

# **ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА**

## **Первый постулат Бора.**

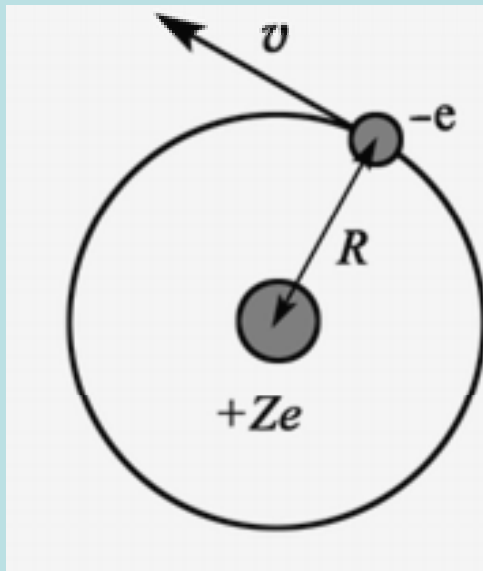
**В атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) энергетические состояния. Пребывая в одном из стационарных состояний, атом не излучает энергию.**

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

# Первый постулат Бора.

*Условие для стационарных орбит:*

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



$$m_e v r = n \hbar$$

$n = 1, 2, 3, \dots$  -  
КВАНТОВОЕ ЧИСЛО.

## **Второй постулат Бора.**

**При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией**

$$h \nu = E_n - E_m$$

**равной разности энергий соответствующих стационарных состояний.**

*Серьезным успехом теории Бора  
явилось:*

- *вычисление постоянной Ридберга  
для водородоподобных систем и*
- *объяснение структуры их  
линейчатых спектров.*

Однако наряду с успехами в теории Бора с самого начала обнаружались **существенные недостатки**.

- Самый большой – **внутренняя противоречивость теории: механическое соединение классической физики с квантовыми постулатами**.

- Теория не могла объяснить **вопрос об интенсивностях спектральных линий**.

- Серьезной неудачей являлась **абсолютная невозможность применить теорию для объяснения спектров гелия ( $He$ ) (два электрона на орбите, и уже теория Бора не справляется)**.

Недостатки теории Бора указывали на необходимость пересмотра основ квантовой теории и представлений о природе микрочастиц (электронов, протонов и т.п.).

Возник вопрос о том, насколько исчерпывающим является *представление об электроне, как о малой механической частице, характеризующейся определенной координатой и определенной скоростью?*

# Двойственная природа света

(в оптических явлениях наблюдается своеобразный дуализм)

- *Излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона — корпускулярные свойства света*
- *Интерференция, дифракция, поляризация - волновые свойства света*
- *Давление и преломление света объясняются как волновой, так и квантовой теориями.*



# Двойственная природа света

*Свет – диалектическое единство противоположных свойств: он одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.*

*При уменьшении длины волны все явственнее проявляются **корпускулярные свойства**.*

Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются слабо (например, рентгеновское излучение).

*Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения квантовые свойства **проявляются слабо**.*

<http://www.youtube.com/watch?v=LIPCKcBnVT0&list=PLmrwCwqILLo8ZuCxiDOOTYQTGnWE0JZmi>

<http://www.youtube.com/watch?v=QGq2YNYVbGs>

# Гипотеза де Бройля



В 1924 г. **Луи де Бройль** выдвинул смелую гипотезу, что **дуализм не является особенностью только оптических явлений, а имеет универсальный характер:**

**частицы вещества также обладают волновыми свойствами.**

# Гипотеза де Бройля

«В оптике, – писал де Бройль, – в течение столетия слишком **пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым**; не делалась ли **в теории вещества обратная ошибка?**»

Допуская, что **частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые**, де Бройль перенес на случай частиц вещества те же правила перехода от одной картины к другой, какие справедливы в случае света.

$$p = h / \lambda \quad \Rightarrow \quad \lambda = h / p$$

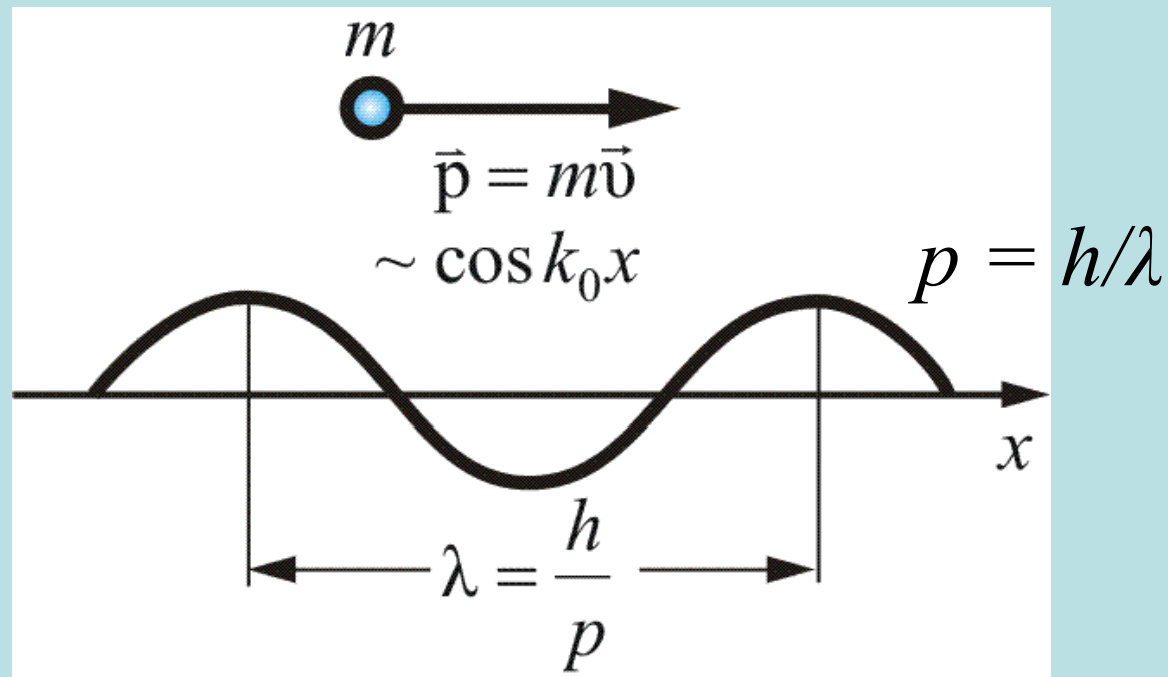
## Гипотеза де Бройля

Согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики — энергия  $E$  и импульс  $p$ , а с другой — волновые характеристики — частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$ . Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как для фотонов:

$$E = h \nu \quad p = h / \lambda$$

# Гипотеза де Бройля

Если фотон обладает энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = h/\lambda$ , то и частица (например, электрон), движущаяся с некоторой скоростью, обладает волновыми свойствами, т.е. **движение частицы можно рассматривать как движение волны.**

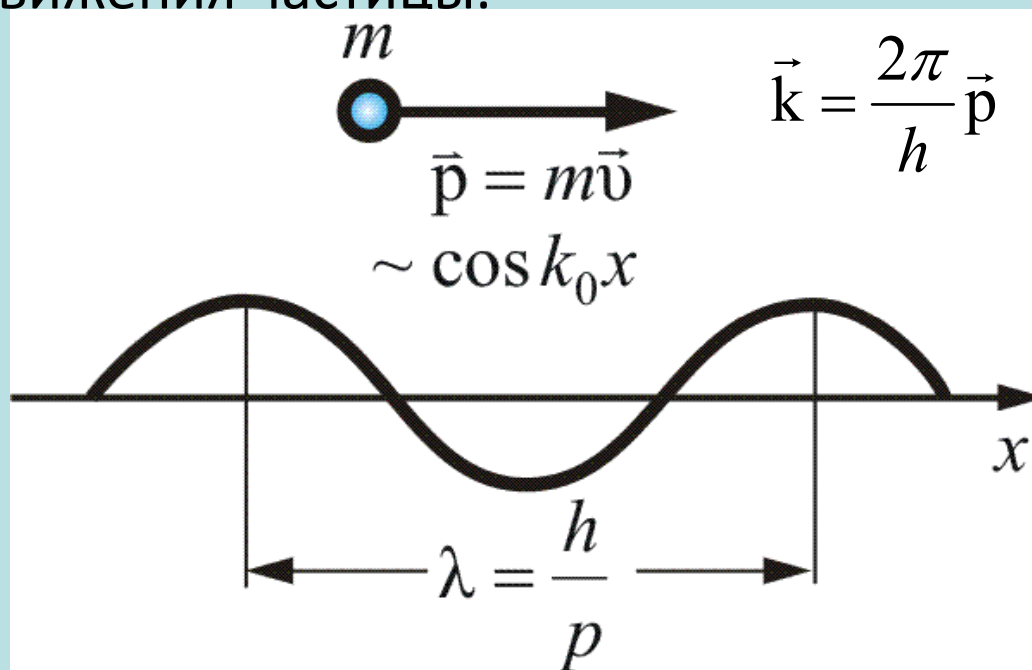


# Гипотеза де Бройля

Согласно волновой механике, свободное движение **частицы** с массой  $m$  и импульсом  $p = mv$  можно представить как **плоскую монохроматическую волну**  $\Psi_0$

