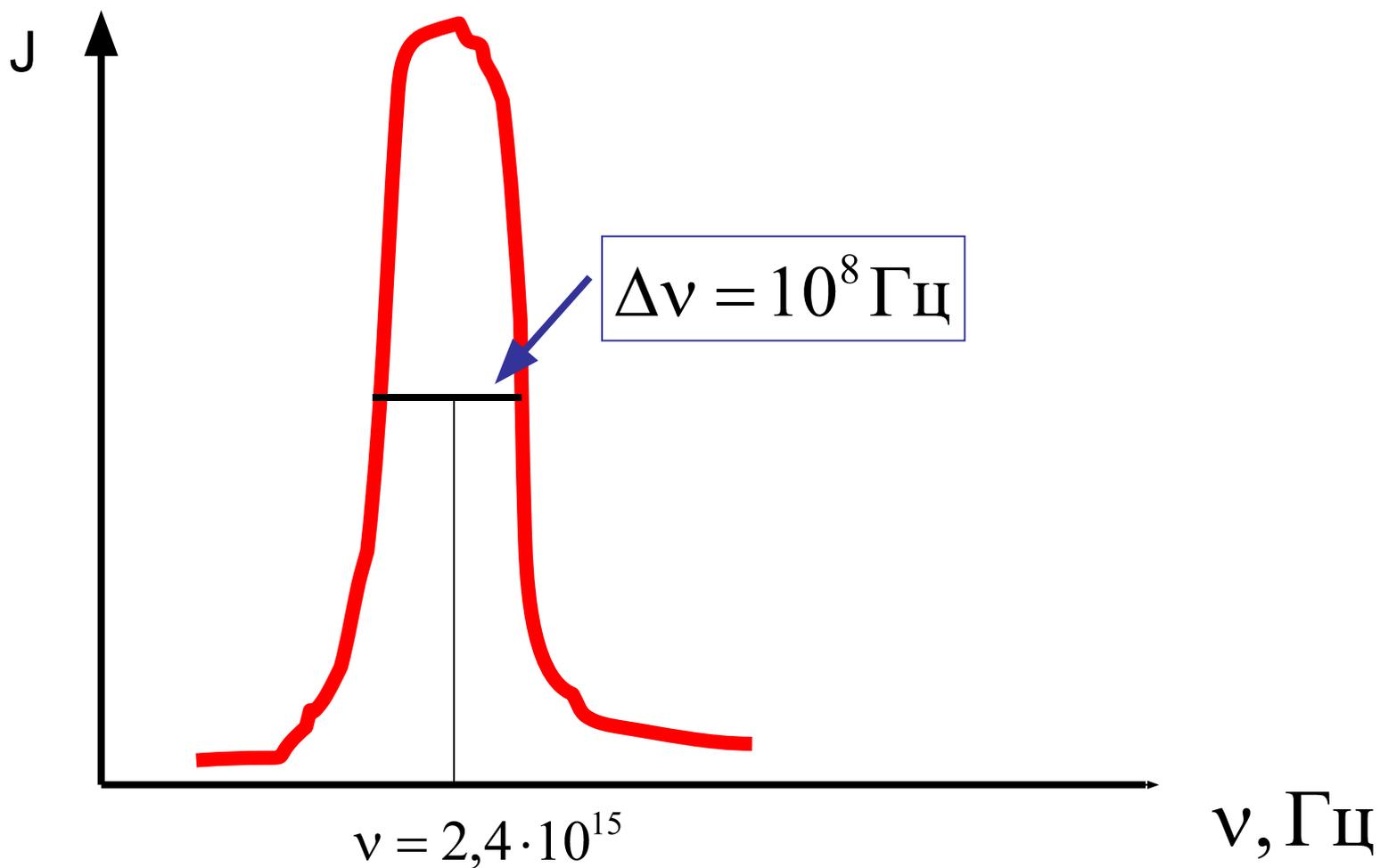
Таким образом, первая спектральная линия в спектре атома водорода имеет частотный интервал:

$$\Delta\nu = (2,5 \cdot 10^{15} \pm 1 \cdot 10^8) \text{ Гц}$$

Естественную ширину спектральных линий никакими экспериментальными приёмами уменьшить нельзя.

Она заложена самой природой – корпускулярно-волновым дуализмом материи.

Естественная ширина спектральных линий



Корпускулярно-волновой дуализм материи

Материя обладает двойственностью: она может быть в виде:

- вещества;
- поля.

Любой микрообъект природы может рассматриваться как волна, причём его корпускулярные свойства (энергия и импульс) и волновые свойства (частота и длина волны) связаны соотношениями:

$$\varepsilon = h\nu$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$