

АТОМНАЯ ФИЗИКА

АТОМ – «неделимый». Атом – мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства.

С античных времен до XIX века атом считался наименьшей частицей вещества.

Но в XIX веке были открыты и изучены явления, обнаруживающие сложность строения атома.

1. Электропроводность различных веществ.
2. Ионизация атомов.
3. Фотоэффект.
4. Радиоактивность.

в состав атома входят отрицательно заряженные частицы - электроны

Исследование радиоактивности доказало, что в состав атома входят также и положительно заряженные частицы.

ОСНОВНОЙ ВОПРОС – как распределен положительный и отрицательный заряд внутри атома?



Размеры атома ($R_{атм}$) гораздо меньше длины волны видимого света



Строение атома изучается косвенными методами

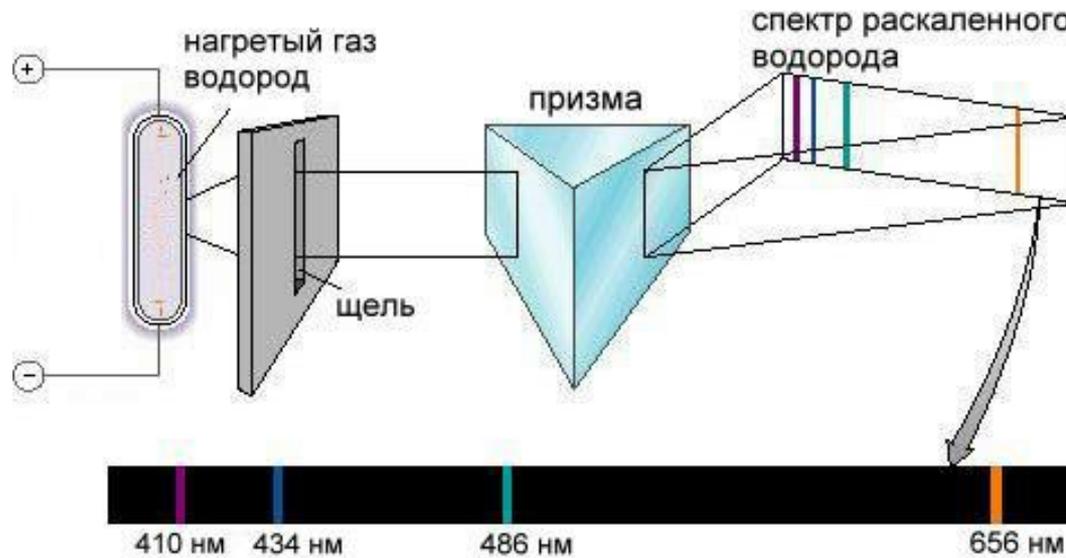
Свет излучается атомами



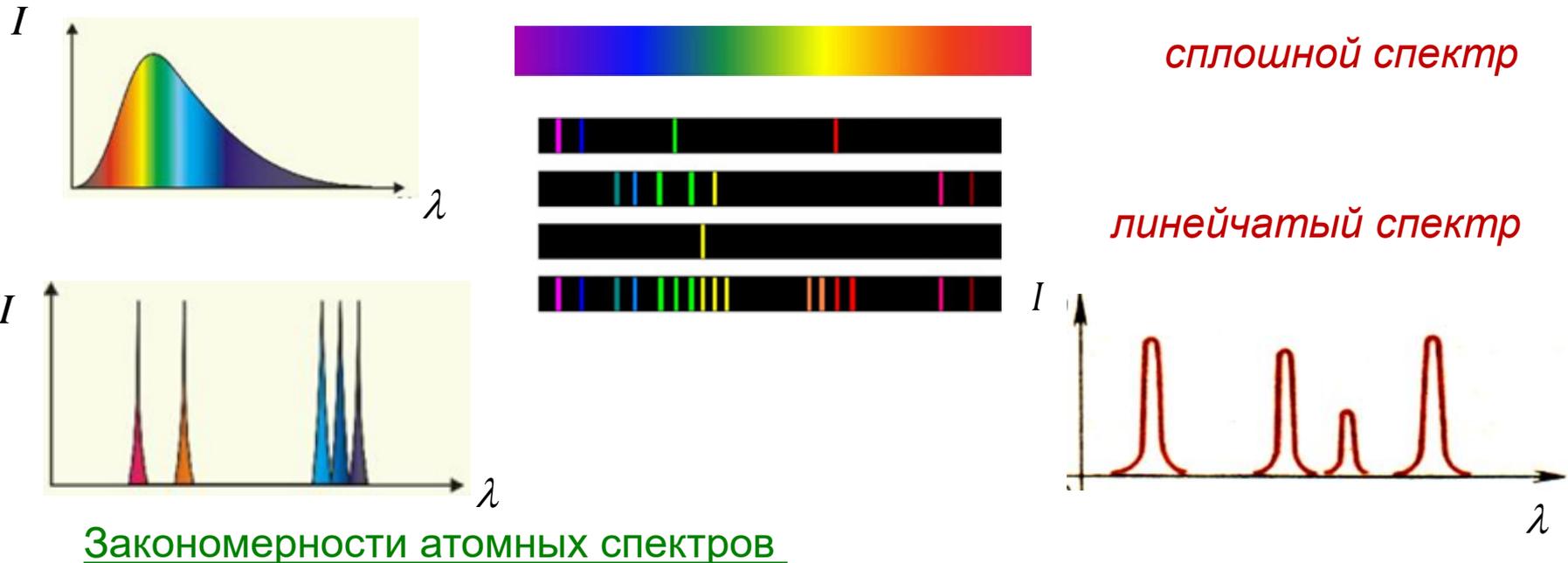
Природа света и механизм излучения тесно связаны со строением атома