$\Psi_0 \sim \cos(kx)$  - **волна де Бройля** с длиной волны  $\lambda = h/p$

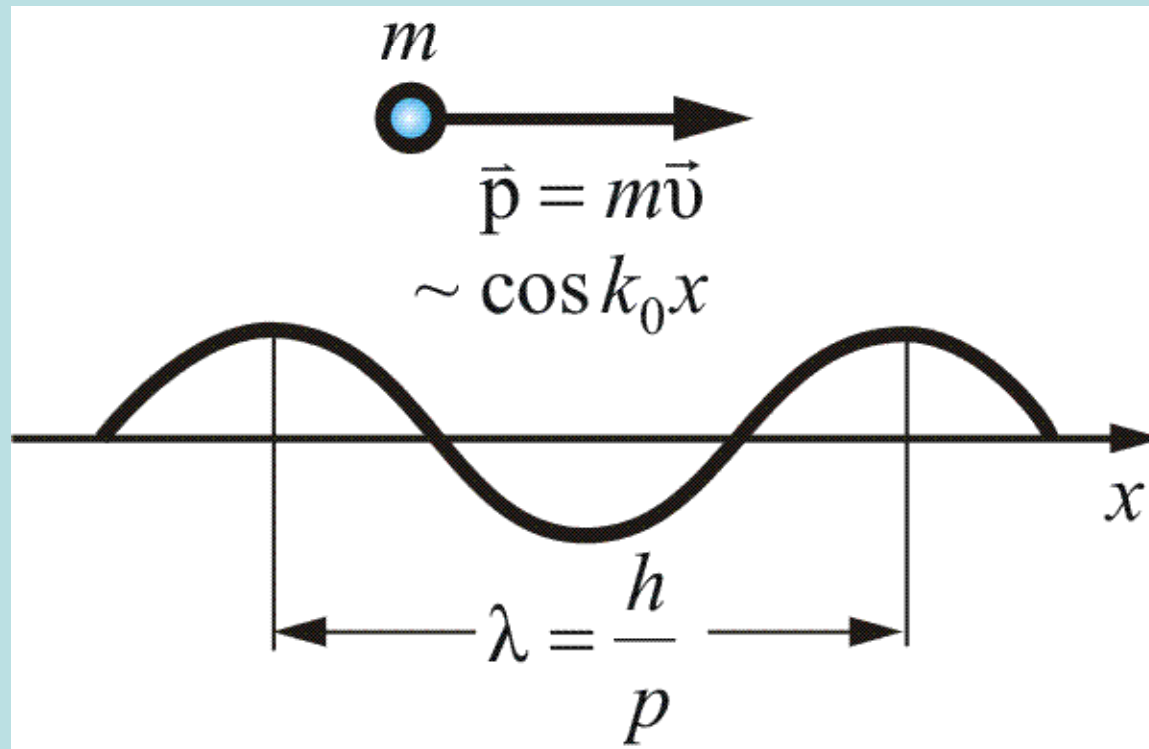
где  $k$  – **волновое число**. **Волновой вектор**:  $\vec{k} = \frac{2\pi}{h} \vec{p}$  -  
направлен в сторону распространения волны,  
или вдоль движения частицы.



# Гипотеза де Бройля

Таким образом, **волновой вектор** монохроматической волны, связанной со свободно движущейся микрочастицей, **пропорционален её импульсу или обратно пропорционален длине волны:**

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{h} \vec{p}$$



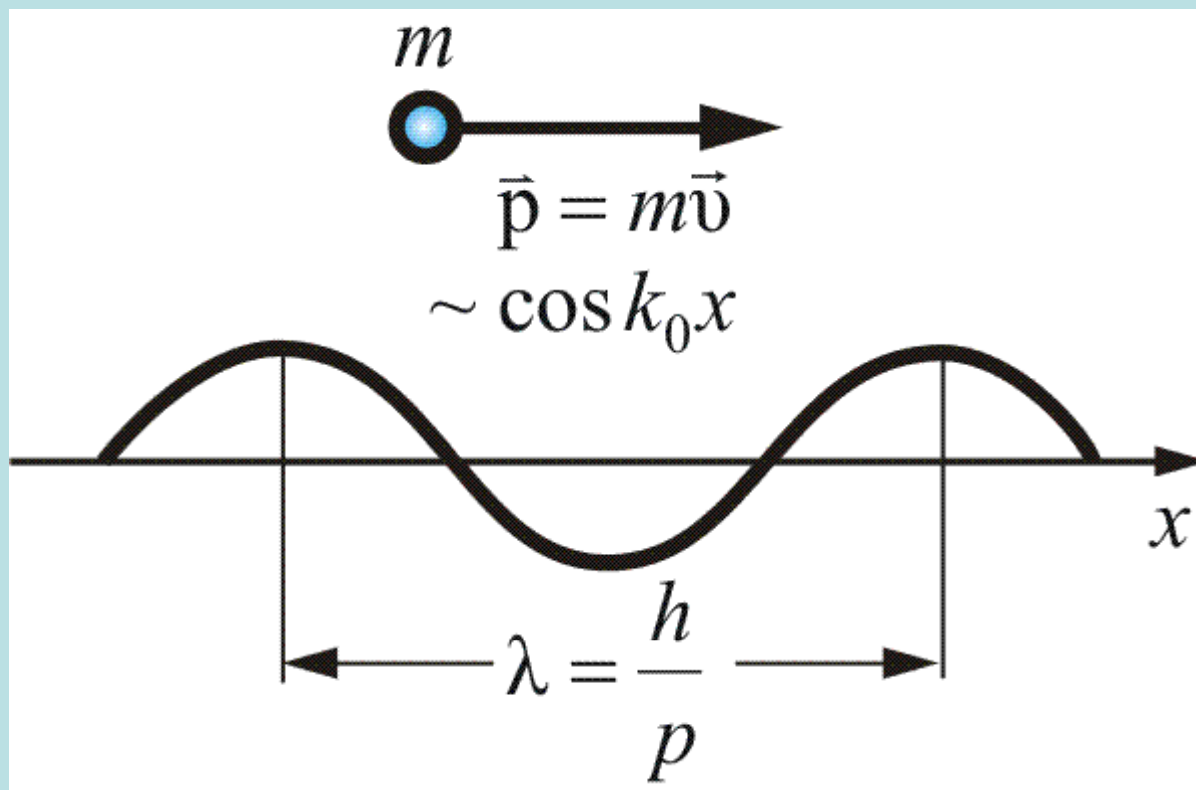
Поскольку кинетическая энергия достаточно медленно движущейся (нерелятивистской) частицы  $E = mv^2/2$ , то **длину волны можно связать с энергией:**

$$\lambda = h/p$$

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

$\Rightarrow$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\hat{E}}}$$





При взаимодействии **частицы** с некоторым объектом - с кристаллом, молекулой и т.п. – её энергия меняется: к ней добавляется потенциальная энергия этого взаимодействия, что приводит к изменению движения частицы.

Соответственно, меняется характер распространения связанной с частицей волны, причём это происходит согласно принципам, общим для всех волновых явлений.

Можно предположить, что **основные волновые закономерности, например, дифракция частиц, должны ничем не отличаться от закономерностей дифракции волн.**

**Общим условием дифракции волн любой природы является соизмеримость длины падающей волны  $\lambda$  с расстоянием  $d$  между рассеивающими центрами:  $\lambda \sim d$**



*Гипотеза де Бройля была революционной, даже для того революционного в науке времени.*

Однако, она вскоре была подтверждена многими экспериментами.

# **Дифракция частиц**

# Дифракция частиц

*Дифракция частиц, рассеяние микрочастиц (электронов, нейтронов, атомов и т.п.) кристаллами или молекулами жидкостей и газов*, при котором из начального пучка частиц данного типа возникают дополнительно отклонённые пучки этих частиц.

**Направление и интенсивность таких отклонённых пучков зависят от строения рассеивающего объекта.**

**Дифракция частиц может быть понята лишь на основе квантовой теории.**

Дифракция – явление волновое, оно наблюдается при распространении волн различной природы: дифракция света, звуковых волн, волн на поверхности жидкости и т.д.

**Дифракция частиц, с точки зрения классической физики, невозможна.**

**Квантовая механика устранила абсолютную грань между волной и частицей.**

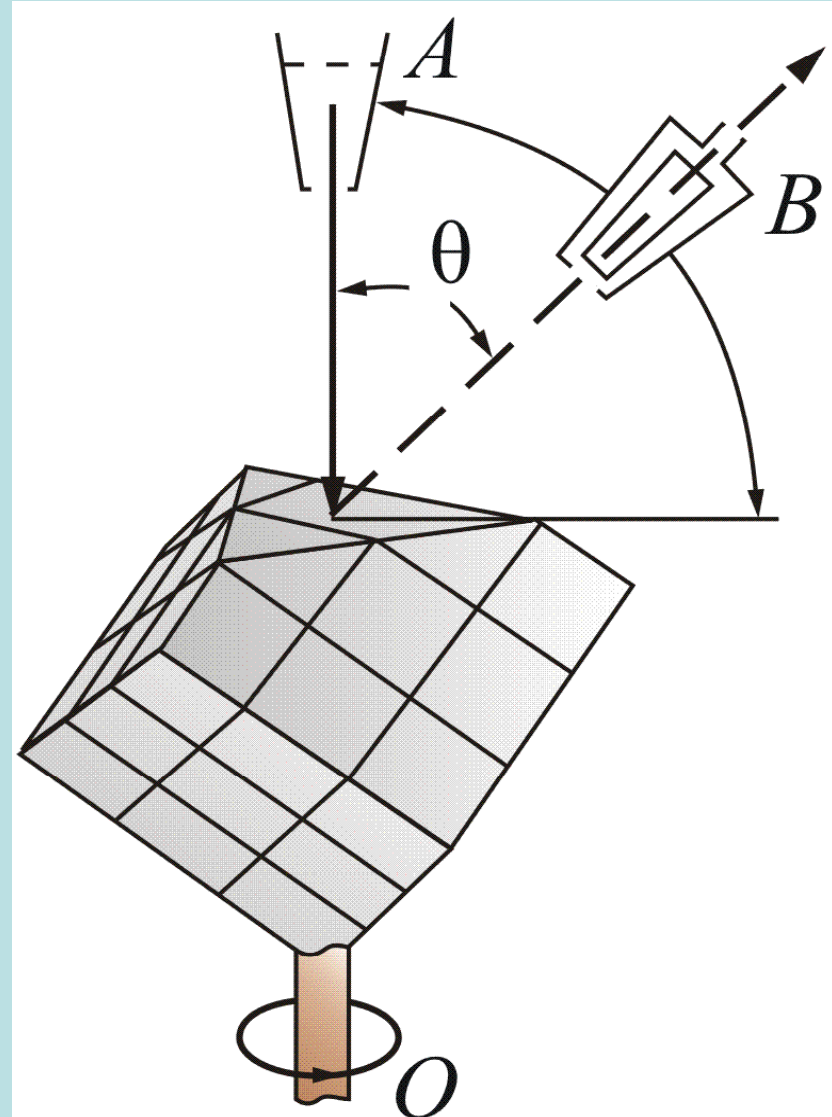
**Основным положением квантовой механики, описывающей поведение микрообъектов, является корпускулярно-волновой дуализм, т.е. двойственная природа микрочастиц.**

Так, поведение электронов в одних явлениях, например при наблюдении их движения в камере Вильсона или при измерении электрического заряда в фотоэффекте, может быть описано на основе представлений о частицах. В других же, особенно в явлениях дифракции, – только на основе представления о волнах.

