

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight shadow effect.

# **Физика колебаний и волн. Квантовая физика.**

# Лекция № 11

## Экспериментальные основы квантовой физики (продолж).

1. *Гипотеза де Бройля .*
2. *Опыт Дэвиссона и Джермера.*
3. *Дифракция и интерференция  
частиц.*

# Гипотеза де Бройля

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 электрона в виде малой механической частицы, характеризующейся определенными координатами и определенной скоростью.*

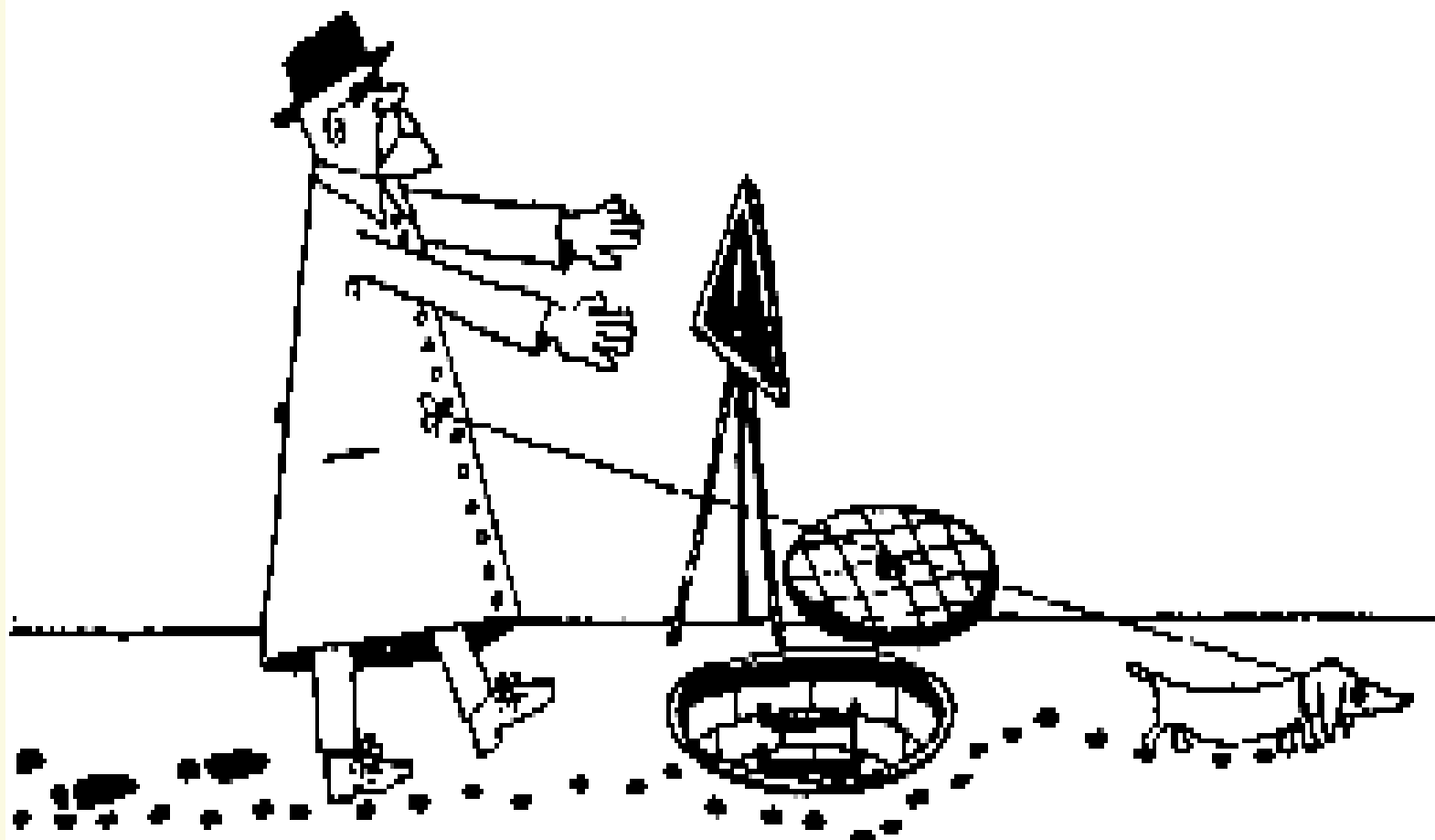
Мы уже знаем, что в оптических явлениях *наблюдается своеобразный дуализм:* наряду с явлениями дифракции, интерференции (*волновыми явлениями*) наблюдаются и явления, характеризующие *корпускулярную природу света* (фотоэффект, эффект Комптона).



Принц Луи Виктор де Бройль — потомок королей (1892 – 1987), французский физик, удостоенный Нобелевской премии 1929 г. по физике за открытие волновой природы электрона. В 1924, распространив идею А.Эйнштейна о двойственной природе света на вещество, предположил, что поток материальных частиц должен обладать и волновыми свойствами, связанными с их массой и энергией (волны де Бройля). Экспериментальное подтверждение этой идеи было получено в 1927 в опытах по дифракции электронов в кристаллах, а позже она получила практическое применение при разработке магнитных линз для электронного микроскопа. Концепцию де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме использовал Э.Шредингер при создании волновой механики.

«***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.



Де Бройлю пришлось находить верную дорогу ощупью.

