# Раздел 5. Элементы квантовой механики и физики атомов, молекул, твердых тел

## *Лекция 11.*

## *Атом Резерфорда – Бора и гипотеза де Бройля*

*11.1. Опыты Резерфорда и ядерная модель атома*

*11.2. Постулаты Бора. Экспериментальное подтверждение постулатов Бора*

*11.3. Теория Бора для водородоподобных систем и её принципиальные недостатки*

*11.4. Гипотеза де Бройля и её экспериментальные подтверждения*

# 11.1. Опыты Резерфорда и ядерная модель атома

В 1833 году при исследовании явления электролиза *М. Фарадей* установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц – ионов. *Фарадей* определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Приближенное значение которого оказалось равным $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл. На основании исследований *Фарадея* можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

Важным свидетельством сложной структуры атомов явились спектроскопические исследования, которые привели к открытию линейчатых спектров атомов. В начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атомов водорода в видимой части спектра, и впоследствии были установлены математические закономерности, связывающие длины волн этих линий (*И. Бальмер*, 1885 г.).

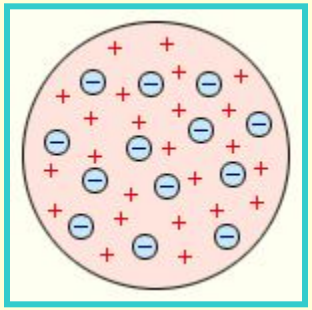
В 1896 году *А. Беккерель* обнаружил явление испускания атомами невидимых проникающих излучений, названное радиоактивностью. В последующие годы было обнаружено, что атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы (*альфа*-, *бета*- и *гамма-лучи*). *Альфа-лучи* оказались потоком *ионов гелия*. *Бета-лучи* – потоком *электронов*, а *гамма-лучи* – потоком квантов жесткого рентгеновского излучения.

В 1897 году *Дж. Томсон* открыл электрон и измерил отношение $e/m$ заряда электрона к массе. Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов.

Таким образом, на основании всех известных к началу XX века экспериментальных фактов можно было сделать вывод о том, что атомы вещества имеют сложное внутреннее строение. Они представляют собой электронейтральные системы, причем носителями отрицательного заряда атомов являются легкие электроны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.

Перед наукой встал вопрос о внутреннем строении атомов.

Первая попытка создания модели атома на основе накопленных экспериментальных данных принадлежит *Дж. Томсону* (1903 г.). Он считал, что атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом примерно равным $10^{-10}$ м. Положительный заряд атома равномерно распределен по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него. Для объяснения линейчатых спектров испускания атомов Томсон пытался определить расположение электронов в атоме и рассчитать частоты их колебаний около положений равновесия. Однако эти попытки не увенчались успехом.



Модель атома Дж. Томсона

Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены Э. Резерфордом и его сотрудниками *Э. Марсденом и Х. Гейгером* в 1909–1911 годах. Он предложил применить зондирование атома с помощью $\alpha$-частиц. Масса $\alpha$-частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах *Резерфорд* использовал $\alpha$-частицы с кинетической энергией около 5 МэВ. $\alpha$-частицы были открыты Резерфордом в 1899 году при изучении явления радиоактивности. Этими частицами бомбардировались атомы золото, серебро, медь и др. Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию $\alpha$-частицы.

Рассеяние, то есть изменение направления движения $\alpha$-частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.

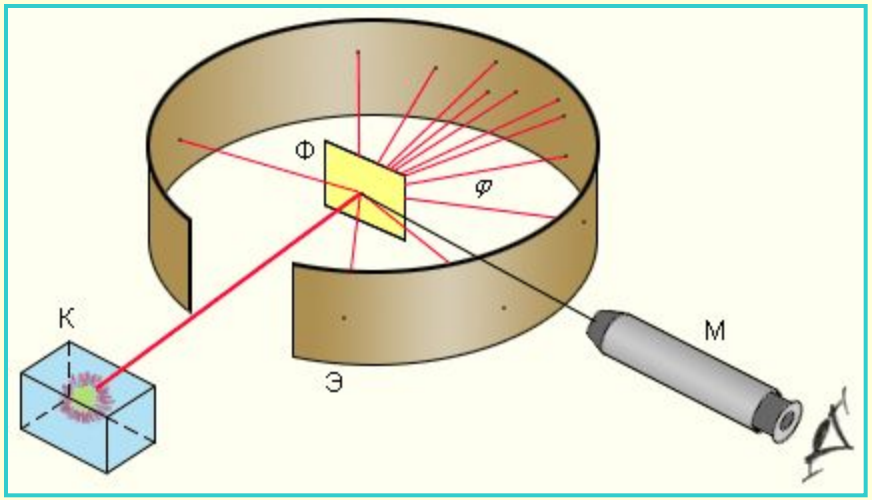
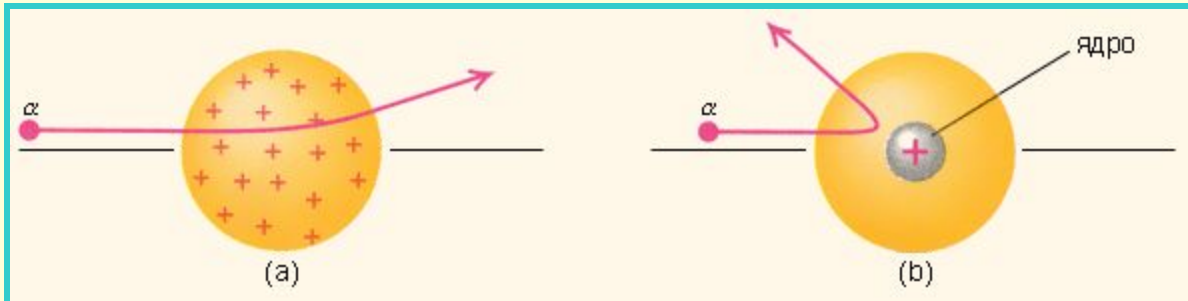



***Схема опыта Резерфорда по рассеянию α-частиц.***
К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком, Ф – золотая фольга, М – микроскоп.