**Идея «волн материи», высказанная французским физиком Л. де Бройлем, получила блестящее подтверждение в опытах по дифракции частиц.**

# Опыты по дифракции частиц и их квантово-механическая интерпретация.

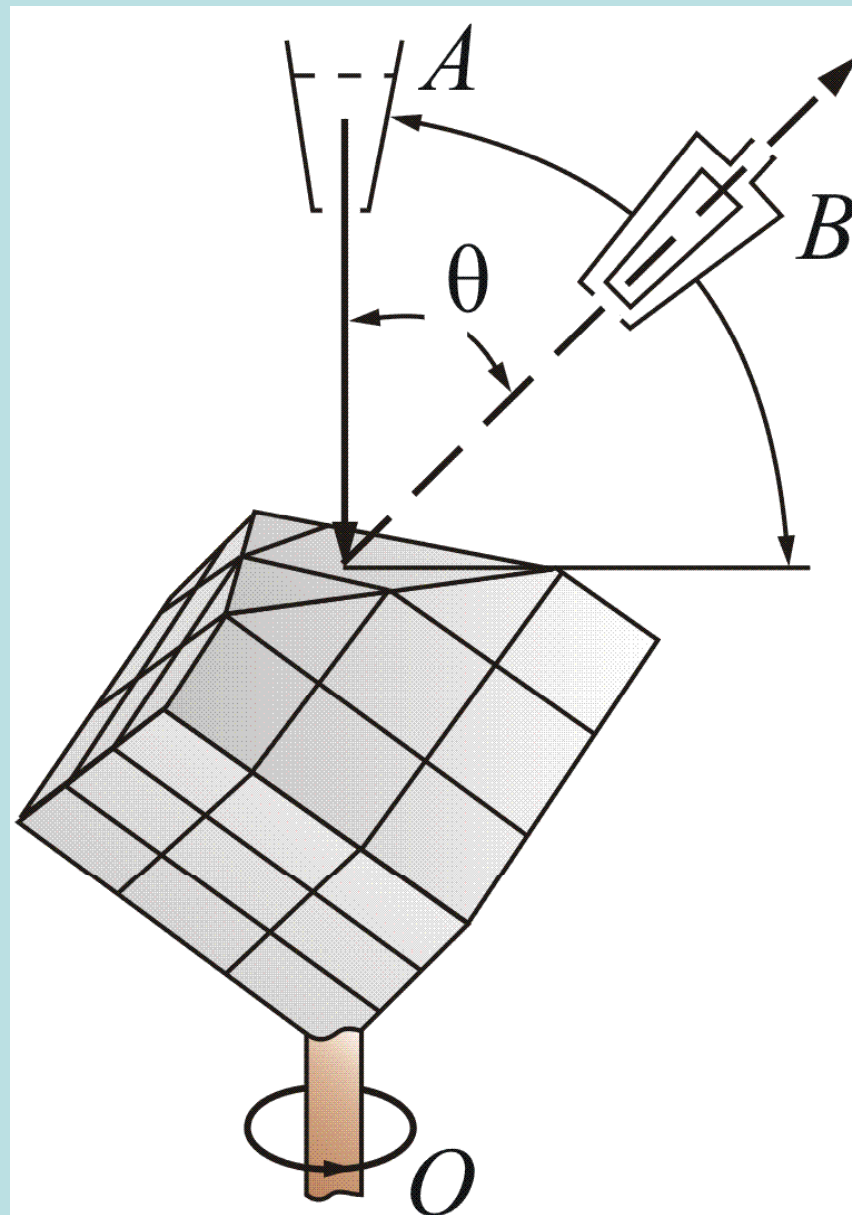
Первым опытом по дифракции частиц, блестяще подтвердившим исходную **идею квантовой механики – корпускулярно-волновой дуализм**, явился опыт американских физиков К. Дэвиссона и Л. Джермера проведенный в 1927 по дифракции электронов на монокристаллах никеля:



## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

Кристаллы обладают высокой степенью упорядоченности.

Атомы в них располагаются в **трёхмерно-периодической кристаллической решётке**, т.е. образуют **пространственную дифракционную решётку** для соответствующих длин волн.





## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

Если ускорять электроны электрическим полем с напряжением  $U$ , то они приобретут кинетическую энергию  $E = eU$ , ( $e$  – заряд электрона), что после подстановки в равенство

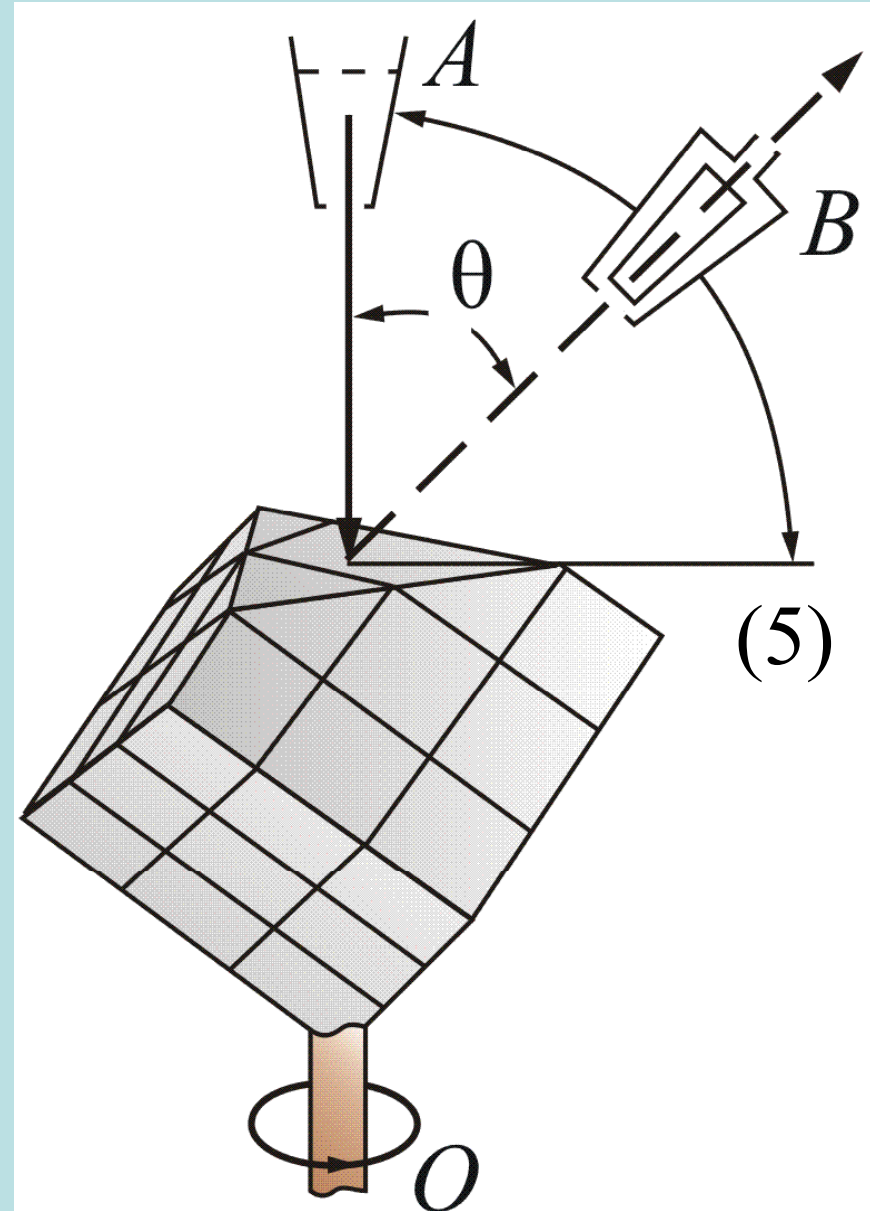
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\hat{E}}}$$

числовых значений даёт

$$\lambda = \frac{12,26}{\sqrt{U}}$$

Здесь  $U$  выражено в В,  
а  $\lambda$  – в  $\text{\AA}$

(1  $\text{\AA}$  =  $10^{-10}$  м).