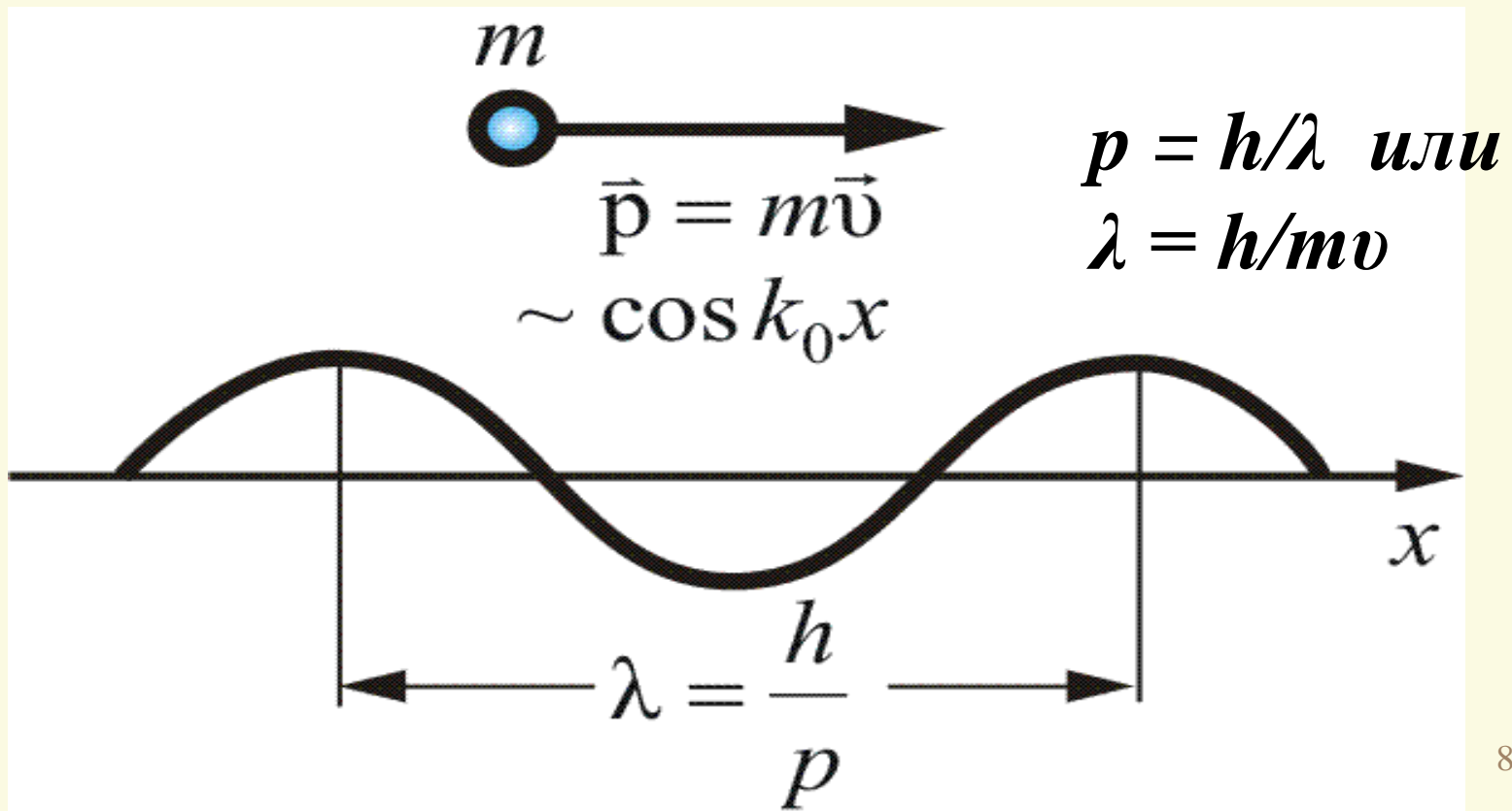


В 1924 г. **Луи де Бройль** выдвинул смелую гипотезу, что **дуализм не является особенностью только оптических явлений, а имеет универсальный характер:**

**частицы вещества также обладают волновыми свойствами.**



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**.