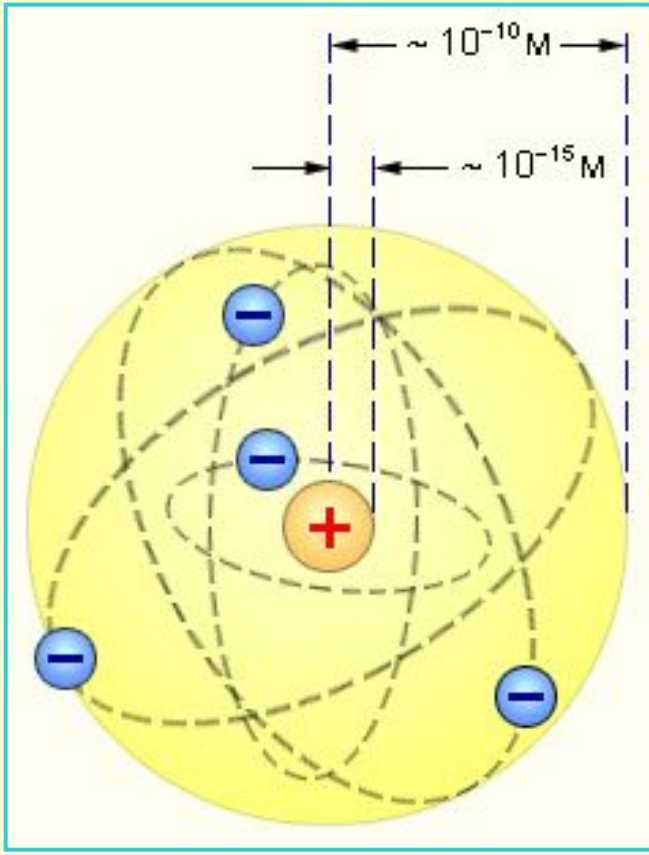
Наблюдения рассеянных α-частиц в опыте Резерфорда можно было проводить под различными углами φ к первоначальному направлению пучка. Было обнаружено, что большинство α-частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие 30°. Очень редкие α-частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к 180°.

Электрическое поле однородного заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в $n$ раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на α-частицу по закону Кулона, возросла бы в $n^2$ раз. Следовательно, при достаточно большом значении $n$ α-частицы могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до 180°. Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал ***атомным ядром***. Так возникла ***ядерная модель*** атома.




Рассеяние α-частицы в атоме Томсона и в атоме Резерфорда

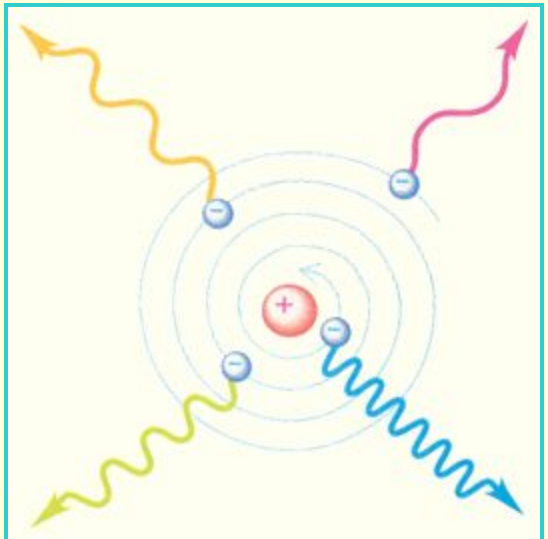
Опыты Резерфорда и его сотрудников привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает $10^{-14}$–$10^{-15}$ м. Это ядро занимает только $10^{-12}$ часть полного объема атома, но содержит ***весь*** положительный заряд и 99,95 % его массы и иметь плотность порядка $\rho \approx 10^{15}$ г/см$^3$. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома.




Результаты опытов были слишком радикальны и Резерфорд опубликовал свои результаты только через два года (в 1911 г.) после выполнения первых экспериментов. Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил ***планетарную модель атома***. Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Вокруг ядра, подобно планетам, вращаются под действием кулоновских сил со стороны ядра электроны. Находиться в состоянии покоя электроны не могут, так как они упали бы на ядро.

# 11.2. Постулаты Бора. Экспериментальное подтверждение постулатов Бора

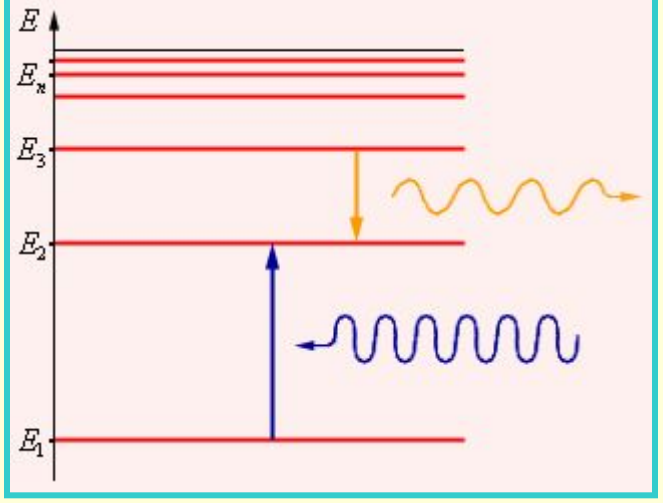
Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом, несомненно явилась крупным шагом в развитии знаний о строении атома. Она была совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеянию $\alpha$-частиц. Однако она оказалась неспособной объяснить сам факт длительного существования атома, т.е. его устойчивость. По законам классической электродинамики, движущийся с ускорением заряд должен излучать электромагнитные волны, уносящие энергию. За короткое время (порядка $10^{-8}$ с) все электроны в атоме Резерфорда должны растратить всю свою энергию и упасть на ядро. То, что этого не происходит в устойчивых состояниях атома, показывает, что внутренние процессы в атоме не подчиняются классическим законам.