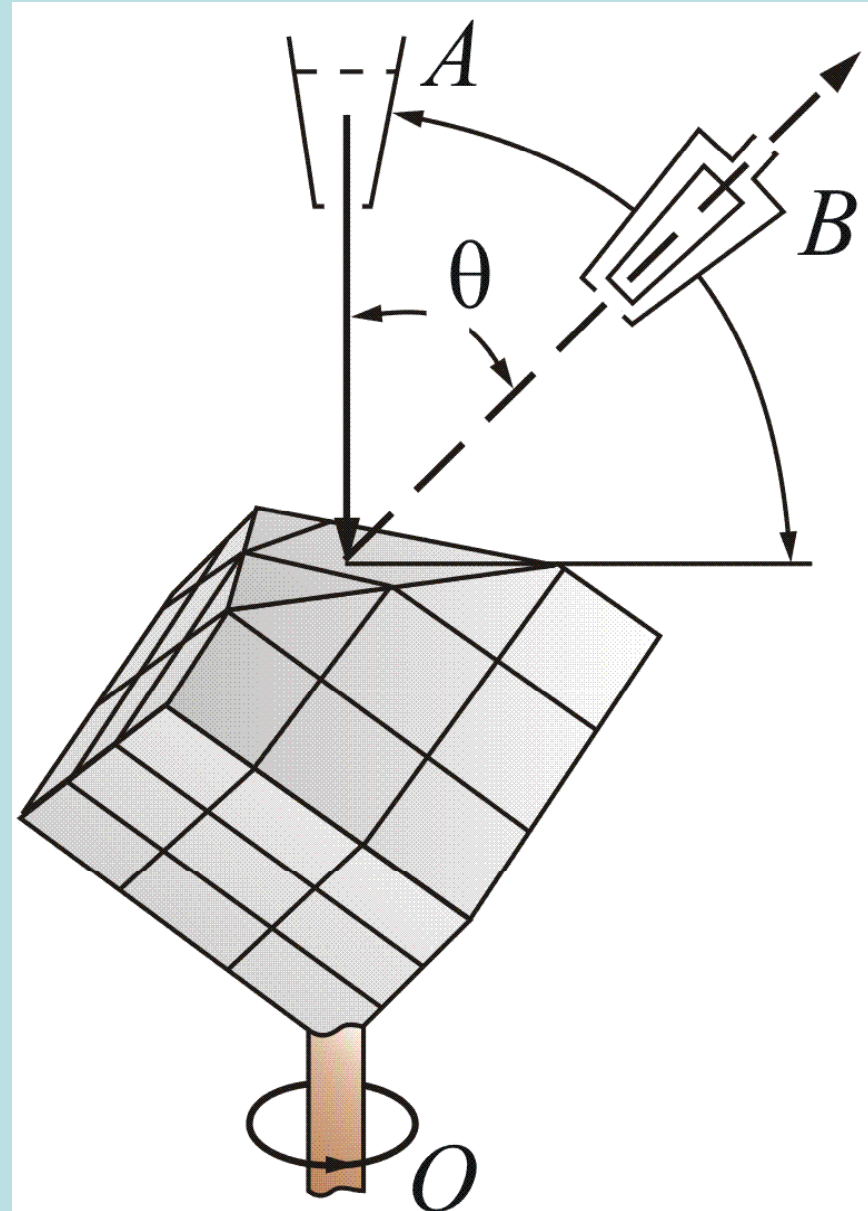


## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

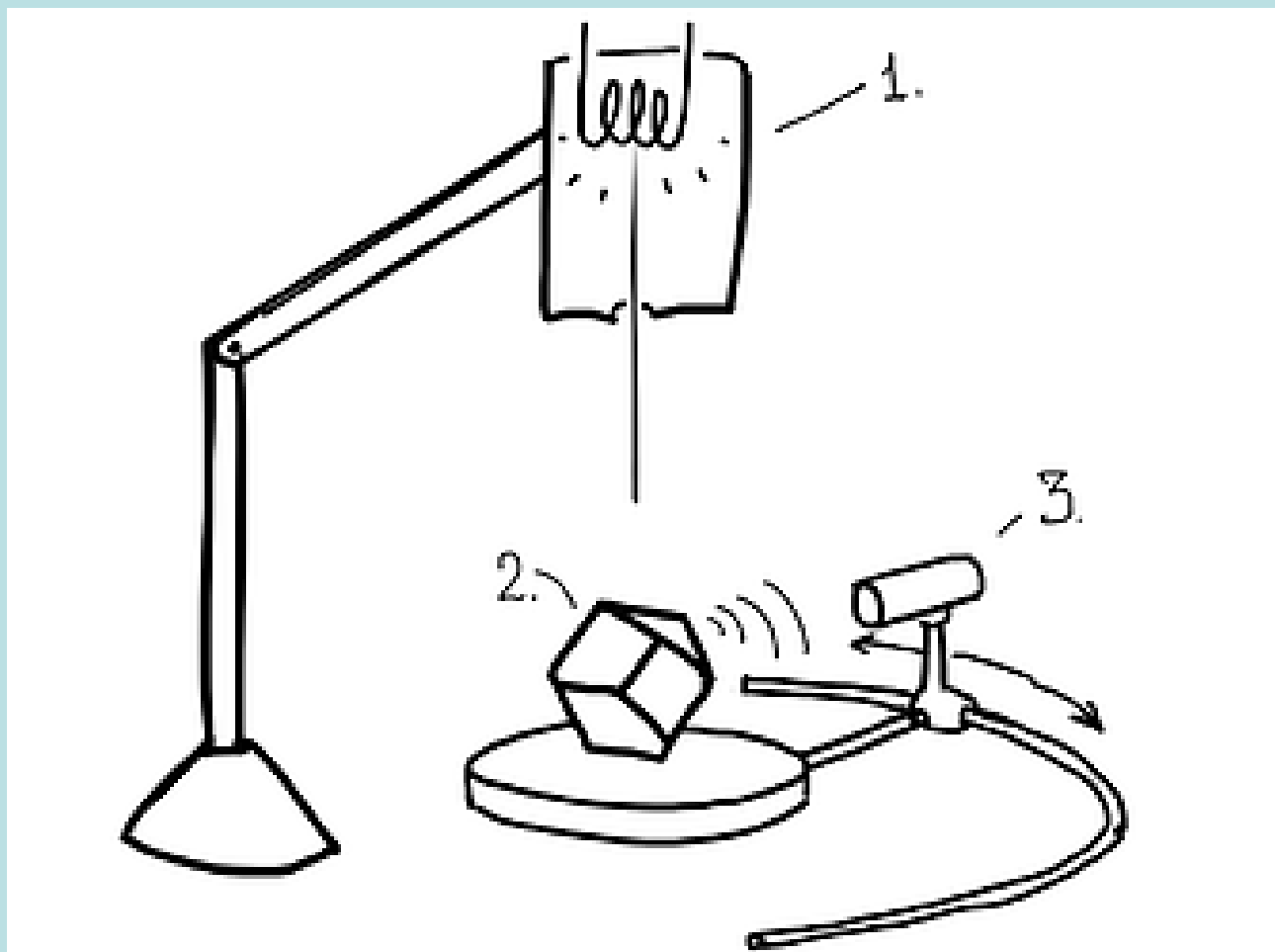
При напряжениях  $U$  порядка 100 В, получаются так называемые «медленные» электроны с  $\lambda$  порядка 1 Å.

Эта величина близка к межатомным расстояниям  $d$  в кристаллах, которые составляют несколько Å и менее, и

***соотношение  $\lambda \sim d$ ,  
необходимое для  
возникновения дифракции,  
выполняется.***



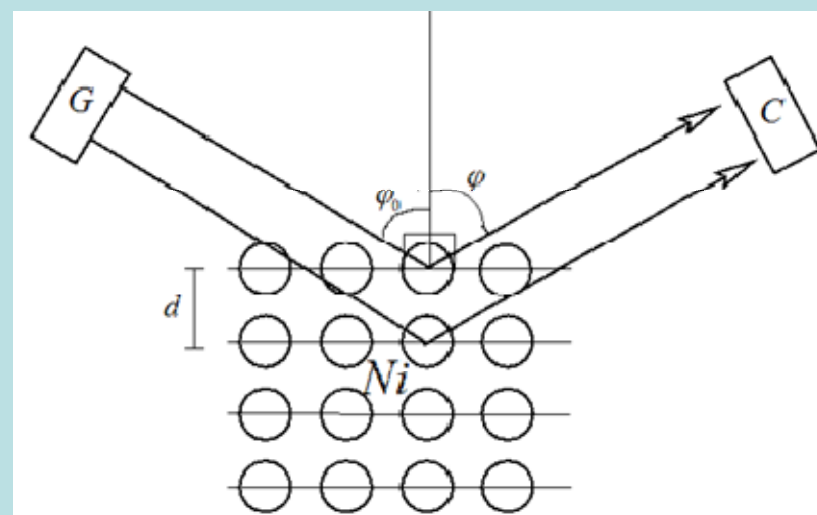
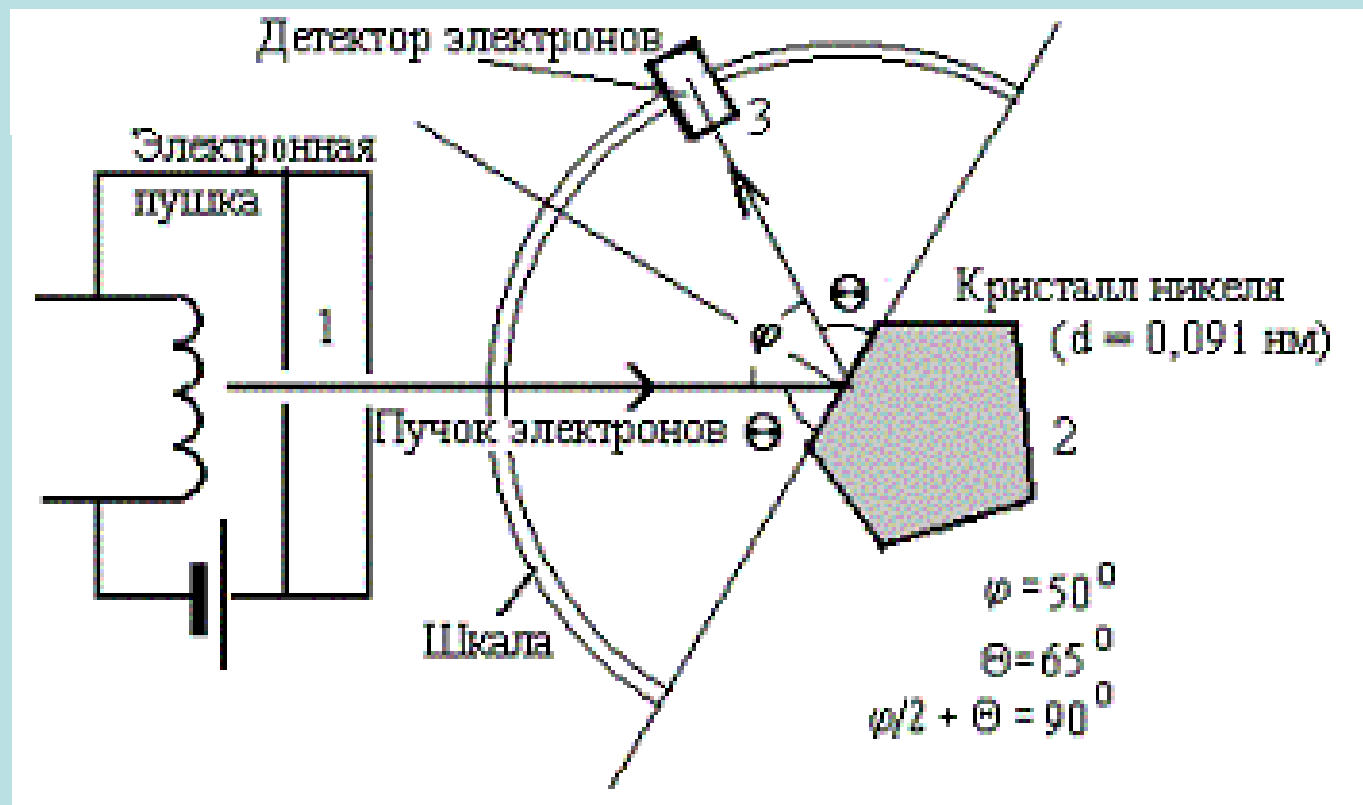
## ОПЫТ Дэвиссона и Джермера