Получить информацию о строении атомов можно, изучая спектры испускания и поглощения



Спектры испускания водорода и других газов в разреженном состоянии оказались *не сплошными*, как у АЧТ или у солнечного света, а *линейчатыми*.



Закономерности атомных спектров

1. Каждому газу соответствует определенный линейчатый спектр.
2. Расположение спектральных линий в спектрах излучения и поглощения для каждого газа совпадает.
3. Спектральные линии в спектрах можно объединить в группы (*спектральные серии*).



В 1885г. И.Бальмер подобрал эмпирическую формулу, определяющую спектральные линии атома водорода в видимой части спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{-формула Бальмера}$$

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

В дальнейшем (в начале XXв.) в спектре атома водорода было обнаружено еще несколько серий. Длины волн всех спектральных серий можно рассчитать по формуле:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{-обобщенная формула Бальмера}$$

λ - длина волны спектральной линии

$$R = 1,097 \times 10^7 \text{ м}^{-1} \quad \text{- постоянная Ридберга}$$

$m = 1$ $n = 2, 3, 4, \dots$ - серия Лаймана (ультрафиолетовая область)

$m = 2$ $n = 3, 4, 5, \dots$ - серия Бальмера (видимая область)

$m = 3$ $n = 4, 5, 6, \dots$ - серия Пашена

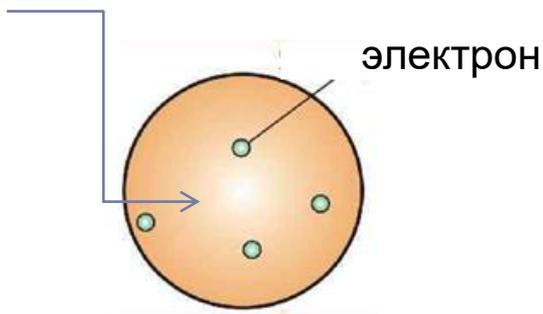
$m = 4$ $n = 5, 6, 7, \dots$ - серия Брэкета

$m = 5$ $n = 6, 7, 8, \dots$ - серия Пфунда

} (инфракрасная область)

Модели строения атомов

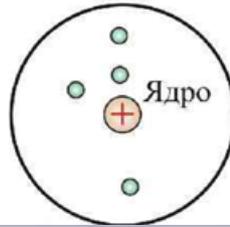
положительный заряд равномерно распределен



1) 1903г., Томсон, **капельная модель**

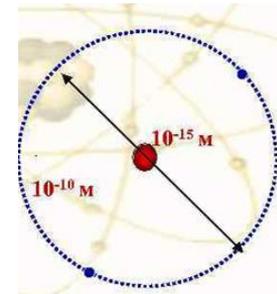
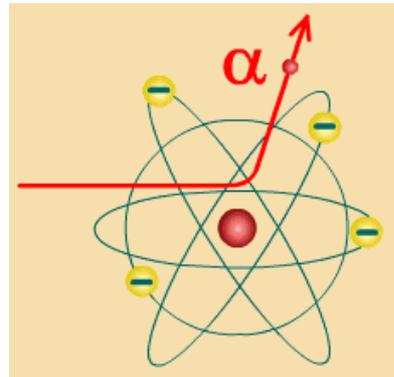
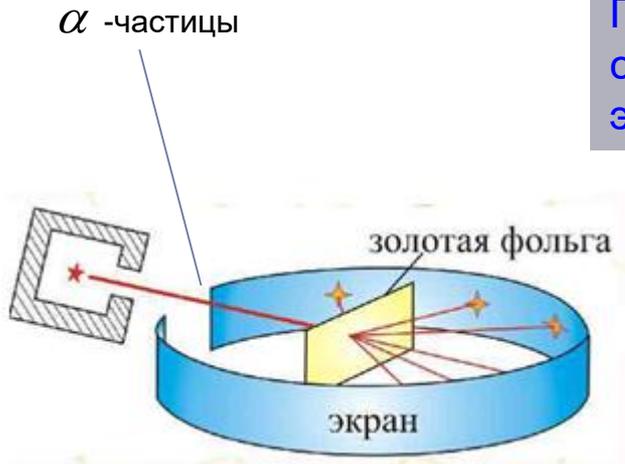
$$R_{ат} \approx 10^{-10} \text{ м} - \text{радиус атома}$$

2)



1911г., Резерфорд, опыт по рассеянию α -частиц золотой фольгой, **ядерная (планетарная) модель**:

Положительный заряд и 99,95% массы атома сосредоточено в малом ядре, вокруг которого движутся электроны.