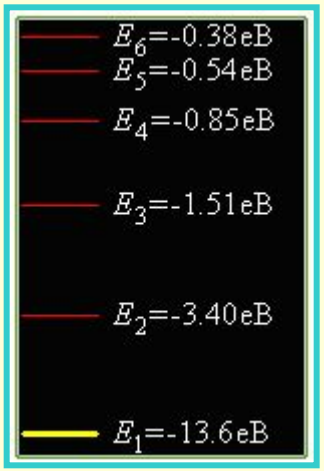


Следующий шаг в развитии представлений об устройстве атома сделал в 1913 году выдающийся датский физик *Н. Бор*. Проанализировав всю совокупность опытных фактов, Бор пришел к выводу, что при описании поведения атомных систем следует отказаться от многих представлений классической физики. Он сформулировал постулаты, которым должна удовлетворять новая теория о строении атомов.

***Первый постулат Бора*** **(постулат стационарных состояний)** гласит: **атомная система может находится только в особых *стационарных* или *квантовых* состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия $E_n$. В стационарных состояниях атом не излучает.**

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущегося электрона может быть любой. Он находится в противоречии и с электродинамикой, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн. Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой ***энергетических уровней***, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию. Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n < 0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра (ионизация). Величина $|E_1|$ называется ***энергией ионизации***. Состояние с энергией $E_1$ называется ***основным состоянием*** атома.




***Второй постулат Бора*** (***правило частот***) формулируется следующим образом: **при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией $E_n$ в другое стационарное состояние с энергией $E_m$ излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:** $h\nu_{nm} = E_n - E_m$, где $h$ – постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

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

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

Теория Бора не отвергла полностью законы классической физики при описании поведения атомных систем. В ней сохранились представления об орбитальном движении электронов в кулоновском поле ядра. Классическая ядерная модель атома Резерфорда была дополнена в теории Бора идеей о квантовании электронных орбит. Поэтому теорию Бора иногда называют ***полуклассической***.

# Постулаты Бора

1. *Электрон в атоме может двигаться только по определенным стационарным орбитам*, каждой из которых можно приписать определенный номер $n$ = 1, 2, 3,… Такое движение соответствует стационарному состоянию атома с неизменной полной энергией En. Это означает, что движущийся по стационарной замкнутой орбите электрон, вопреки законам классической электродинамики, не излучает энергии.
2. *Разрешенными стационарными орбитами являются только те, для которых угловой момент импульса L электрона равен целому кратному величины постоянной Планка* $\hbar$. Поэтому для n-ой стационарной орбиты выполняется условие квантования $L = n\hbar$, n = 1, 2, 3,…
3. *Излучение или поглощение кванта излучения происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое*. При этом частота $\omega$ излучения атома определяется разностью энергий атома в двух стационарных состояниях, так что

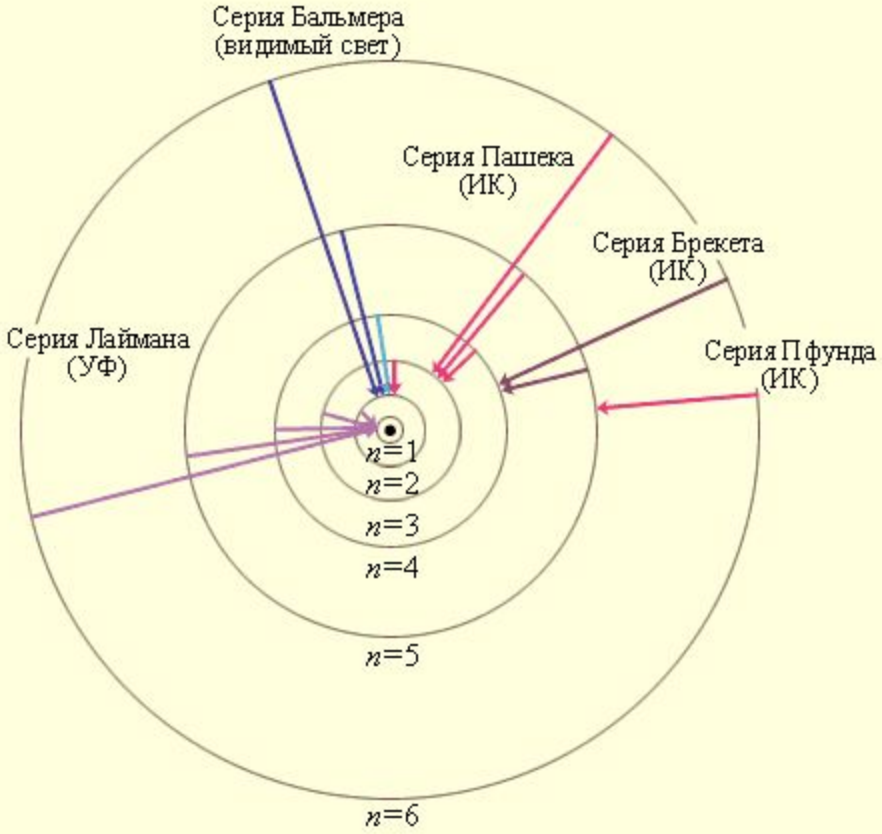
$$\hbar\omega_n k = E_k - E_n,\ k > n.$$

# *Атом водорода. Линейчатые спектры*

*Простейший из атомов, атом водорода явился своеобразным тест-объектом для теории Бора. Ко времени создания теории Бора атом водорода был хорошо изучен экспериментально.* Еще в начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атома водорода в видимой области (так называемый *линейчатый спектр*). Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо изучены количественно (И. Бальмер, 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в видимой части спектра была названа *серией Бальмера*. Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. В 1890 году И. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

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

Для серии *Бальмера* $m = 2$, $n = 3, 4, 5, \ldots$ . Для ультрафиолетовой серии (серия Лаймана) $m = 1$, $n = 2, 3, 4, \ldots$ . Постоянная $R$ в этой формуле называется ***постоянной Ридберга***. Ее численное значение $R = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ Гц. До Бора механизм возникновения линейчатых спектров и смысл целых чисел, входящих в формулы спектральных линий водорода (и ряда других атомов), оставались непонятными.