1- электронная пушка

2- кристалл никеля

3- детектор



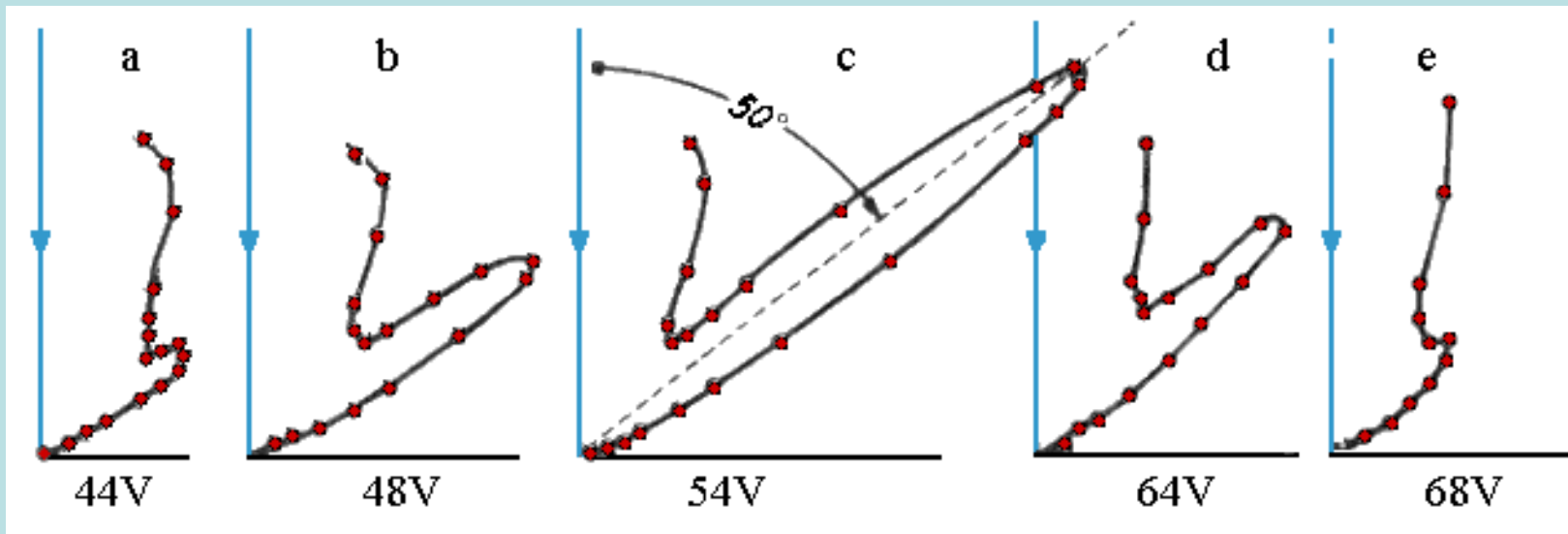
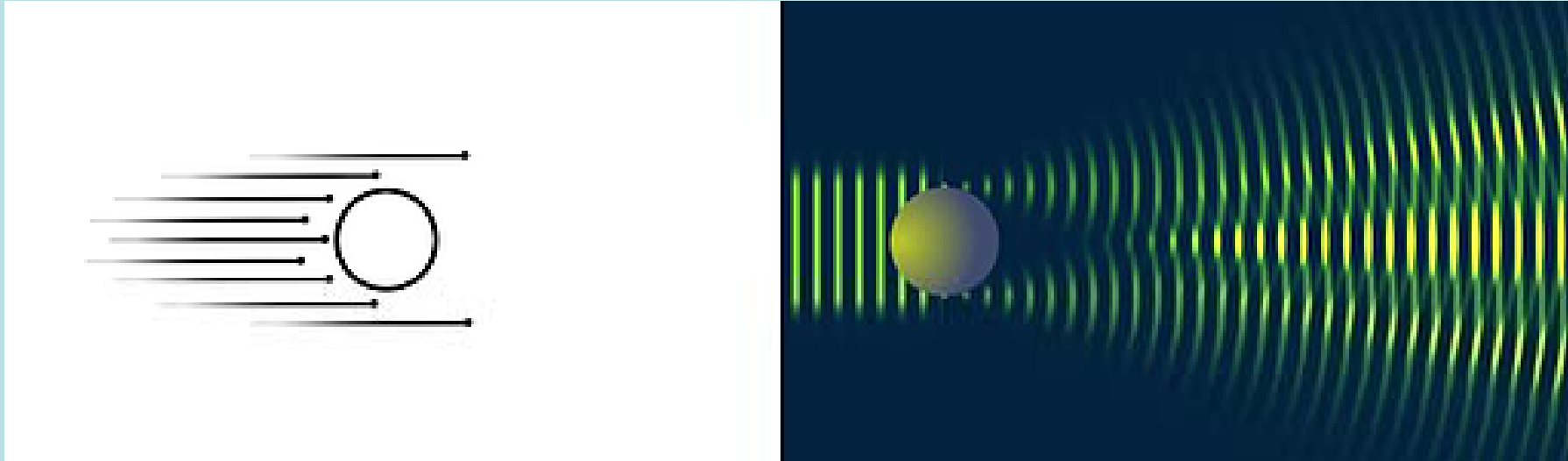


График зависимости между углом  $\varphi$  (угол между падающим и рассеянным направлением электронного пучка) и интенсивности рассеянного пучка при различных значениях напряжений.

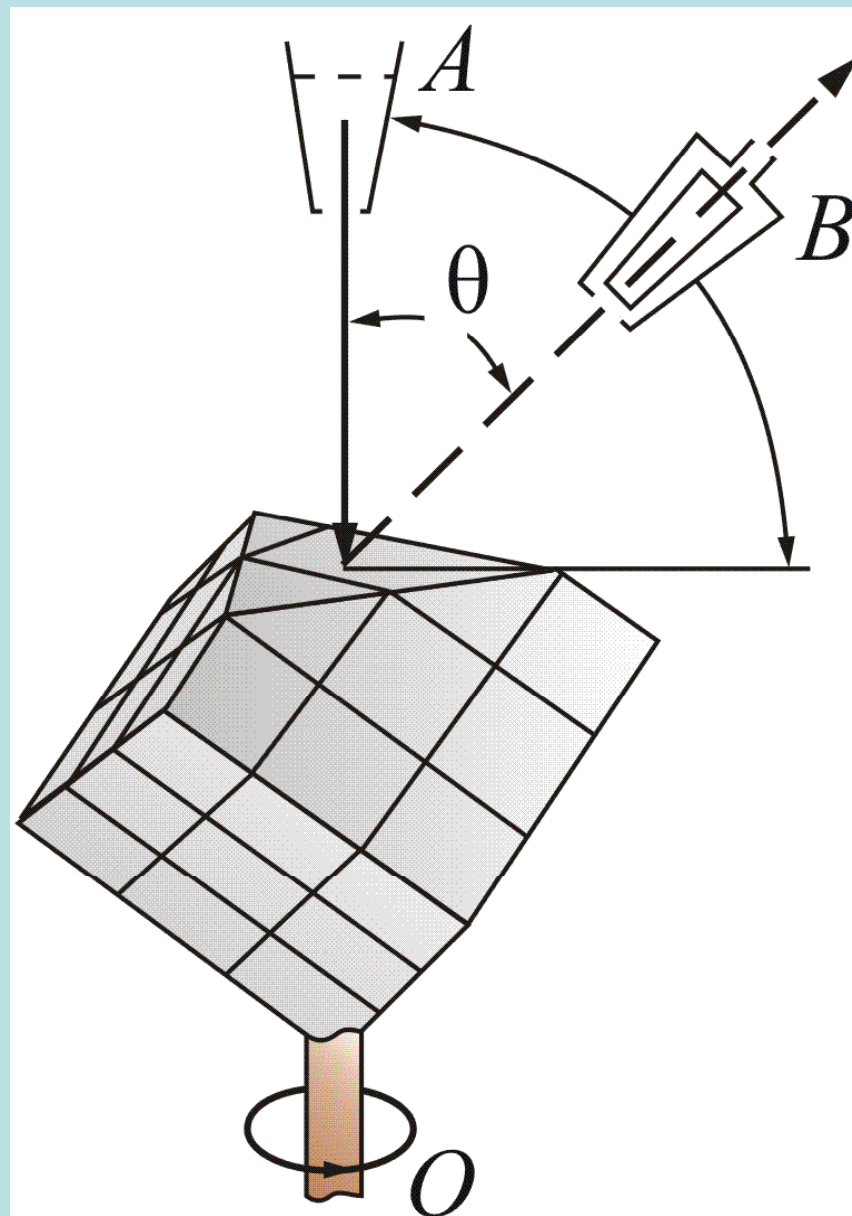
$$\lambda = \frac{12,26}{\sqrt{U}}$$

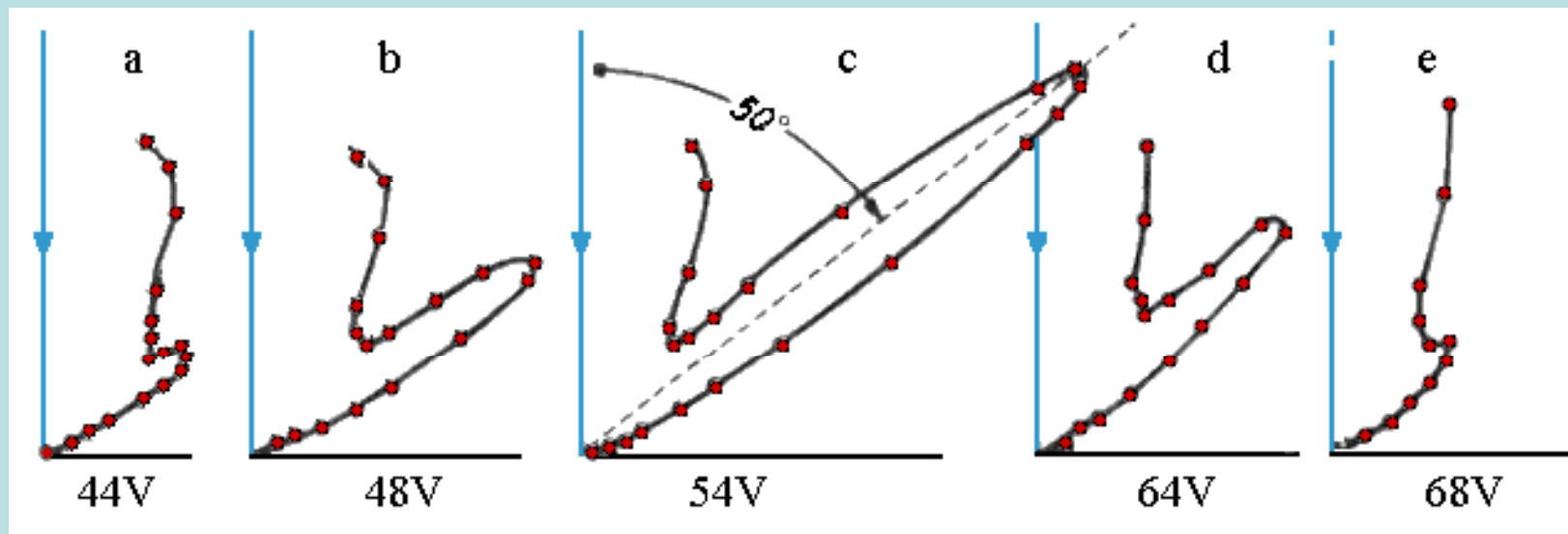
Дэвиссон и Джермер

Дифракция волн на кристаллической решётке происходит в результате рассеяния на системах параллельных кристаллографических плоскостей, на которых в строгом порядке расположены рассеивающие центры.