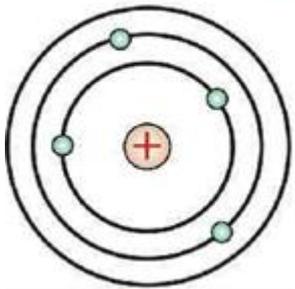


$$R_{я} \approx 10^{-15} \text{ м} - \text{радиус ядра}$$



Недостатки ядерной модели:

1. *Спектр излучения атома должен быть сплошной (эксперимент - спектр линейчатый).*
2. *Атом не может существовать дольше миллионных долей секунды (атом – устойчивая система)*



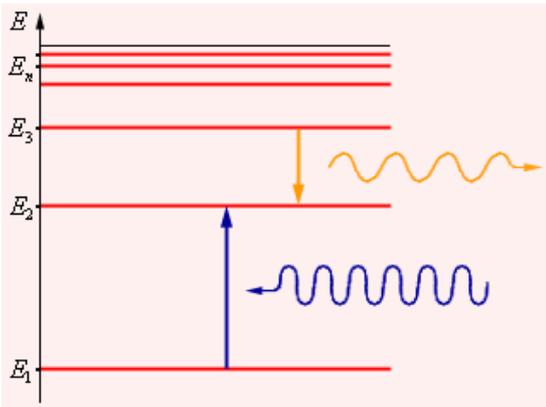
- 3) 1913г., Н.Бор, **планетарная модель**, в основе которой лежит два постулата.

Первый постулат Бора: в атоме существуют стационарные состояния, в которых он не излучает энергию. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты.

Второй постулат Бора: при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m$$

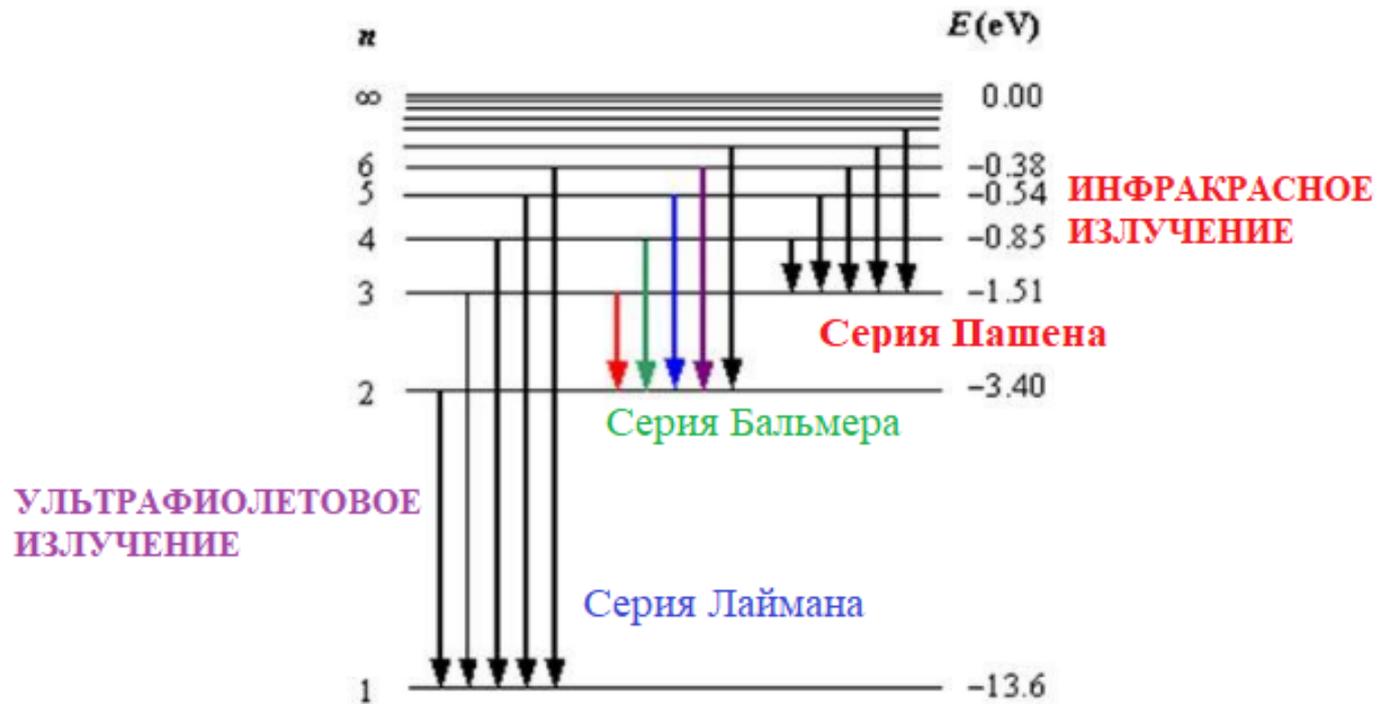
Если $E_n > E_m$, то происходит излучение энергии, если $E_n < E_m$ - ее поглощение.