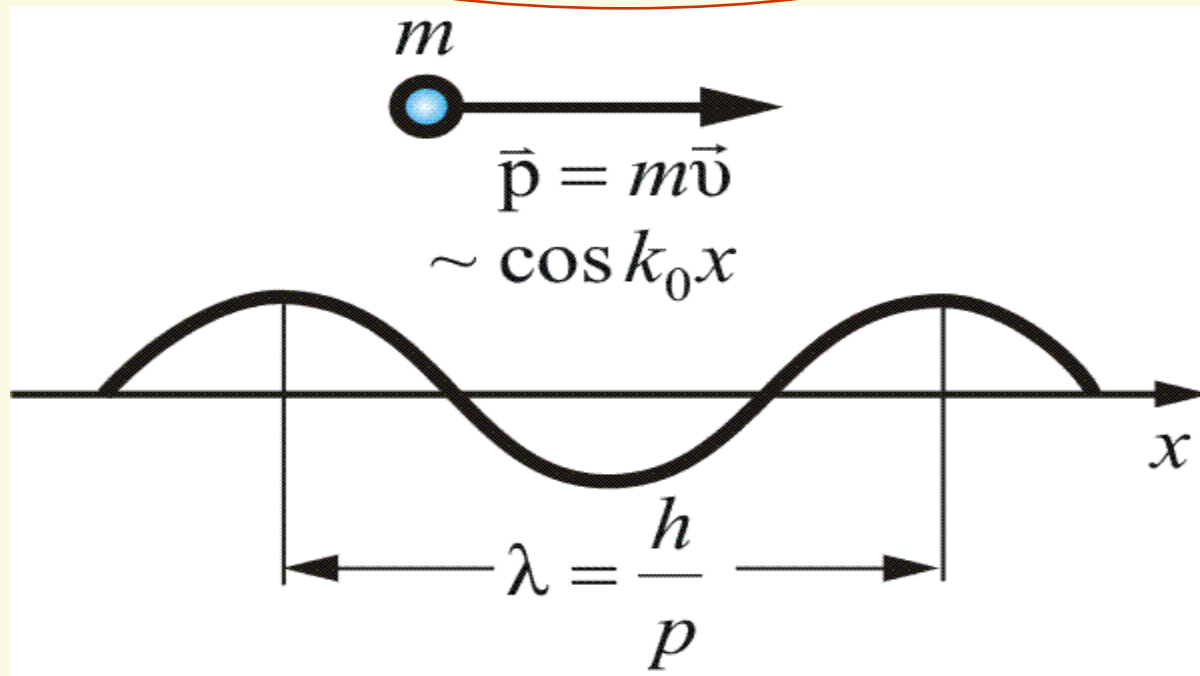




Поскольку кинетическая энергия сравнительно медленно движущейся частицы

$E = mv^2/2$ , то длину волны де Бройля можно выразить и через энергию или скорость:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{m \cdot v}$$



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.

Поэтому, *основные геометрические закономерности дифракции частиц, ничем не отличаются от закономерностей дифракции любых волн.*

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

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:

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

Смелость гипотезы де Бройля заключалась именно в том, что это соотношение постулировалось не только для фотонов, но и для других микрочастиц, в частности для таких, которые обладают массой покоя. А дерзость состояла в том, что никаких экспериментальных фактов в подтверждение гипотезы не было. Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волновой процесс с **длиной волны**, определяемой по формуле **де**

**Бройля:**

$$\lambda_B = h / mv$$

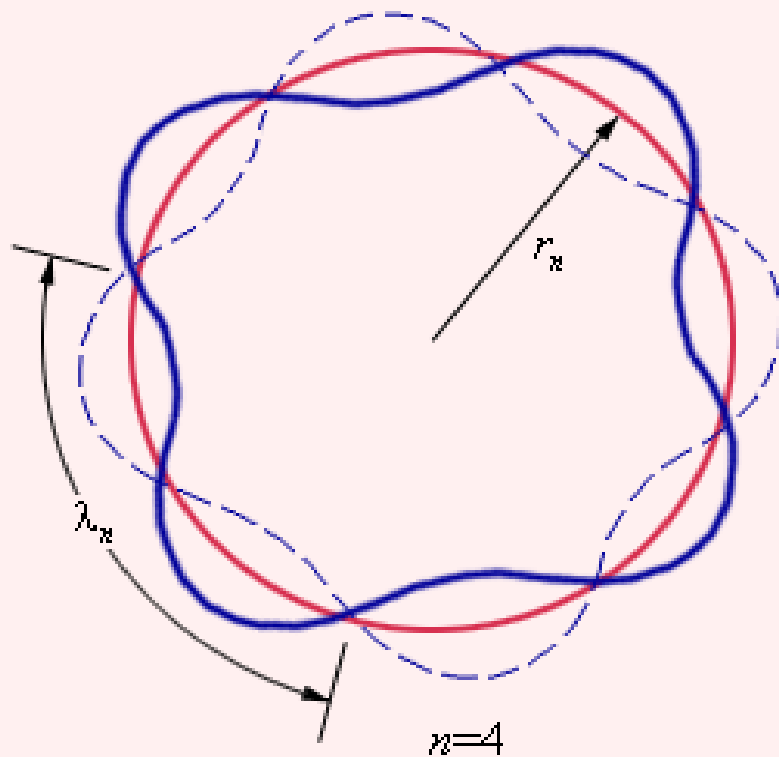
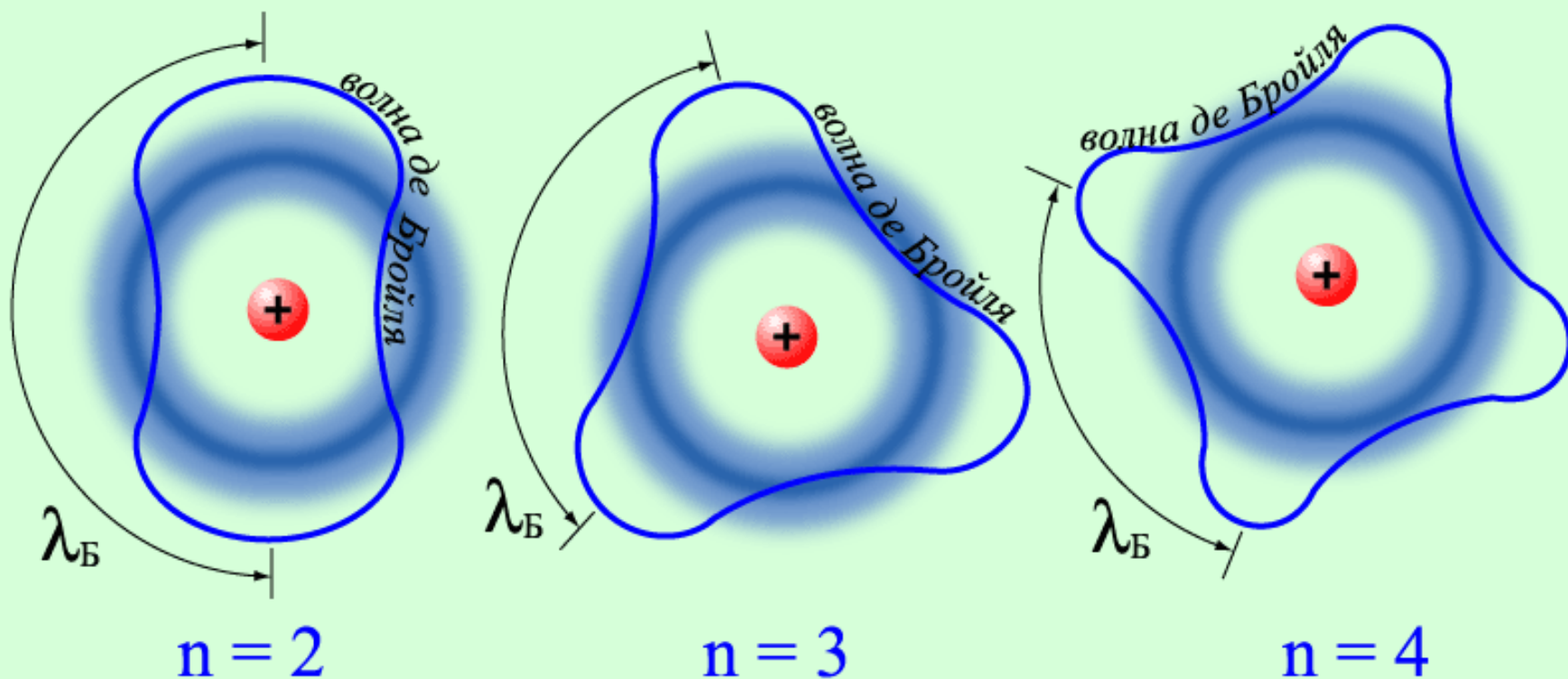