Условием наблюдения дифракционного максимума при отражении от кристалла является **условие Вульфа – Брэггов - :**

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





В опыте Дэвиссона и Джермера при «отражении» электронов от поверхности кристалла никеля при определённых углах отражения возникали максимумы.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\hat{E}}} \quad \lambda = \frac{12,26}{\sqrt{U}}$$

Эти максимумы отражённых пучков электронов соответствовали условию **Вульфа – Брэггов** :

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

и их появление не могло быть объяснено никаким другим путём, кроме как **на основе представлений о волнах и их дифракции**;

**таким образом, волновые свойства частиц – электронов – были доказаны экспериментом.**



Вскоре после этого **удалось наблюдать и явления дифракции атомов и даже молекул!**

Атомам с массой  $M$ , находящимся в газообразном состоянии в сосуде при абсолютной температуре  $T$ , соответствует **длина волны:**

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\hat{E}}} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{3MkT}}$$

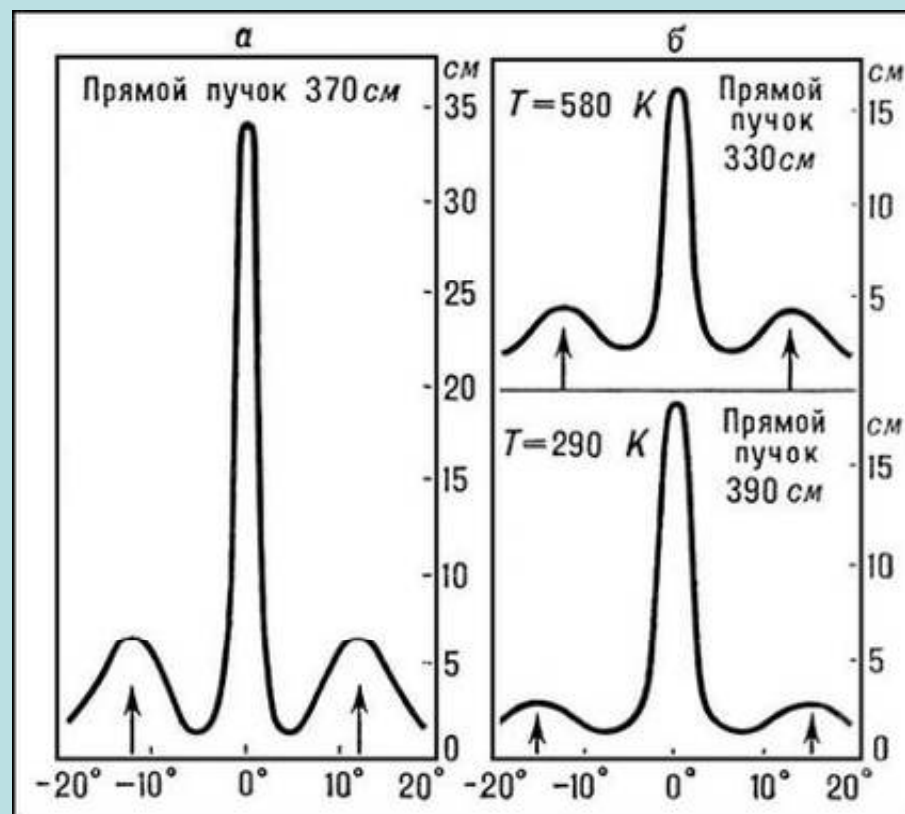
где  $k$  — постоянная Больцмана,

$E = 3/2kT$  - средняя кинетическая энергия атома

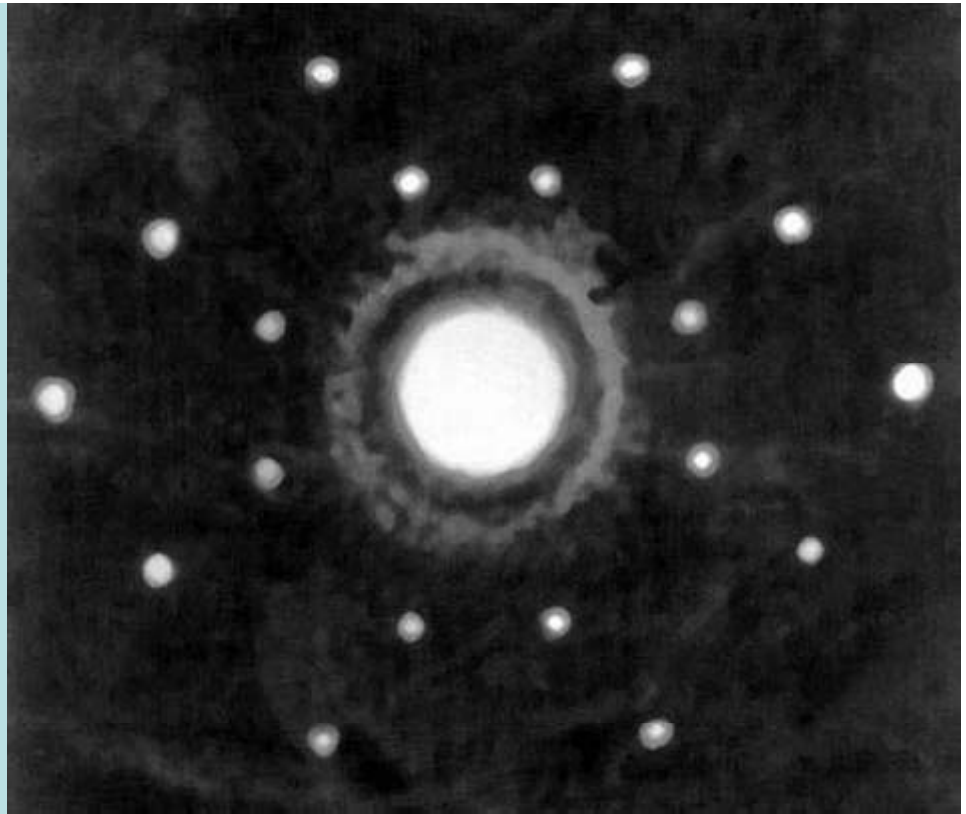
Для лёгких атомов и молекул (**H, H<sub>2</sub>, He**), и температур в сотни градусов Кельвина, длина волны также составляет около **1Å**. Дифрагирующие атомы или молекулы практически не проникают в глубь кристалла, поэтому можно считать, что их **дифракция происходит при рассеянии от поверхности кристалла, т. е. как на плоской дифракционной решётке.**

Сформированный с помощью диафрагм **молекулярный** или **атомный пучок**, направляют на кристалл и тем или иным способом фиксируют «отражённые» дифракционные пучки.

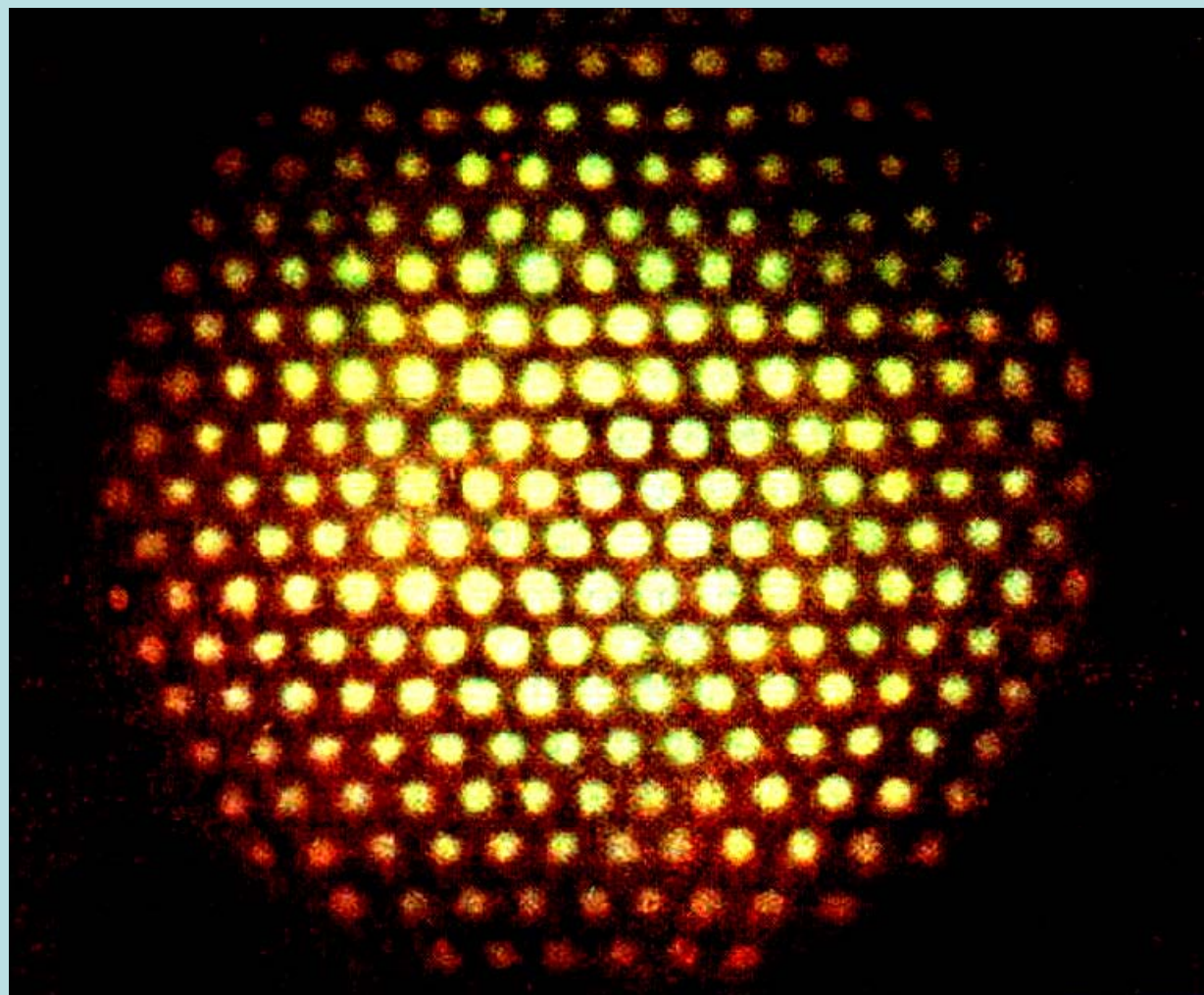
Таким путём немецкие учёные О. Штерн и И. Эстерман, а также др. исследователи на рубеже 30-х гг. **наблюдали дифракцию атомных и молекулярных пучков**