Недостатки планетарной модели:

1. Модель применима **только** для атома водорода.
2. **Логическая противоречивость:** механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами.

Спектральные серии



Элементы квантовой механики

Гипотеза де Бройля. Волновые свойства вещества



Луи де Бройль



Луи де Бройль предположил, что между корпускулярными (E, p) и волновыми (λ, ν) свойствами микрочастиц существует такая же связь, как у фотона:

$$E_{\phi} = h\nu \text{ -энергия фотона}$$

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{m_{\phi}c^2}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \text{ -импульс фотона}$$

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

-длина волны де Бройля

h - постоянная Планка

p - импульс электрона (или другой микрочастицы)

Определим дебройлевскую длину волны для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U=100\text{В}$.

$$\frac{mv^2}{2} = eU \rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \times 100}{9,1 \times 10^{-31}}} = 5,6 \times 10^6 \text{ м/с}$$

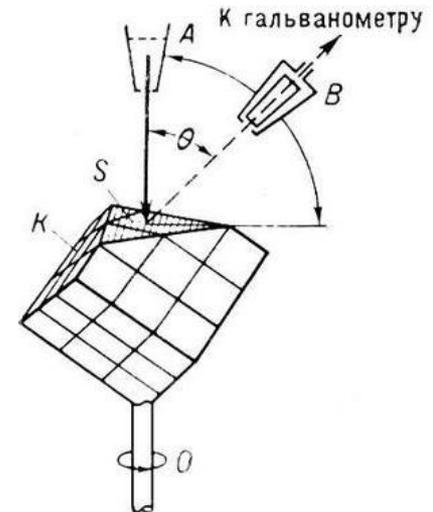
$$\lambda_B = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 5,9 \times 10^6} = 1,2 \times 10^{-10} \text{ м} \rightarrow \boxed{\lambda_B \approx \lambda_{\text{рент}}}$$

Гипотеза де Бройля была подтверждена многочисленными экспериментами (1927г.-Дэвиссон и Джермер, 1927г.- П.С.Тартаковский, Г.Томсон, 1948г.- В.А.Фабрикант).

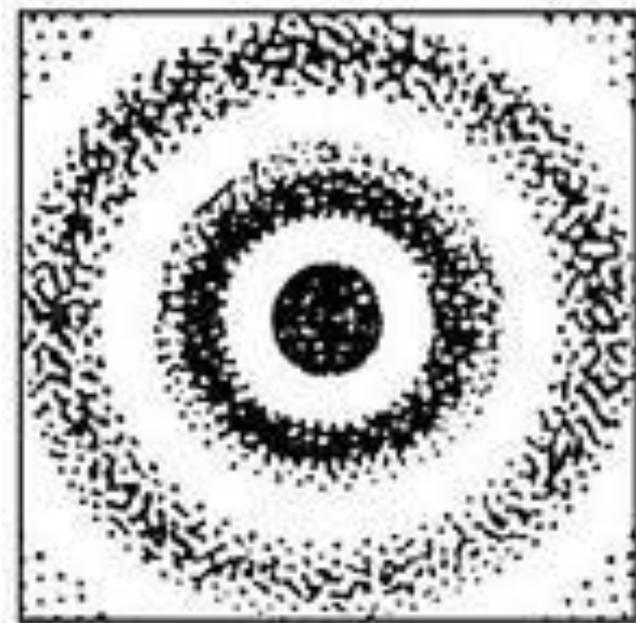
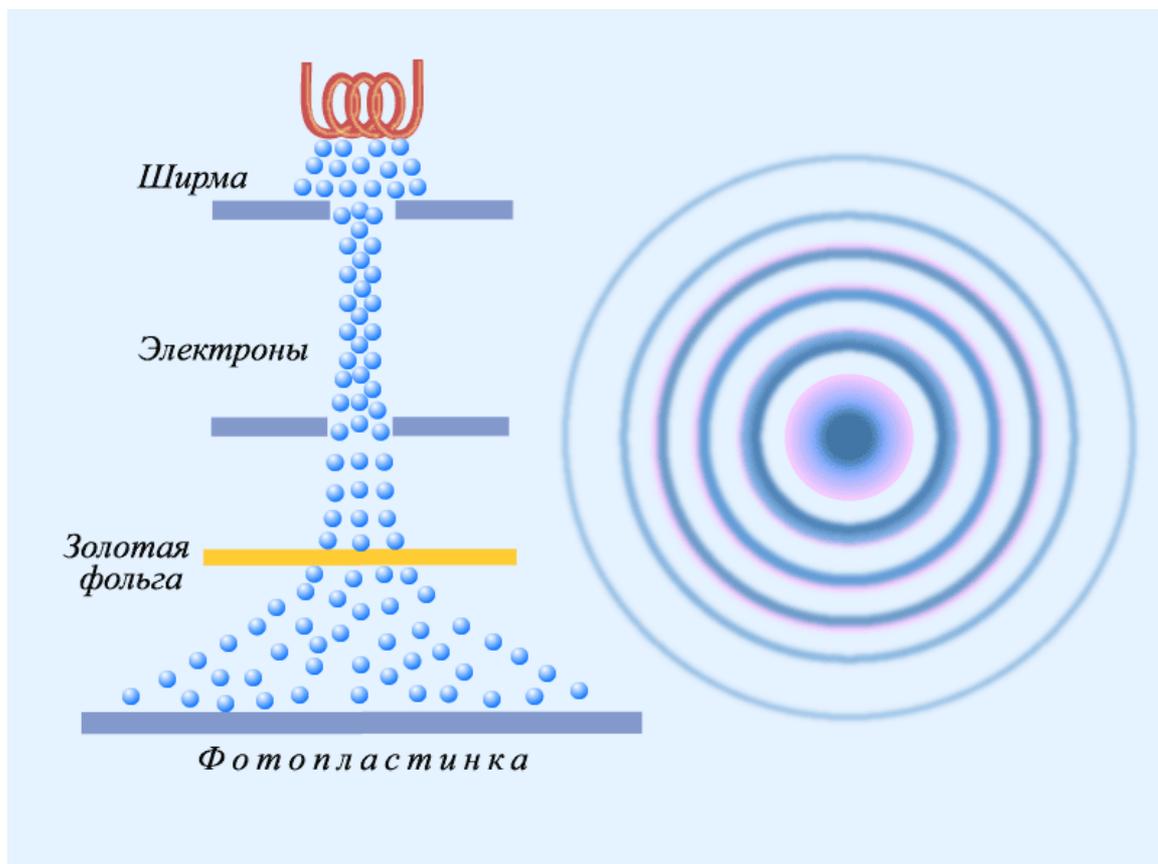
Опыты Дэвиссона и Джермера – **дифракция электронов** на кристаллах никеля. Дифракционные максимумы наблюдались в соответствии с формулой Вульфа-Брэгга