Стационарные орбиты атома водорода и образование спектральных серий

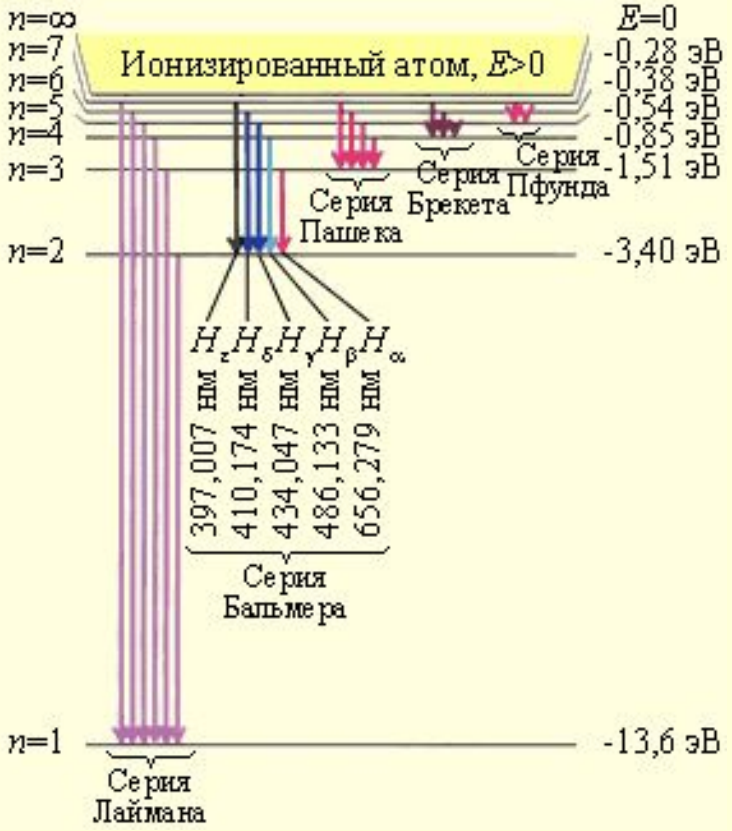



Диаграмма энергетических уровней атома водорода. Показаны переходы, соответствующие различным спектральным сериям. Для первых пяти линий серии Бальмера в видимой части спектра указаны длины волн

# 11.3. Теория Бора для водородоподобных систем и её принципиальные недостатки

Правило квантования, приводящее к правильным, согласующимся с опытом значениям энергий стационарных состояний атома водорода, было угадано Бором. Бор предположил, что момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка.

Запишем условие вращения электрона массы $m_0$ по круговой орбите радиуса $r$ под действием кулоновской силы со стороны ядра и формулу Бора квантования момента импульса электрона

$$\begin{cases} \dfrac{m_0 v^2}{r} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \dfrac{e^2}{r^2} \\ m_0 v r = n\hbar \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим для радиусов допустимых (стационарных) орбит электрона в атоме водорода следующее выражение

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2 n^2}{m_0 e^2}, \quad n = 1,\ 2, \ldots$$

Вводя в качестве универсальной константы теории боровский радиус

$$a = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2} = 0{,}529 \cdot 10^{-10}\ \text{м}$$

как радиус первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода, тогда

$$r_n = an^2,\ n = 1,\ 2,\ 3\ldots$$

Полная энергия электрона, движущегося по *n*-ой стационарной орбите, складывается из его кинетической энергии

$$E_K = \frac{m_0 v_n^2}{2} = \frac{m_0 e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2}$$

и потенциальной энергии кулоновского взаимодействия электрона с ядром

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} = -\frac{m_0 e^4}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2}$$

Получаем важную формулу теории Бора - формулу квантования энергии электрона в атоме водорода

$$E = E_K + U = -\frac{m_0 e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13{,}6}{n^2} \text{ эВ}$$

Полная энергия электрона в атоме оказалась отрицательной, так как, по определению, отрицательна потенциальная электростатическая энергия взаимодействия электрона с ядром. С ростом номера орбиты полная энергия электрона в атоме возрастает. При этом номер орбиты n является квантовым числом в такой теории.

Согласно второму постулату Бора, при переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией $E_n$ на другую стационарную орбиту с энергией $E_m < E_n$ атом испускает квант света, частота $\nu_{nm}$ которого равна $\Delta E_{nm}/h$:

$$\nu_{nm} = \frac{\Delta E_{nm}}{h} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Эта формула в точности совпадает с эмпирической формулой Ридберга для спектральных серий атома водорода, если положить постоянную $R$ равной

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}.$$

Подстановка числовых значений $m_e$, $e$, $\varepsilon_0$ и $h$ в эту формулу дает результат

$$R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \text{Гц},$$

который очень хорошо согласуется с эмпирическим значением $R$.

Успехи теории Бора в объяснении спектральных закономерностей в изучении атома водорода были поразительны. Стало ясно, что атомы – это квантовые системы. Энергетические уровни стационарных состояний атомов дискретны. Почти одновременно с созданием теории Бора было получено прямое экспериментальное доказательство существования стационарных состояний атома и квантования энергии. Дискретность энергетических состояний атома была продемонстрирована в опыте *Д. Франка и Г. Герца* (1913 г.), в котором исследовалось столкновение электронов с атомами ртути. Оказалось, что если энергия электронов меньше 4,9 эВ, то их столкновение с атомами ртути происходит по закону абсолютно упругого удара. Если же энергия электронов равна 4,9 эВ, то столкновение с атомами ртути приобретает характер неупругого удара, т. е. в результате столкновения с неподвижными атомами ртути электроны полностью теряют свою кинетическую энергию. Это означает, то атомы ртути поглощают энергию электрона и переходят из основного состояния в первое возбужденное состояние,

$$E_2 - E_1 = 4{,}9 \text{ эВ}.$$

Согласно боровской концепции, при обратном самопроизвольном переходе атома ртуть должна испускать кванты с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 1{,}2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

Спектральная линия с такой частотой действительно была обнаружена в ультрафиолетовой части спектра в излучении атомов ртути.