Иллюстрация идеи де Бройля возникновения стоячих волн на стационарной орбите для случая  $n = 4$ .

**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.**



*На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число  $n$  длин волн де Бройля*

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

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

Однако, она вскоре была подтверждена многими экспериментами (в частности опытом Дэвиссона и Джермера по дифракции электронов).





# 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 при рассеянии частиц, с точки зрения классической физики, невозможна.*

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

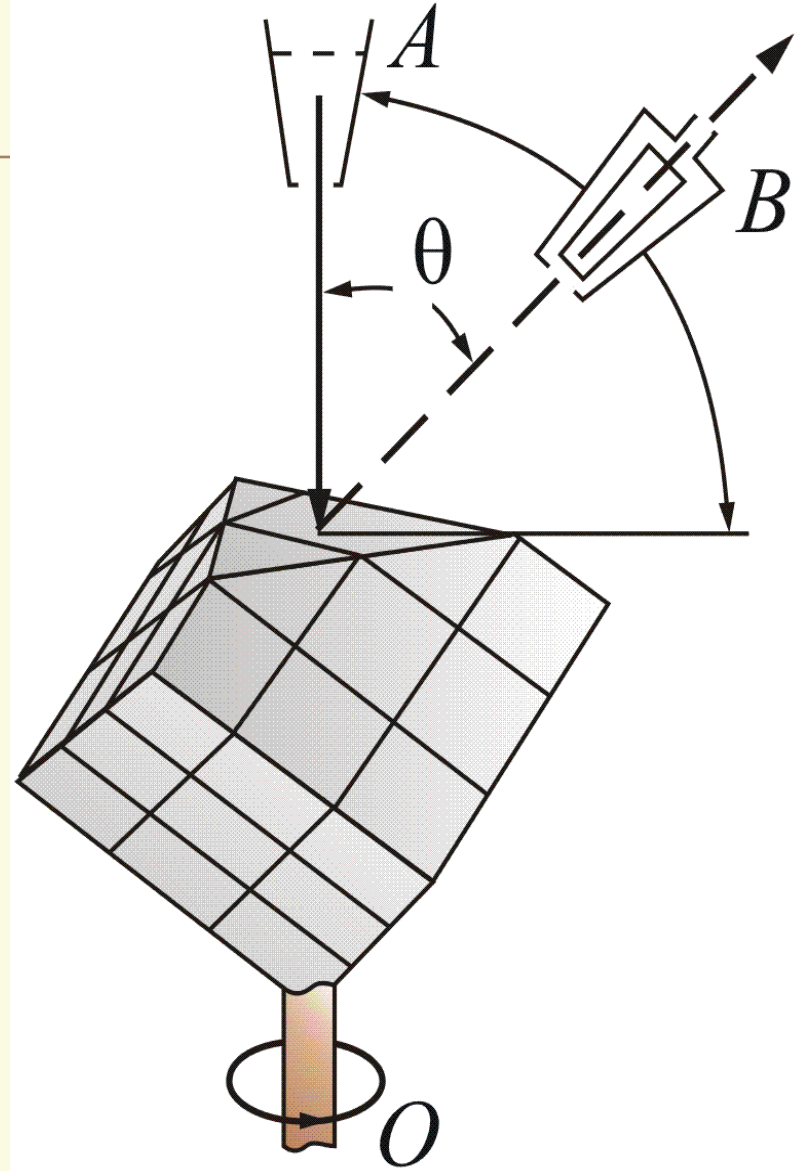
*Основным положением квантовой механики, описывающей поведение микрообъектов, является корпускулярно-волновой дуализм, т.е. двойственная природа микрочастиц.*