$$2d \sin \theta = k\lambda$$

$$\lambda = \lambda_B$$



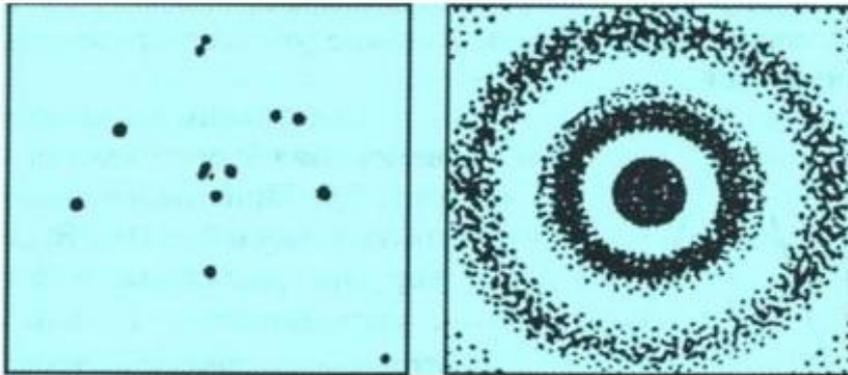
Волновые свойства электронов (опыт Дж. Томсона (1928 г.)



Дифракция одиночных электронов

Группа физиков во главе с В.А.Фабрикантом в СССР выполнила в 1949г **дифракционные исследования с очень слабым электронным пучком.**