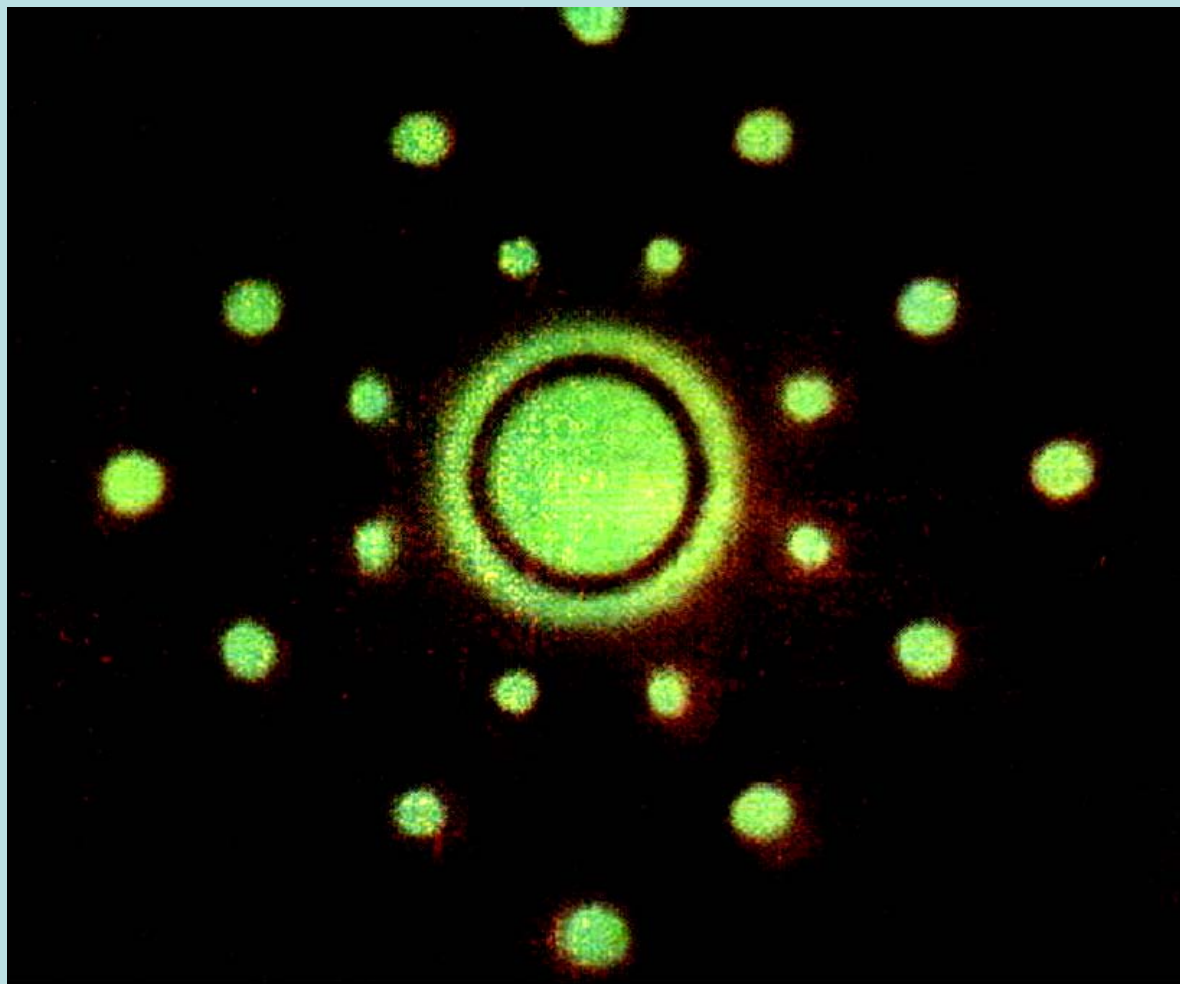
Позже наблюдалась **дифракция протонов, а также дифракция нейтронов**, получившая широкое распространение как один из методов исследования структуры вещества.



Так было доказано экспериментально, что **волновые свойства присущи всем без исключения микрочастицам.**



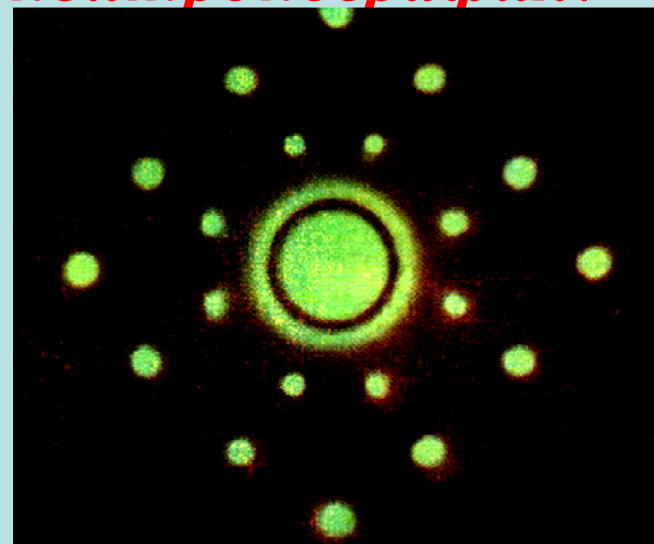
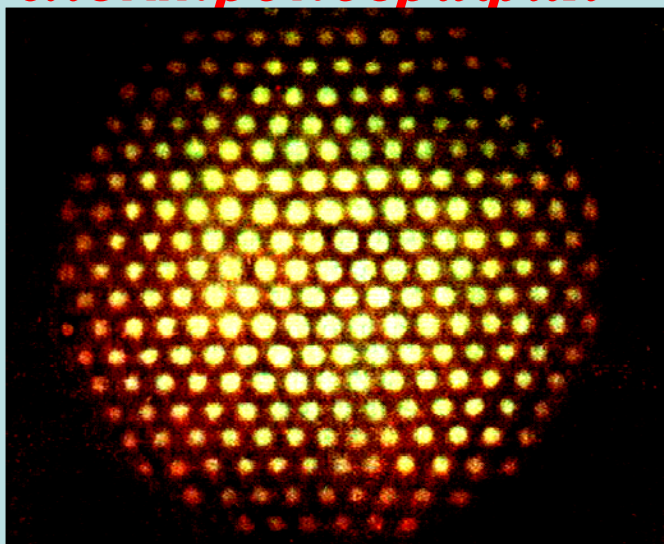
**Картина дифракции  
электронов на слюде**



**Картина дифракции  
нейтронов на кварце**

<sup>x</sup> *Дифракция частиц*, сыгравшая в своё время большую роль в установлении двойственной природы материи – корпускулярно-волнового дуализма (и тем самым послужившая *экспериментальным обоснованием волновой (квантовой) механики*), давно уже *стала одним из главных рабочих методов для изучения строения вещества.*

На дифракции частиц основаны два важных современных метода анализа атомной структуры вещества – *электронография* и *нейтронография.*



# **Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц вещества**



## Корпускулярно- волновой дуализм микрочастиц вещества

Итак, микрочастицы обладают необычайными свойствами. Микрочастицы – это элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и т.д.), а также сложные частицы, образованные из небольшого числа элементарных частиц (атомы, молекулы, ядра атомов). Называя эти микрочастицы частицами, мы подчеркиваем только одну сторону, правильнее было бы назвать «**частица – волна**».

В доквантовой физике *«понять»*, означало *«составить себе наглядный образ объекта»* или процесса. В квантовой физике такой подход неправилен.

Всякая наглядная модель будет действовать по классическим законам и поэтому *непригодна для представления квантовых процессов.*

Например, вращение электрона по орбите вокруг атома – такое представление. Это дань классической физике, и оно не соответствует истинному положению вещей, не соответствует квантовым законам.

Рассмотренные нами *волны де Бройля* не являются *электромагнитными*, это *волны особой природы*.

Вычислим дебройлевскую длину волны мячика массой 0,20 кг, движущегося со скоростью 15 м/с.

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,67 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{0,2 \cdot 15} = 2,2 \cdot 10^{-34} \text{ м} \quad (7)$$

Это чрезвычайно малая длина волны.

Даже при крайне низких скоростях, скажем  $10^{-4}$  м/с, дебройлевская длина волны составляла бы примерно  $10^{-29}$  м.

$$\lambda = 2,2 \cdot 10^{-34} \text{ м} \quad (7)$$

Это чрезвычайно малая длина волны.

Дебройлевская длина волны обычного тела слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить и измерить.

Дело в том, что типичные волновые свойства – интерференция и дифракция – проявляются только тогда, когда *размеры предметов или щелей сравнимы по своей величине с длиной волны.*

Но нам не известны предметы и щели, на которых могли бы дифрагировать волны с длиной волны  $10^{-30}$  м., поэтому *волновые свойства обычных тел обнаружить не удастся.*

Другое дело, если речь идет об элементарных частицах типа электронов.

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

Т.к. масса входит в знаменатель формулы

*очень малой массе соответствует большая длина волны.*

Дебройлевская длина волны электрона, ускоренного разностью потенциалов 100 В.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5,9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

откуда

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5,9 \cdot 10^6} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Из приведенного примера видно, что электрон может соответствовать длине волны порядка  $10^{-10}$  м.

Хотя это очень короткие волны, их можно обнаружить экспериментально: межатомные расстояния в кристалле того же порядка величины ( $10^{-10}$  м.) и регулярно расположенные атомы кристалла можно использовать в качестве дифракционной решетки, как в случае рентгеновского излучения.