Так, поведение электронов в одних явлениях, например при наблюдении их движения в камере Вильсона или при измерении электрического заряда в фотозффекте, 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.*

# Опыт Дэвиссона и Джермера

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 Ni**





## Клинтон Джозеф ДЭВИССОН

Clinton Joseph Davisson, 1881–1958

Американский физик Работал в Кавендишской лаборатории в Англии ассистентом Дж. Дж.

Томсона (первооткрывателя электрона), в 1917 году перешел в лабораторию компании Western

Electric (ныне Lucent Technologies) в Нью-Йорке. Совместно

с **Лестером Халбертом Джермером (Lester Halbert Germer, 1896–1971)** сделал открытие

волновых свойств электрона при рассеянии

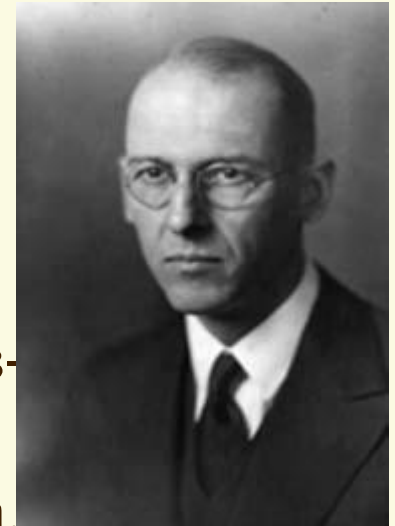
пучка электронов на монокристалле. За свою

работу разделил Нобелевскую премию по физ-

ке за 1937 год с Джорджем Томсоном (George Thomson, 1892–1975), сыном Дж. Дж. Томсона,

который независимо от американских ученых в том же 1927 году экспериментально открыл дифракцию электронов в

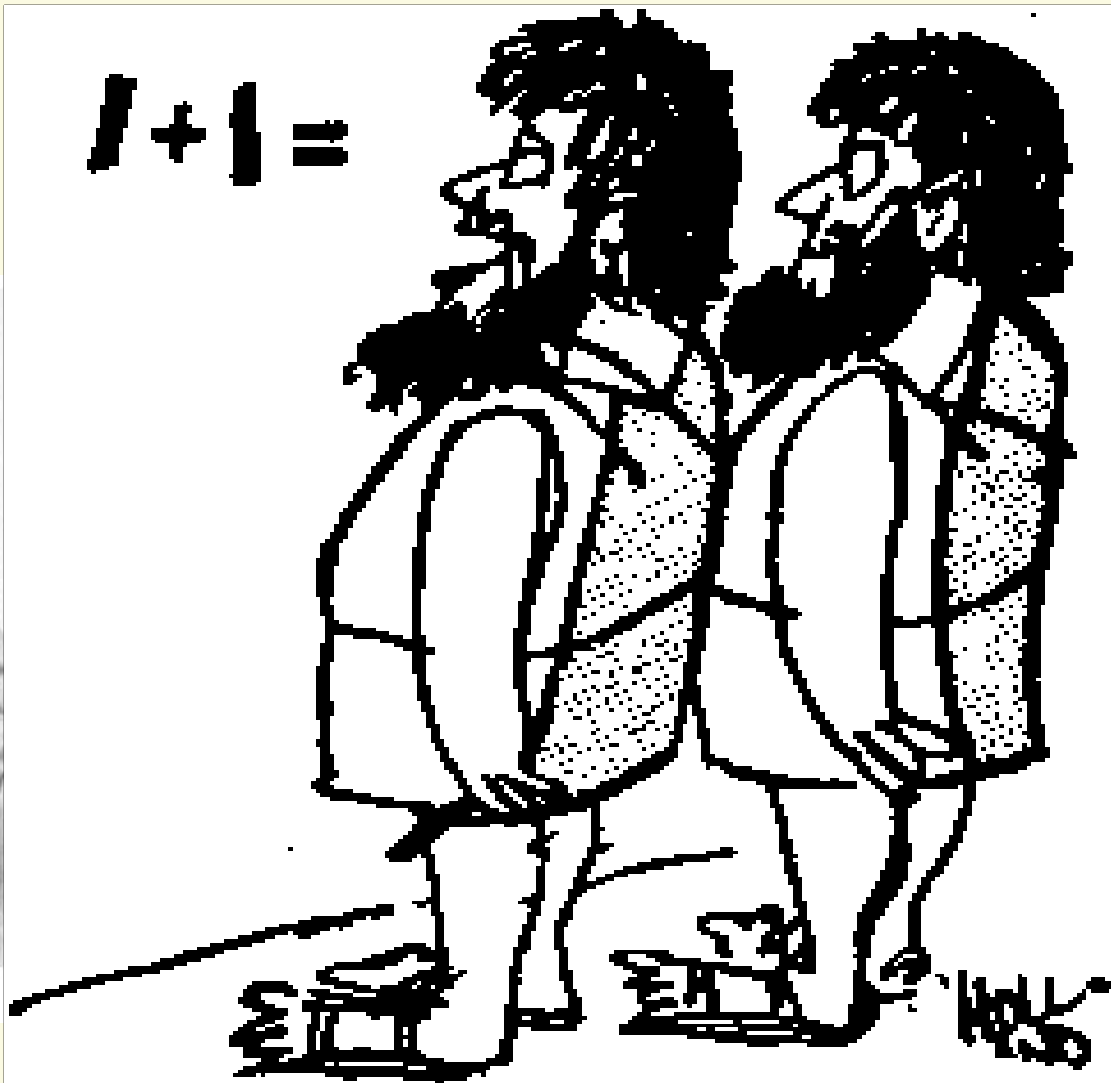
Англии.