# 11.4. Гипотеза де Бройля и её экспериментальные подтверждения

Установление корпускулярно-волнового дуализма в оптических явлениях имело очень большое значение для дальнейшего развития физики. Впервые была выявлена двойственная - корпускулярно-волновая - природа физического объекта - электромагнитного излучения. Естественно было ожидать, что подобная двойственность может не ограничиваться только оптическими явлениями.

В 1924 г французский физик *Луи де Бройль* выдвинул гипотезу, согласно которой корпускулярно-волновой дуализм имеет универсальный характер. Согласно *гипотезе де Бройля* каждая материальная частица обладает волновыми свойствами, причем соотношения, связывающие волновые и корпускулярные характеристики частицы остаются такими же, как и в случае электромагнитного излучения. Напомним, что энергия E и импульс p фотона связаны с круговой частотой ω и длиной волны λ соотношениями

$$E = \hbar\omega,\ p = k\hbar = 2\pi\hbar/\lambda.$$

По гипотезе де Бройля движущейся частице, обладающей энергией $E$ и импульсом $p$, соответствует волновой процесс, частота которого равна $\omega = E/\hbar$, а длина волны

$$\lambda_Б = 2\pi\hbar/p$$

Как известно, плоская волна с частотой ω, распространяющаяся вдоль оси x, может быть представлена в комплексной форме

$\xi(x,t) = A\exp[-i(\omega t - kx)]$, где $A$ – амплитуда волны, а $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Согласно гипотезе де Бройля свободной частице с энергией E и импульсом p, движущейся вдоль оси x, соответствует плоская волна $\Psi(x,t) = A\exp[-i(Et - px)/\hbar]$, распространяющаяся в том же направлении и описывающая волновые свойства частицы. Эту волну называют *волной де Бройля*.

Найдем длину волны *де Бройля* у макроскопического, но достаточно малого объекта - пылинки, масса которой $m = 10^{-9}$ г, а скорость $\upsilon = 1$ мм/с .

$$\lambda_Б = 2\pi\hbar/m\upsilon = 6{,}6\text{x}10^{-22} \text{ м}.$$

Найденная длина волны значительно меньше не только размеров самой пылинки, но и наименьшего известного в физике размера - радиуса ядра, составляющего по порядку величины $10^{-15}$ м.

Поскольку никакого принципиального различия между микро- и макрообъектами не существует, то возникает вопрос: в каких случаях волновые свойства играют решающую роль в поведении частицы, а в каких случаях они оказываются несущественными и их можно не учитывать? Для того, чтобы ответить на этот вопрос, воспользуемся аналогией с оптикой. Как известно, волновая природа излучения максимальным образом проявляется в тех случаях, когда длина волны излучения $\lambda$ сравнима с характерными размерами системы $L$, т.е. $\lambda \sim L$. Если же $\lambda << L$, то волновые свойства излучения становятся несущественными и можно пользоваться геометрической или лучевой оптикой.

В силу аналогии, существующей между механическими и оптическими явлениями, классическая ньютоновская механика соответствует геометрической оптике, а квантовая или, как ее еще называют, волновая механика - волновой оптике. Таким образом, волновые свойства частиц будут наиболее ярко проявляться в тех случаях, когда дебройлевская длина волны частицы сравнима с характерными размерами области движения частицы $L$, т.е. $\lambda_Б \sim L$. Дебройлевская длина волны электрона $\lambda_Б$, размеры атома и расстояние между атомами в кристалле имеют один и тот же порядок величины. Это означает, что при взаимодействии электронов с атомами, а также при их движении в твердых телах волновые свойства электронов будут проявляться максимальным образом. В тех же случаях, когда $\lambda_Б << L$, как, например, для рассмотренной выше пылинки, волновые свойства частицы становятся несущественными, и для описания движения таких объектов необходимо пользоваться законами классической механики.

*Бор* не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования. Это было сделано десятилетием позже *де Бройлем* на основе представлений о волновых свойствах частиц. *Де Бройль* предложил, что каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по окружности около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. Другими словами, стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне *де Бройля* на длине орбиты. Это явление очень похоже на стационарную картину стоячих волн в струне с закрепленными концами.

В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн $\lambda$, т.е.

$$n\lambda_n = 2\pi r_n.$$

Подставляя в это соотношение длину волны де Бройля $\lambda = h/p$, где $p = m_e\upsilon$ – импульс электрона, получим:

$$n\frac{h}{m_e\upsilon} = 2\pi r_n \quad \text{или} \quad m_e\upsilon r_n = n\frac{h}{2\pi}.$$