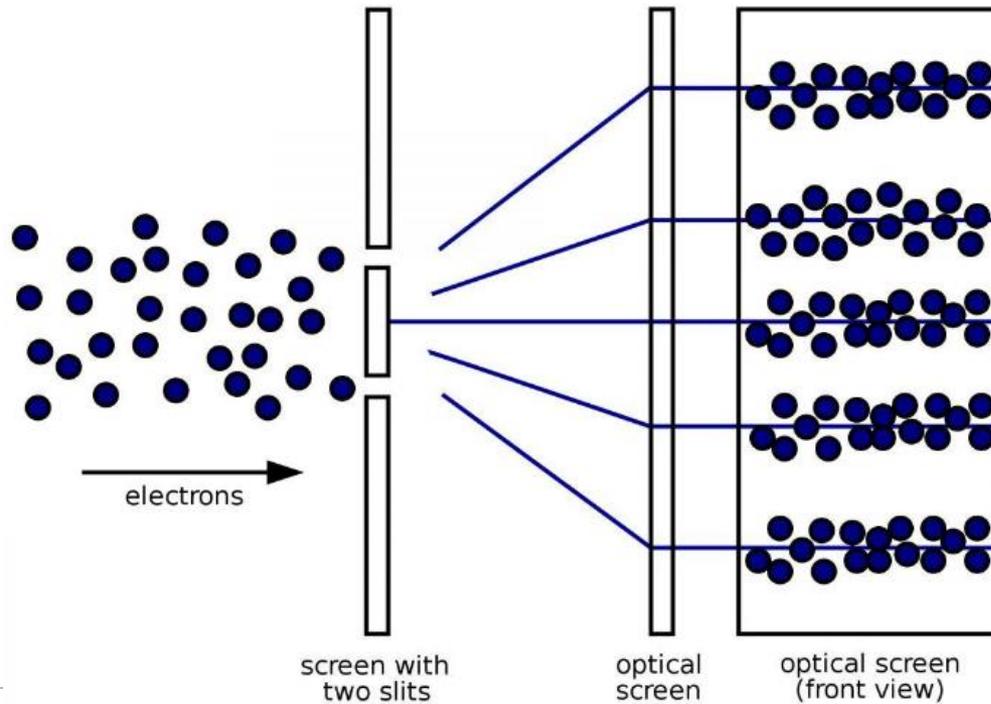
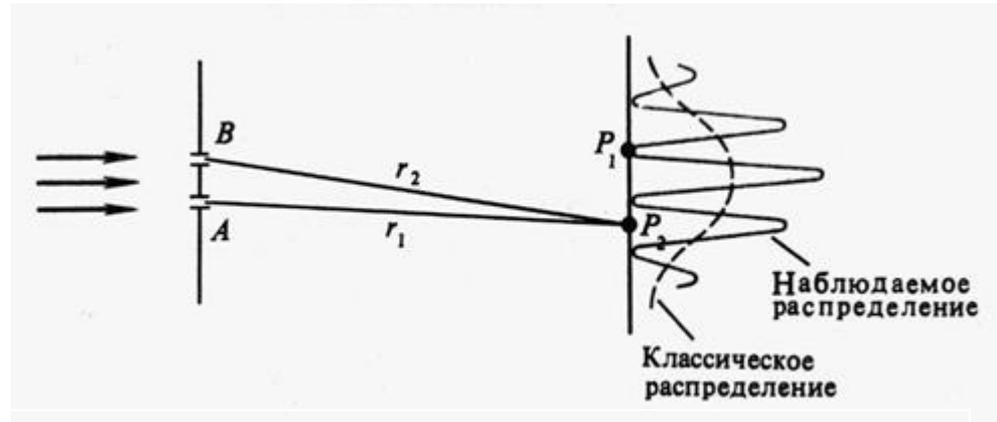
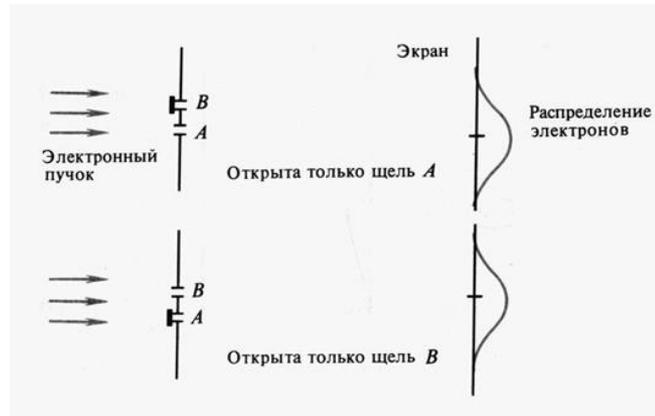
В этих опытах интервал времени между двумя последовательными прохождениями электронов через поликристалл в 81 раз превышал время, затрачиваемое одним электроном на прохождение всего прибора. Таким образом, взаимодействие электронов друг с другом полностью исключалось, и электроны дифрагировали поодиночке.



*Дифракция
одиночных
электронов*

***Волновые свойства присущи отдельному
электрону***

Дифракция электронного пучка на двух щелях



Дифракция электронов и др. микрочастиц доказывает справедливость гипотезы де Бройля и подтверждает корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц.

Дифракция электронов и др. микрочастиц лежит в основе принципа работы электронных, нейтронных, протонных микроскопов.



Любую из микрочастиц нельзя считать ни частицей, волной в классическом понимании.

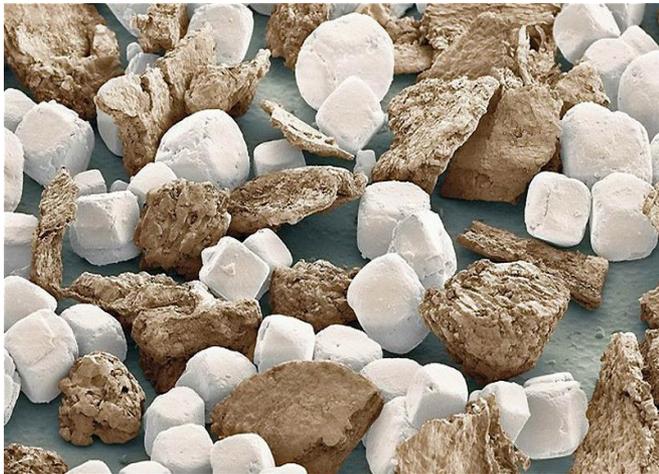


Для описания движения микрочастиц нельзя применять законы классической механики.



Снимки, сделанные при помощи сканирующего **электронного микроскопа**, в котором вместо обычных световых лучей используется пучок электронов. Это дает возможность получать изображения с разрешением всего в несколько нанометров.