$$1 + 1 =$$



Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер

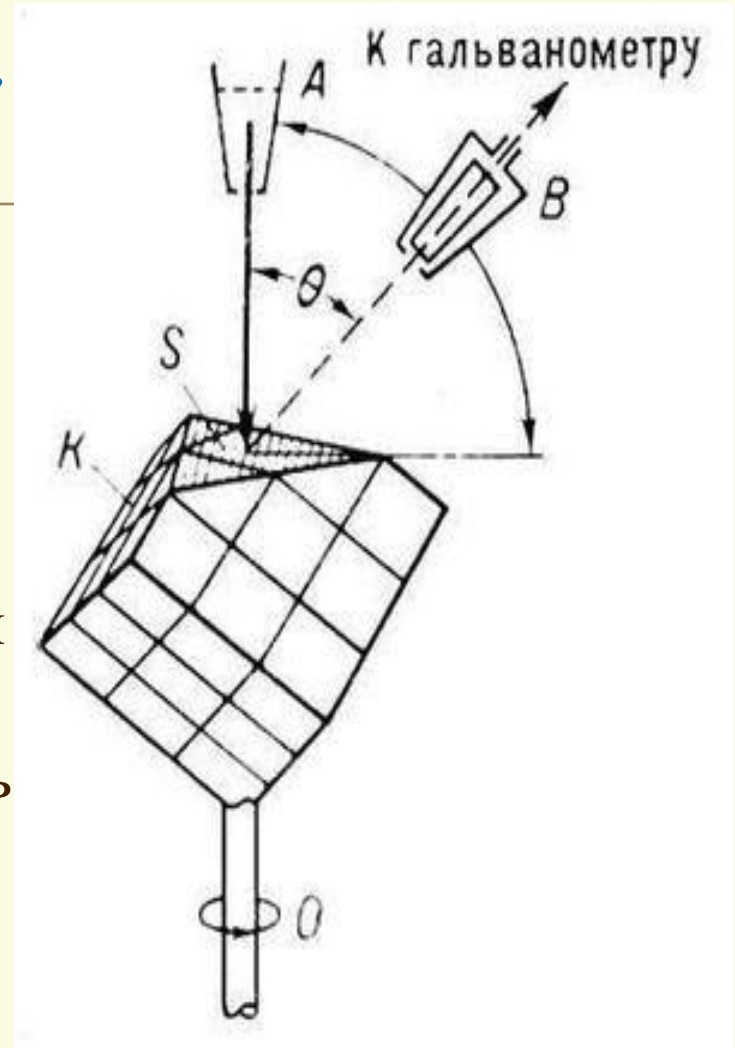


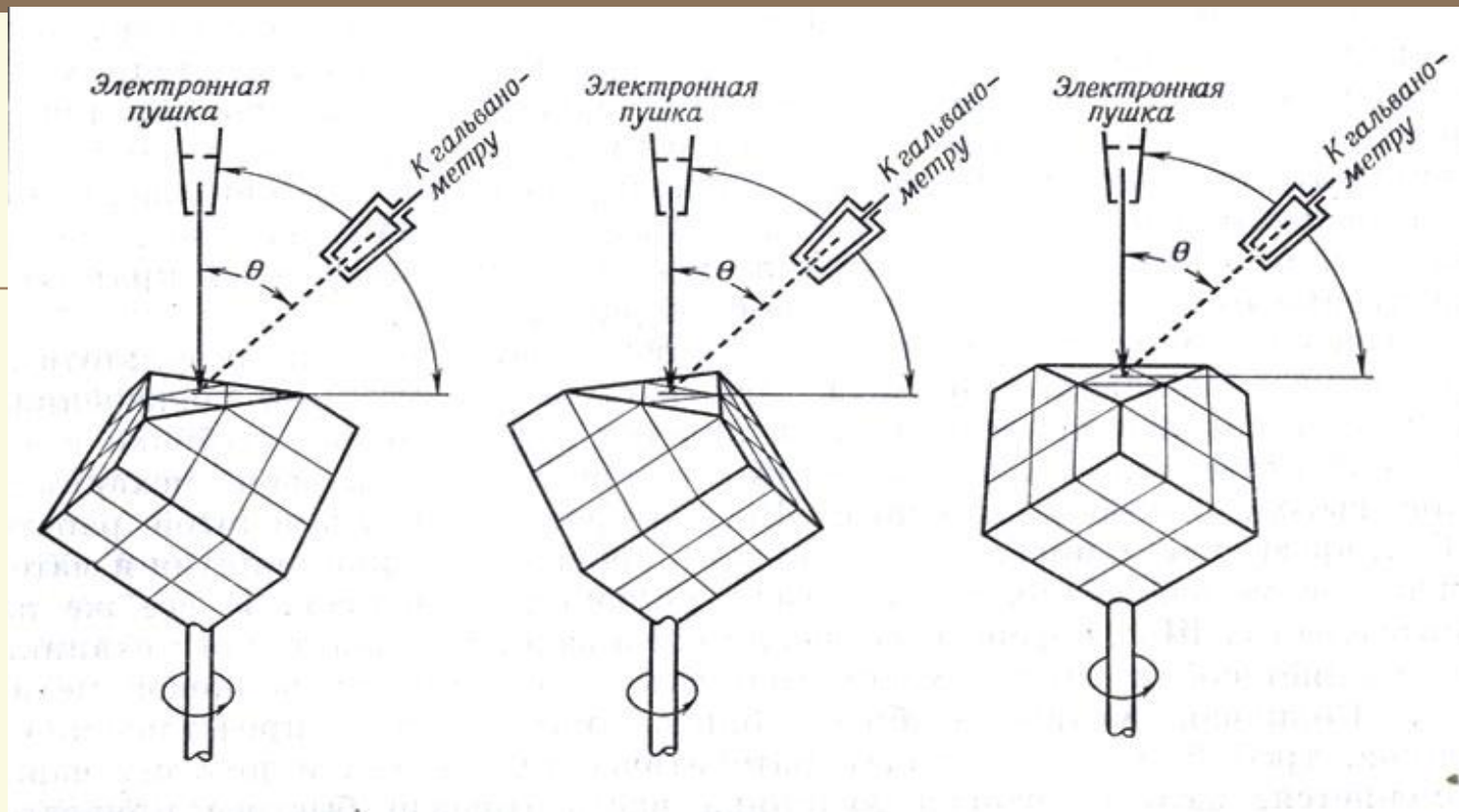
— Ну, кажется, мы на пороге великого открытия



Слаботочный пучок  
*термоэмиссионных электронов*  
направлялся нормально на  
поверхность среза  
*монокристалла никеля.*

Монокристалл можно было поворачивать вокруг линии падения пучка, детектор же рассеянных электронов позволял проводить их селекцию по углу рассеяния. Имелась возможность сканировать, по отношению к монокристаллу, почти всю заднюю полусферу рассеяния — не затенённую электронной пушкой.