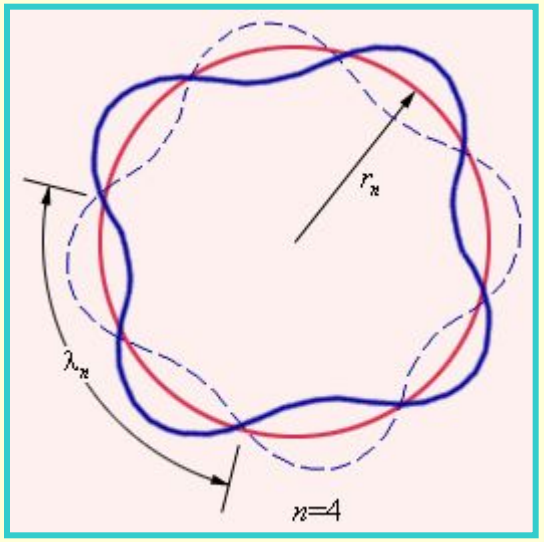
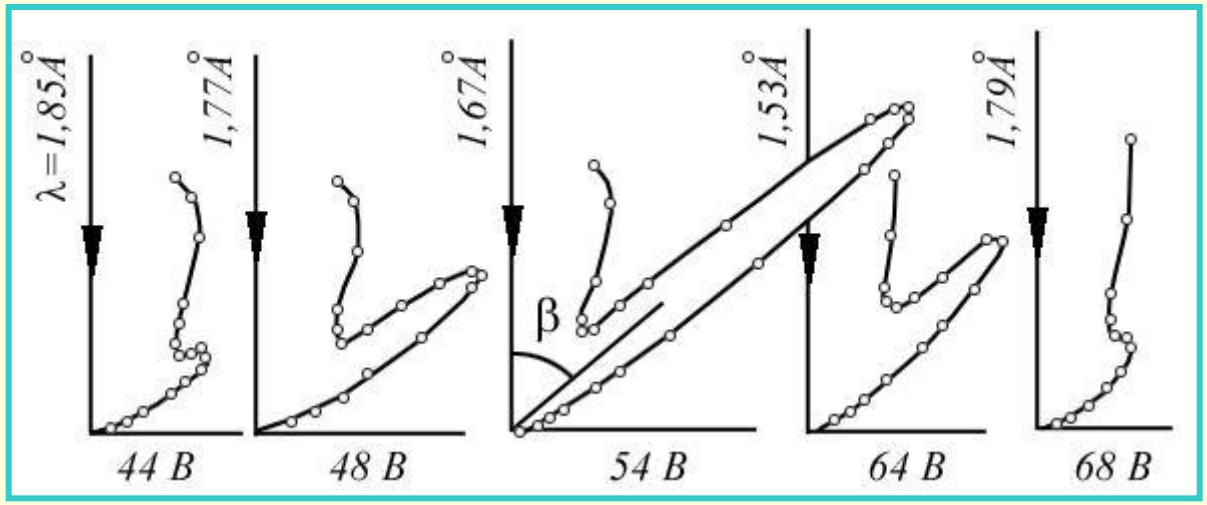



Иллюстрация идеи де Бройля возникновения стоячих волн на стационарной орбите для случая $n = 4$

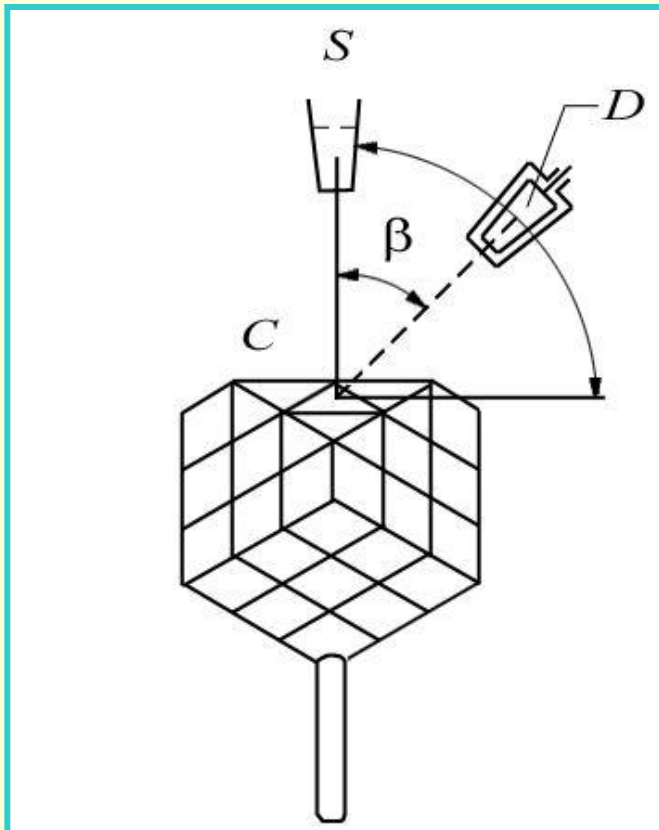
# *Экспериментальные подтверждения гипотезы де Бройля*

Первые экспериментальные исследования, подтвердившие волновую природу частиц, были выполнены американскими физиками *К. Дэвиссоном* и *Л. Джермером*, а также независимо английским физиком *Дж. П. Томсоном* в 1927г. В этих работах использовалась дифракция электронов на кристаллической решетке. Прежде чем перейти к подробному описанию этих экспериментов, отметим следующее. Как уже обсуждалось выше, дебройлевская длина волны электрона при не очень большом значении ускоряющей разности потенциалов (~100 В) по порядку величины составляет $10^{-10}$ м. Этот же порядок величины характерен для расстояния между атомными плоскостями в кристалле. Поэтому, так же, как и в случае рентгеновских лучей, кристалл может играть роль дифракционной решетки для электронных волн.

*Дэвиссон* и *Джермер* исследовали дифракцию электронов на монокристалле никеля, кристаллическая структура которого была известна из опытов по дифракции рентгеновских лучей. Электроны от электронной пушки *S*, прошедшие ускоряющую разность потенциалов *U*, падали нормально на сошлифованную поверхность кристалла никеля *C*. С помощью детектора *D* исследовалось число электронов, отраженных от кристалла под углом *β* при различных значениях *U*. Напомним, что разным значениям *U*, соответствуют разные дебройлевские длины волн электронов.




*Динамика дифракционного отражения электронов при изменении ускоряющей разности потенциалов U*



В опытах *Дэвиссона* и *Джермера* максимальное отражение электронов наблюдалось при ускоряющей разности потенциалов $U$ = 54 В , что соответствует дебройлевской длине волны $\lambda_Б = 2\pi\hbar(2m_e eU)^{-1/2}$ = 0,167 нм.

Длина волны, определяемая из условия *Брэгга-Вульфа* $2d\sin\theta_{БВ} = n\lambda_Б$ для постоянной решетки никеля $d = 2{,}15\text{x}10^{-10}$ м равнялась $\lambda_Б$ = 0,165 нм. Это совпадение экспериментальных и расчетных значений $\lambda_Б$ служит прекрасным подтверждением гипотезы де Бройля о наличии у частиц волновых свойств.