Рис. 1. Распределение интенсивности электронов согласно классической физике

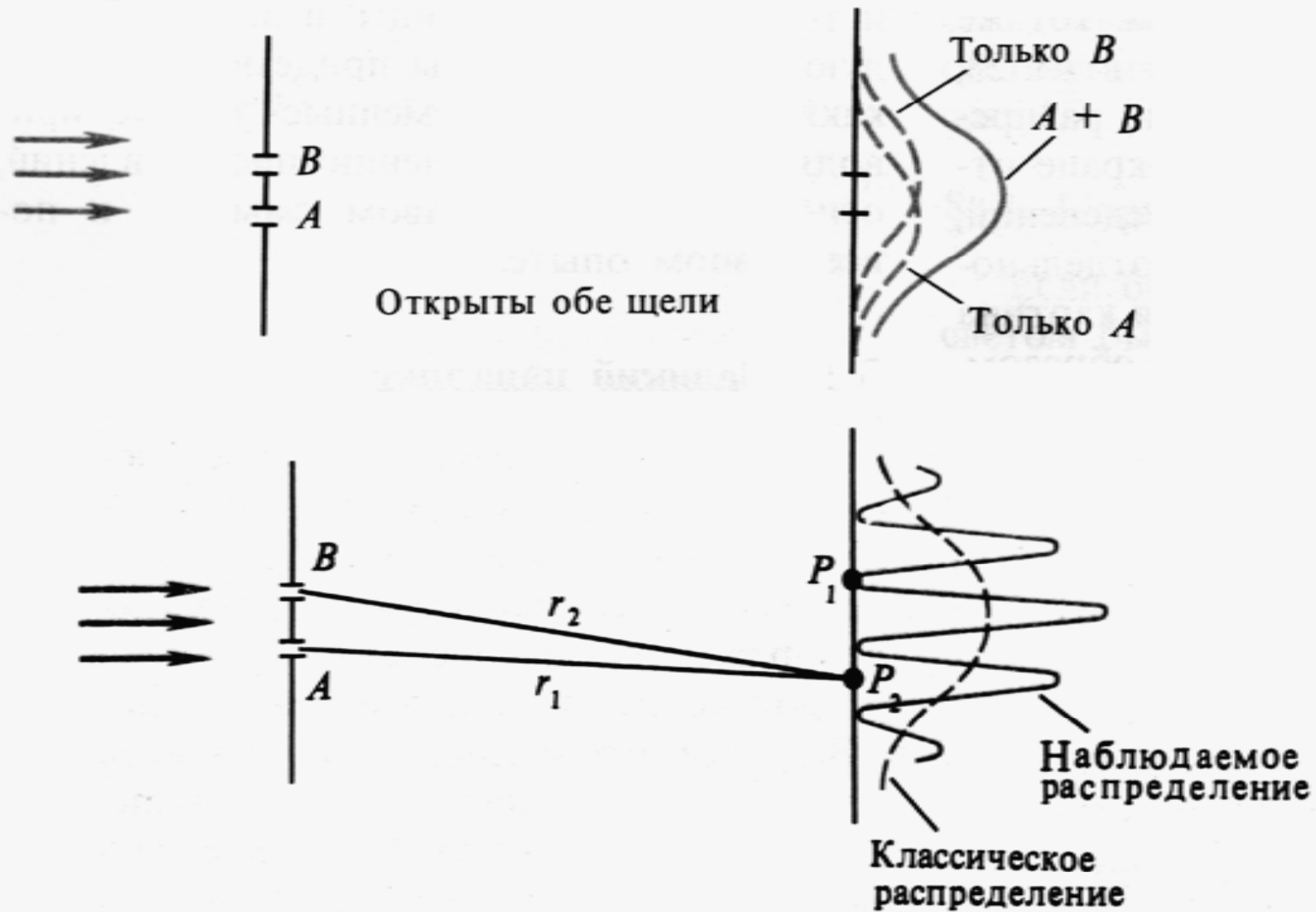
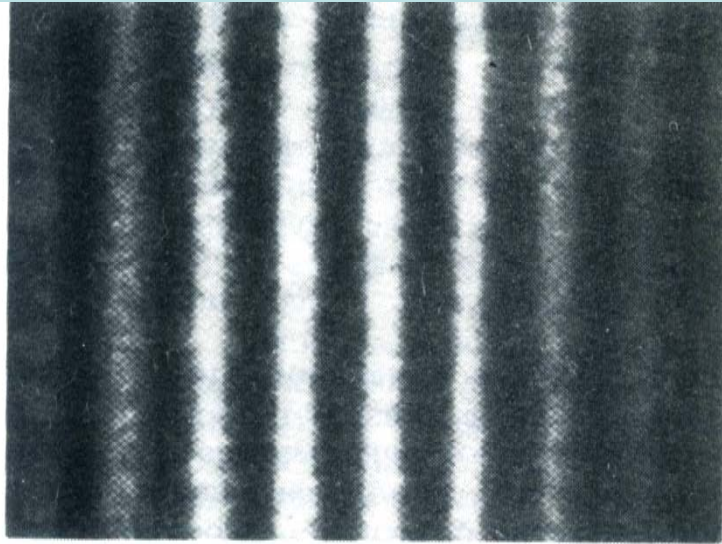
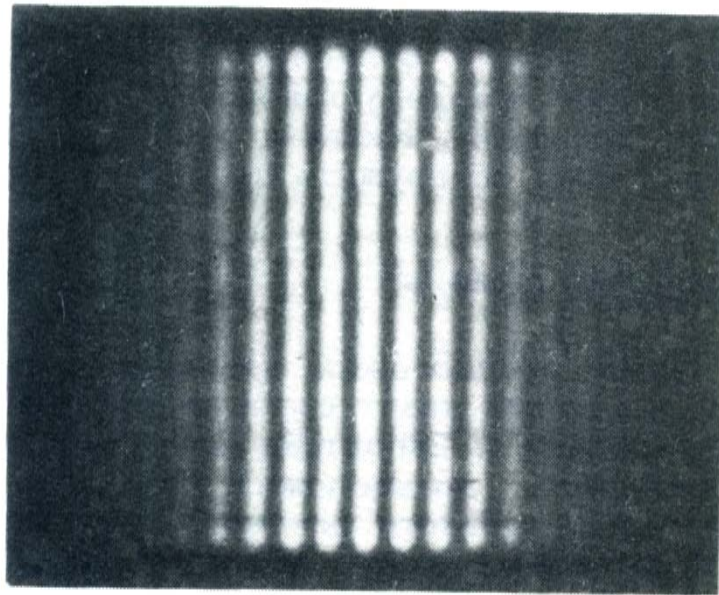


Рис. 2. Распределение интенсивности электронов согласно квантовой теории





а

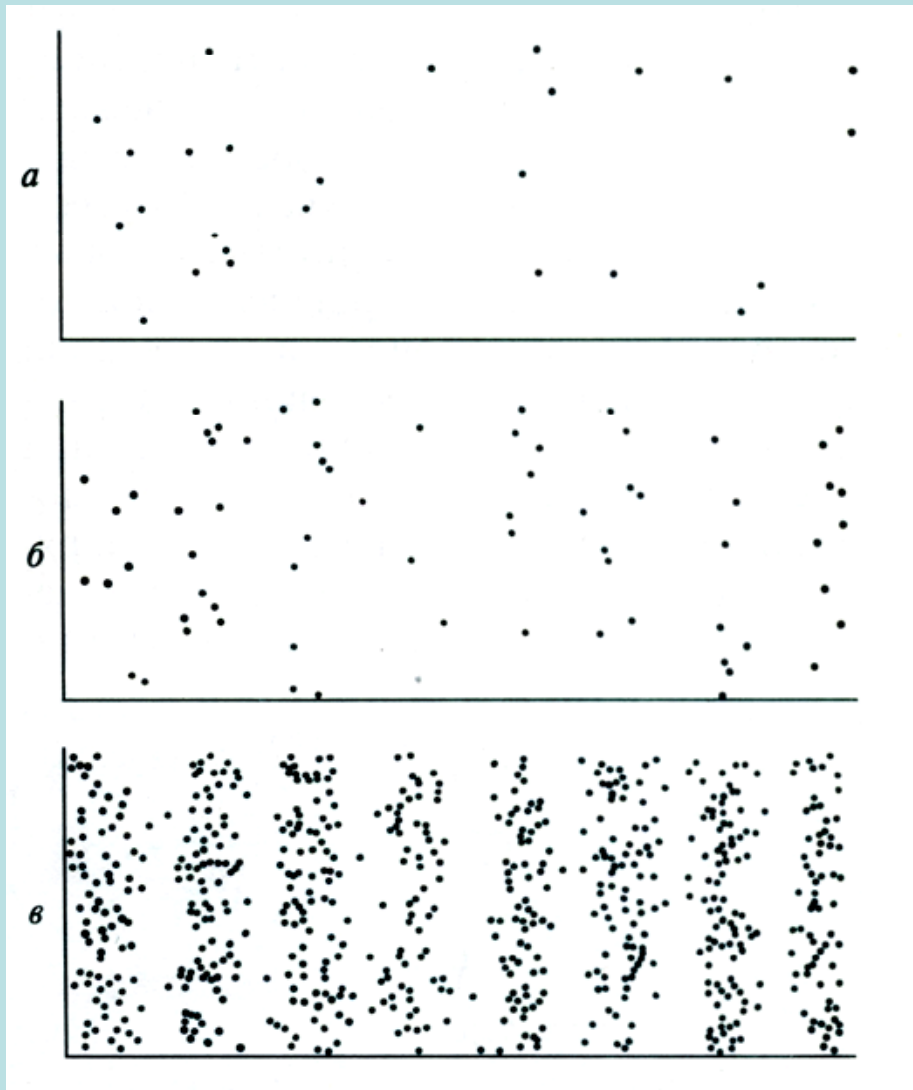


б

а – интерференционная картина от двух щелей в случае электронов, каждое из зерен негатива образовано отдельным электроном; б – для сравнения приведена интерференционная картина от двух щелей в случае света, на этом фото каждое из зерен негатива образовано отдельным фотоном.

В 1927 г. Дж.П. Томпсон и независимо от него П.С. Тартаковский получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу.

В 1949 г. советские ученые Л.М. Биберман, Н.Г. Сушкин, В.А. Фабрикант осуществили такой же опыт, но интенсивность электронного пучка была настолько слабой, что электроны проходили через прибор практически поодиночке. Однако картина после длительной экспозиции была точно такой же. Т.е. было доказано, что волновыми свойствами обладает *каждый отдельный электрон*.



Результаты  
моделирования  
эксперимента с двумя  
щелями.

Распределения  
отвечают экспозициям  
с малым числом  
электронов:

*a* – 27 электронов;

*б* – 70 электронов;

*в* – 735 электронов

Характер картины свидетельствует о том, *что на движение каждого электрона оказывает влияние оба отверстия.*

Такой вывод несовместим с представлением о траекториях. Если бы электрон в каждый момент в определенной точке пространства и двигался по траектории, он проходил бы через определенное отверстие – первое или второе.

Явление же дифракции доказывает, что *в прохождении каждого электрона участвуют оба отверстия – и первое, и второе.*

Таким образом, *дифракция электронов и других микрочастиц доказывает справедливость гипотезы де Бройля и подтверждает корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц вещества.*

**<http://www.youtube.com/watch?v=Vvku9MMZItM>**