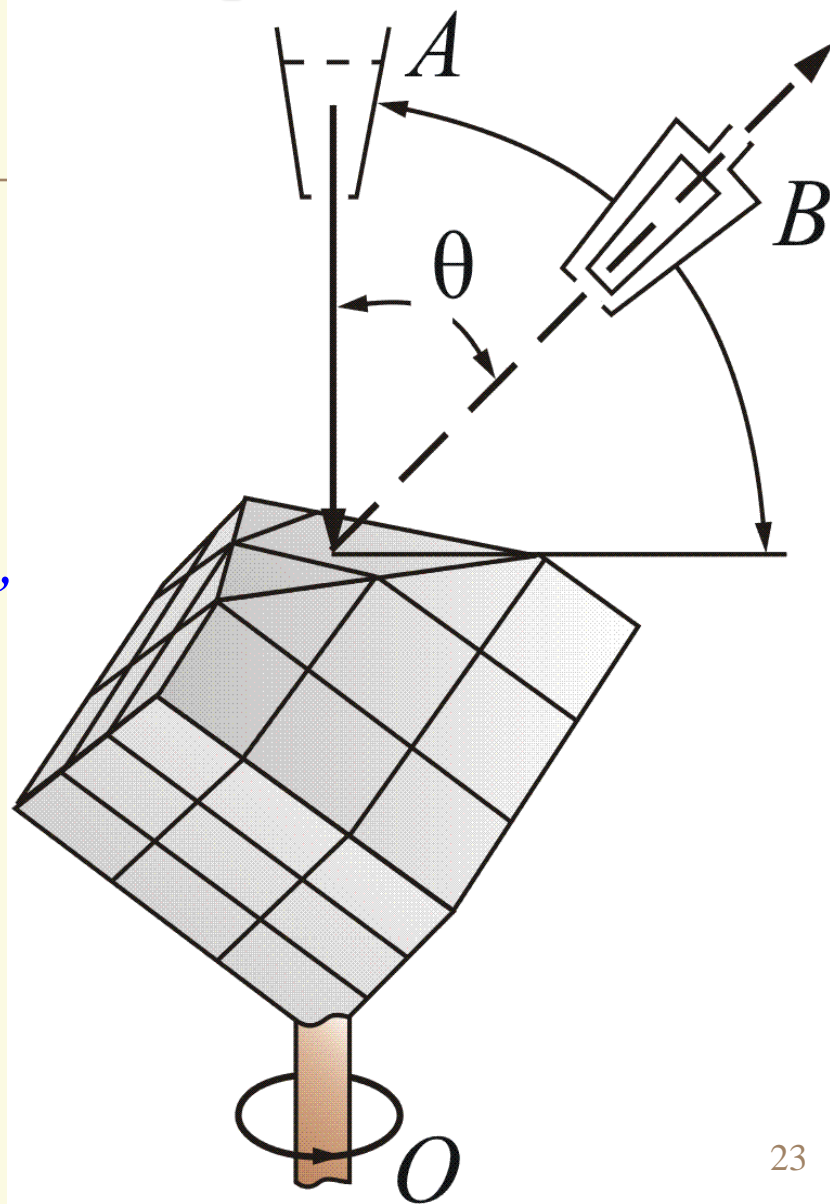
На плоскость кристалла **никеля**, показанного в виде **куба** со срезанным углом, направляется пучок электронов определенной скорости. Цилиндр Фарадея, служащий для сбора дифрагированных электронов, может перемещаться по дуге вокруг кристалла. Кристалл тоже может вращаться вокруг оси, совпадающей с направлением падающего пучка электронов. Таким способом можно измерять интенсивность дифрагированных лучей в разных направлениях. Эти опыты дали подтверждение (в том числе и количественное) гипотезы де Бройля.