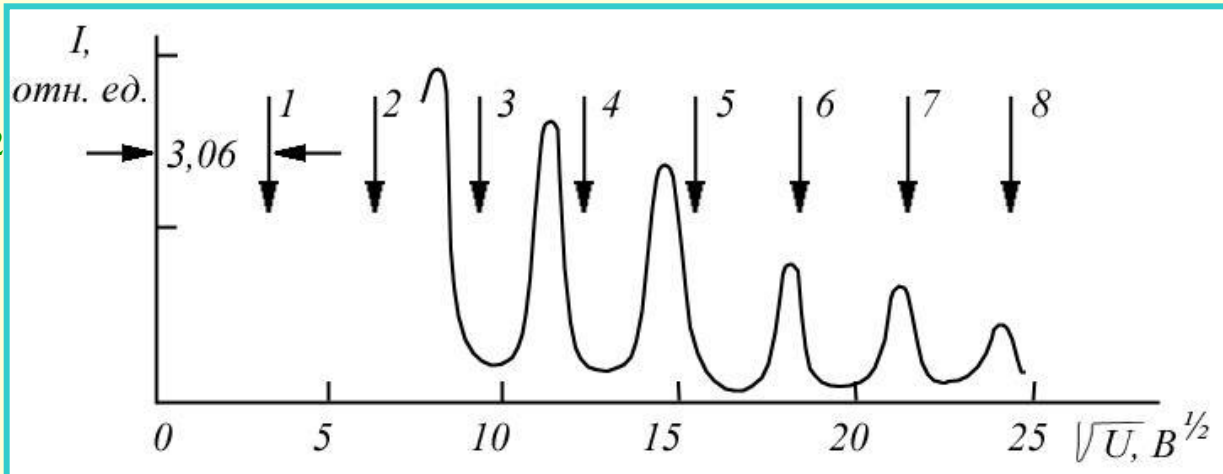
*Дэвиссоном* и *Джермером* была также измерена интенсивность дифрагировавших электронов при фиксированном угле отражения $\beta$ (постоянном угле скольжения $\theta_Б$) в зависимости от ускоряющей разности потенциалов $U$. Наблюдаемые на эксперименте максимумы отражения отстоят друг от друга на равном по шкале $(U)^{1/2}$ расстоянии, что подтверждается и в теории.

$$\lambda_Б = 2\pi\hbar(2m_e eU)^{-1/2}$$

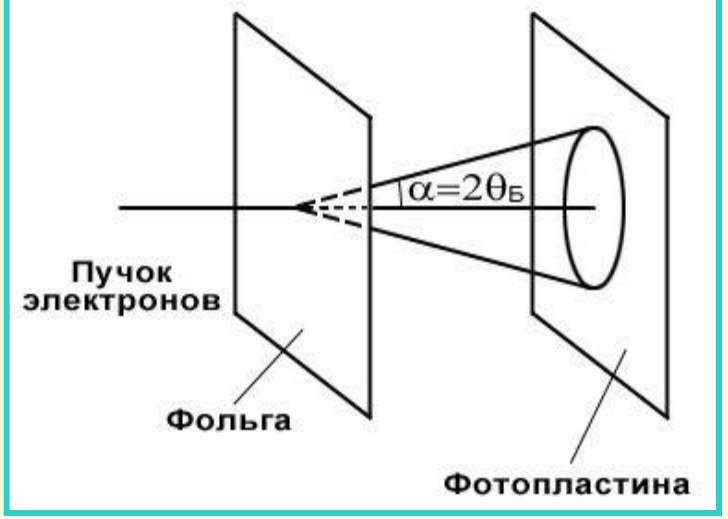
$$2d\sin\theta_{БВ} = n\lambda_Б$$

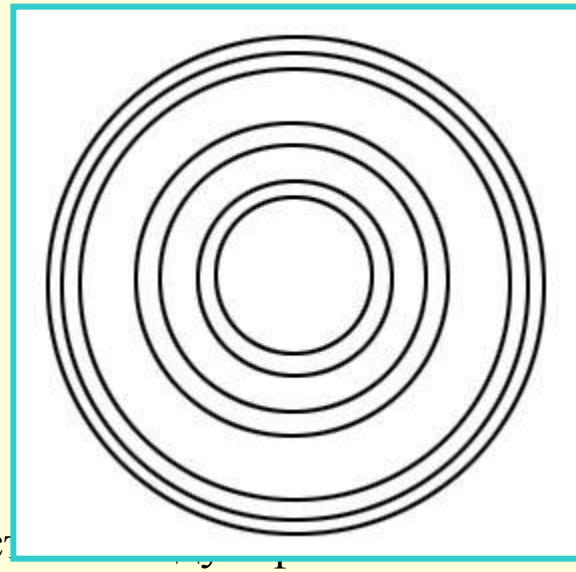
$$2d\sin\theta_{БВ} = n2\pi\hbar(2m_e eU)^{-1/2}$$

$$\sqrt{U_n} = \frac{\pi\hbar}{d\sin\theta_Б\sqrt{2em_e}}n = const\cdot n,$$



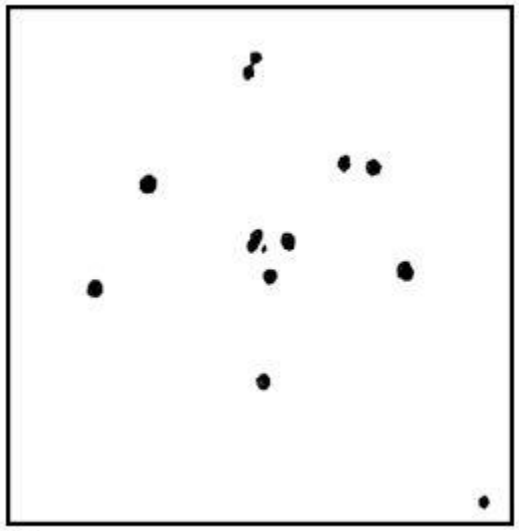
В экспериментах *Дж. Томсона* исследовалась *дифракция электронов на поликристаллическом образце*. Коллимированный пучок моноэнергетических электронов падал нормально на тонкую металлическую поликристаллическую фольгу. На фотопластине, расположенной за фольгой, электроны образовывали дифракционную картину в виде тонких концентрических колец. Поясним, почему при дифракции на поликристаллическом образце на фотопластине получаются дифракционные кольца.