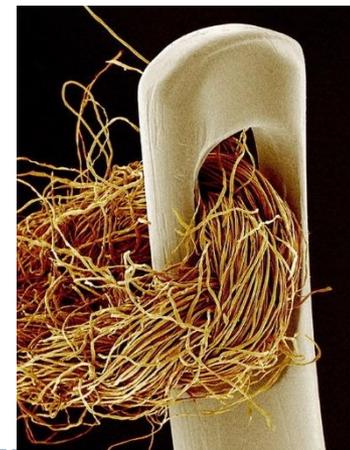
Эти разноцветные булыжники на самом деле крупницы соли и черного перца



Пыльца разных растений. Крупный объект в центре – пыльца тыквы



Игольное ушко с вдетой нитью



Пусть масса частицы $m=0.1$ г, а скорость $v=10$ м/с.

Тогда

$$\lambda_B = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} / (10^{-4} \text{ Кг} \cdot 10 \text{ м/с}) = 6.6 \cdot 10^{-29} \text{ м}.$$

Это невообразимо малая длина, на много порядков меньшая размеров атомов.

Следовательно для обычных макрочастиц длина волны де Бройля, практически, нулевая, и обнаружить волновые эффекты невозможно.



ТЕСТЫ

- 1) Наибольшая длина волны де Бройля частиц, движущихся с одинаковой скоростью, соответствует ...
- 1) электрону
 - 2) протону
 - 3) α -частице
 - 4) атому водорода
 - 5) длина волны де Бройля всех частиц одинакова

- 2) Если длина волны де Бройля одинакова, то наибольшей скоростью обладает ...
- 1) 1_1P 2) 0_1e 3) 1_0n 4) 4_2He 5) 1_1H



3) Протон и электрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов. Длины волн де Бройля этих частиц соотносятся между собой как ...

1) $\lambda_p < \lambda_e$

2) $\lambda_p = \lambda_e$

3) $\lambda_p > \lambda_e$

4) надо знать значения разности потенциалов

4) Отношение длин волн де Бройля электрона и протона, имеющих одинаковую скорость, равно ...

1) $\frac{m_p}{m_e}$

2) $\frac{m_e}{m_p}$

3) $\left(\frac{m_e}{m_p}\right)^2$

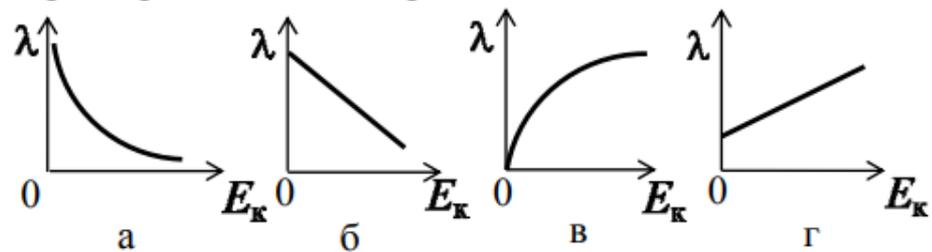
4) $\left(\frac{m_p}{m_e}\right)^2$

5) 1



5)

Зависимость длины волны де Бройля от кинетической энергии частицы верно представлена на рис. ...



Соотношения неопределенностей



Вернер
Гейзенберг
(1901–1976)

В классической физике положение частицы определяется координатами (x, y, z) а состояние импульсом частицы – импульсом \mathbf{p} .

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z$$

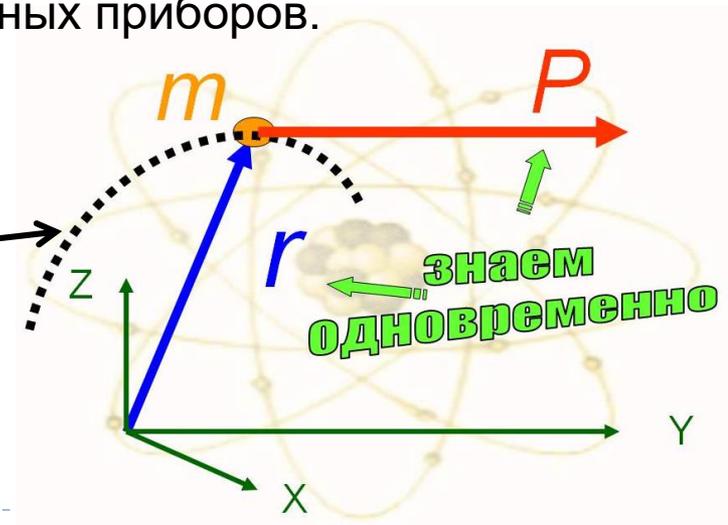
$$\Delta p$$

в классической физике это **погрешности** измерения физических величин

в квантовой механике это **неопределенности** в определении физических величин

В классической физике погрешности измерения физических величин $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ определяются совершенством измерительных приборов.

Можно **одновременно** точно определить и **координаты частицы**, и ее **импульс** (классическая частица движется по определенной траектории).



В квантовой механике существуют **принципиальные ограничения на точность измерения физических величин**, которые не связаны с несовершенством измерительных приборов, а являются следствием **двойственной корпускулярно-волновой природы**.