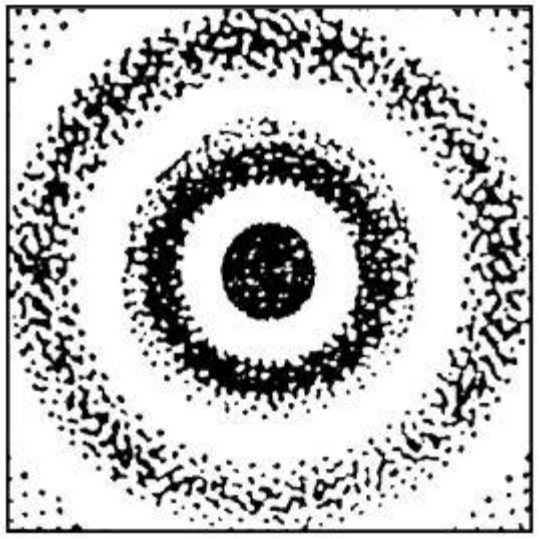


При анализе дифракции электронов на поликристалле возник следующий вопрос: можно было допустить, что дифракцию испытывают не электроны, а вторичное рентгеновское излучение, испускаемое атомами кристалла под действием электронного пучка. Для того чтобы однозначно установить природу дифрагировавших частиц (электроны или рентгеновские кванты), в област… фотопластинкой было создано магнитное поле. Если дифракцию испытывают электроны, то они будут отклоняться магнитным полем, что приведет к искажению дифракционной картины. Если же дифрагирует рентгеновское излучение, то система колец должна остаться без изменений. Эксперимент с магнитным полем показал, что дифракционное отражение испытывают именно электроны.

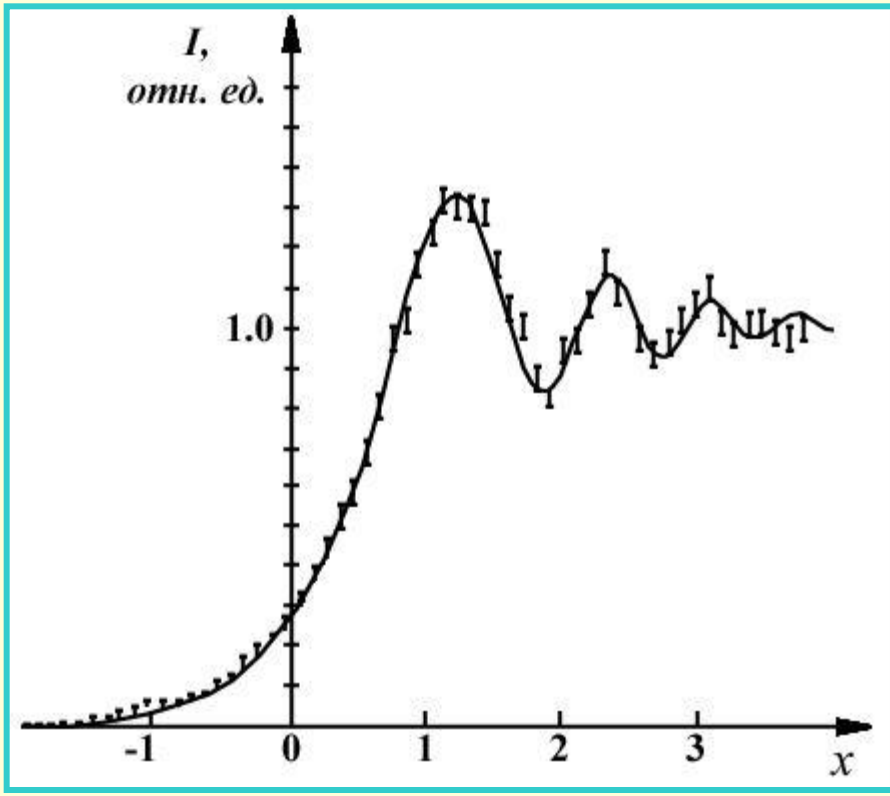
# *Дифракция одиночных электронов*





Рассмотренные выше эксперименты проводились с достаточ
интенсивными пучками частиц, в данном случае электронов
Поэтому выявленные в них волновые свойства могли быть
приписаны как ансамблю взаимодействующих между собою
электронов, так и отдельному электрону. Для того, чтобы
выяснить, обладает ли индивидуальная частица волновыми
свойствами, группа отечественных физиков во главе с *В.А.
Фабрикантом* выполнила в 1949 г дифракционные исследо
с очень слабым пучком электронов. В этих опытах промежут
времени между двумя последовательными прохождениями
электронов через кристалл в 30000 раз превышал время,
затрачиваемое одним электроном на прохождение всего приб
Таким образом, электроны дифрагировали в кристалле
поодиночке и полностью исключалось взаимодействие
электронов друг с другом как причина возникновения
дифракционной картины. При небольшой длительности
эксперимента точки на фотопластинке, отвечающие попаданию
электронов, распределены совершенно случайным образом. Однако при достаточной длительности эксперимента распределение точек приобретает характерный для дифракции на поликристалле вид концентрических колец. Таким образом было доказано, что волновые свойства присущи отдельному электрону.

Для нейтронов, так же как и для других частиц, возможно экспериментальное наблюдение классических дифракционных опытов, хорошо известных в оптике. На рисунке приведены результаты экспериментального исследования дифракции нейтронов на краю непрозрачного экрана. В этом опыте использовались нейтроны с дебройлевской длиной волны $\lambda_Б = 2$ нм. На графике одна единица по оси x соответствует смещению приемной щели детектора шириной 30 мкм на расстояние 100 мкм.




Дифракционные опыты с тяжелыми частицами - атомами, молекулами, нейтронами - показали, что гипотеза *де Бройля* имеет универсальное значение. Все частицы, независимо от их природы и внутреннего строения обладают волновыми свойствами.