Для микрочастиц нельзя

- *одновременно точно определить координаты и импульс*
- *понятие траектории неприменимо*

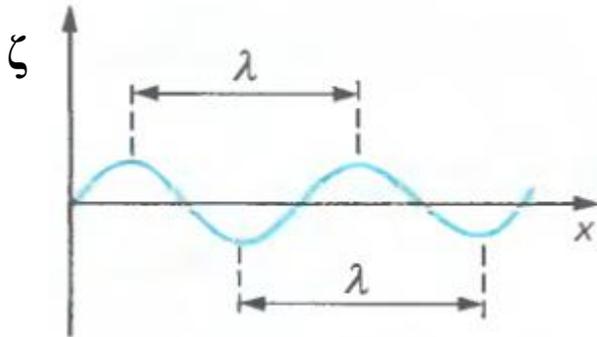
Микрочастицы проявляют волновые свойства.

Волна представляет собой протяженный объект, «заполняющий» определенную область пространства



Волновая функция частицы с точно определенным импульсом

Пример 1. Монохроматическая волна.

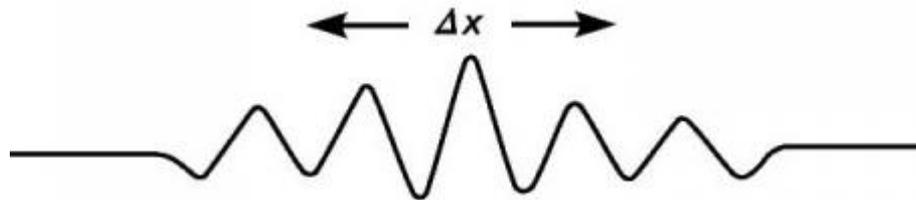


$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Если $\lambda = const$, то $p = const$  $\Delta p = 0$

$$\Delta x = \infty$$

Пример 2. Локализованная в некотором интервале волна – **волновой пакет**.



Волновой пакет образует суперпозицию монохроматических волн с различными значениями длин волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$

Интервалу $\Delta\lambda$ соответствует интервал Δp , причем, чем уже Δx , тем более широкий интервал $\Delta\lambda$ и Δp .

В пределе при $\Delta x \rightarrow 0$ имеем $\Delta p = \infty$.

Увеличение в определенности локализации волны (уменьшение в неопределенности координаты) связано с одновременным возрастанием в неопределенности импульса.

$$\left. \begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &\geq h \\ \Delta y \Delta p_y &\geq h \\ \Delta z \Delta p_z &\geq h \end{aligned} \right\} \text{Соотношения неопределенностей} \\ \text{координат и импульса (Гейзенберг)}$$

$\Delta E \Delta t \geq h$ - соотношение неопределенности энергии и времени



Пример 3

Пучок электронов движется со скоростью

$$v_x = 10^8 \text{ м/с}$$

$$\Delta v_x \approx 10^4 \text{ м/с}$$

$$\Delta x = \frac{h}{m\Delta v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 10^4} = 7,27 \times 10^{-6} \text{ м}$$

, т.е. положение электрона может быть определено до тысячных долей миллиметра

Можно говорить о движении электрона по определенной траектории

Движение электрона можно описывать законами классической механики

Пример 4

Электрон, движущийся в атоме водорода имеет скорость $v_x \approx 2,3 \times 10^6 \text{ м/с}$

Неопределенность координаты порядка размеров самого атома $\Delta x \approx 10^{-10} \text{ м}$

$$\Delta v = \frac{h}{m\Delta x} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 10^{-10}} = 7,27 \times 10^6 \text{ м/с}$$

Неопределенность скорости в несколько раз больше самой скорости!

Нельзя говорить о движении электрона по определенной траектории и применять законы классической механики

Вывод: Соотношение неопределенностей является квантовым ограничением применимости классической механике к микрообъектам.

Волновая функция

Состояние микрочастицы в квантовой механике задает **волновая функция**.

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)e^{-i\omega t} \quad \text{- волновая функция или «пси»-функция}$$

Для стационарных состояний волновая функция не зависит от времени $\psi(x, y, z)$

Физический смысл имеет не сама ψ -функция, а квадрат ее модуля:

$$|\psi(x, y, z)|^2 \quad \text{- **плотности вероятности**, т.е. вероятность нахождения частицы в единице объема в окрестности точки, имеющей координаты } x, y, z.$$

$$|\psi(x, y, z)|^2 \Delta V \quad \text{- вероятность нахождения частицы в некоторой точке объема } \Delta V$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1,$$



Функция ψ должна быть:

- **конечной** (вероятность не может быть больше единицы);
- **однозначной** (вероятность не может быть неоднозначной величиной);
- **непрерывной** (вероятность не может меняться скачком);

непрерывными должны быть также **частные производные волновой функции**

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \frac{\partial \Psi}{\partial y} \text{ и } \frac{\partial \Psi}{\partial z}$$

Волновая функция ψ является основной характеристикой состояния микробиъектов.

Например, среднее расстояние электрона от ядра вычисляется по формуле

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r |\Psi|^2 dV$$