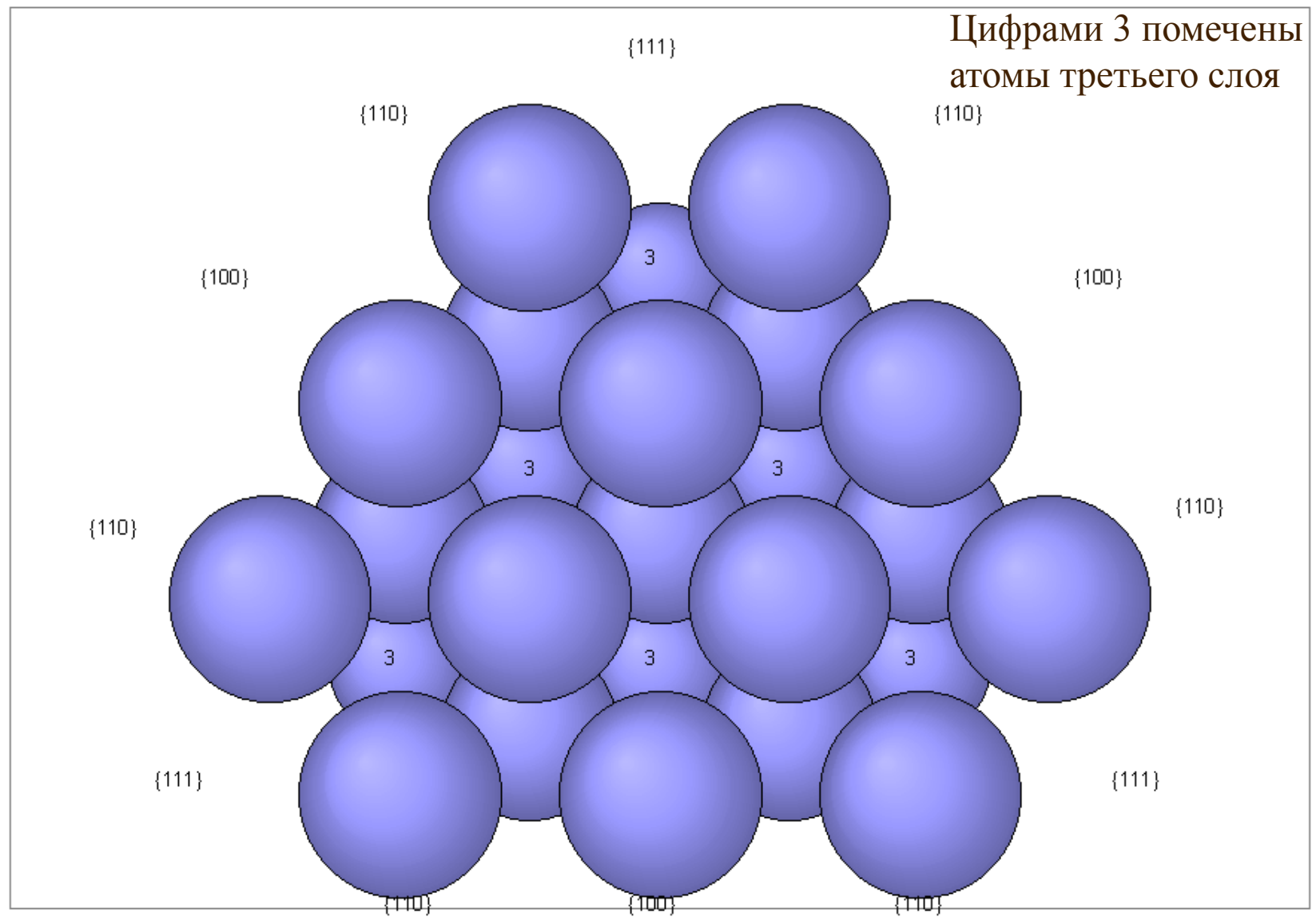


## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

Кристаллы обладают высокой степенью упорядоченности.

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





Срез монокристалла *Ni* был выполнен по плоскости  $\{111\}$ , т.е. ортогонально большой диагонали куба ГЦК решётки.

## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

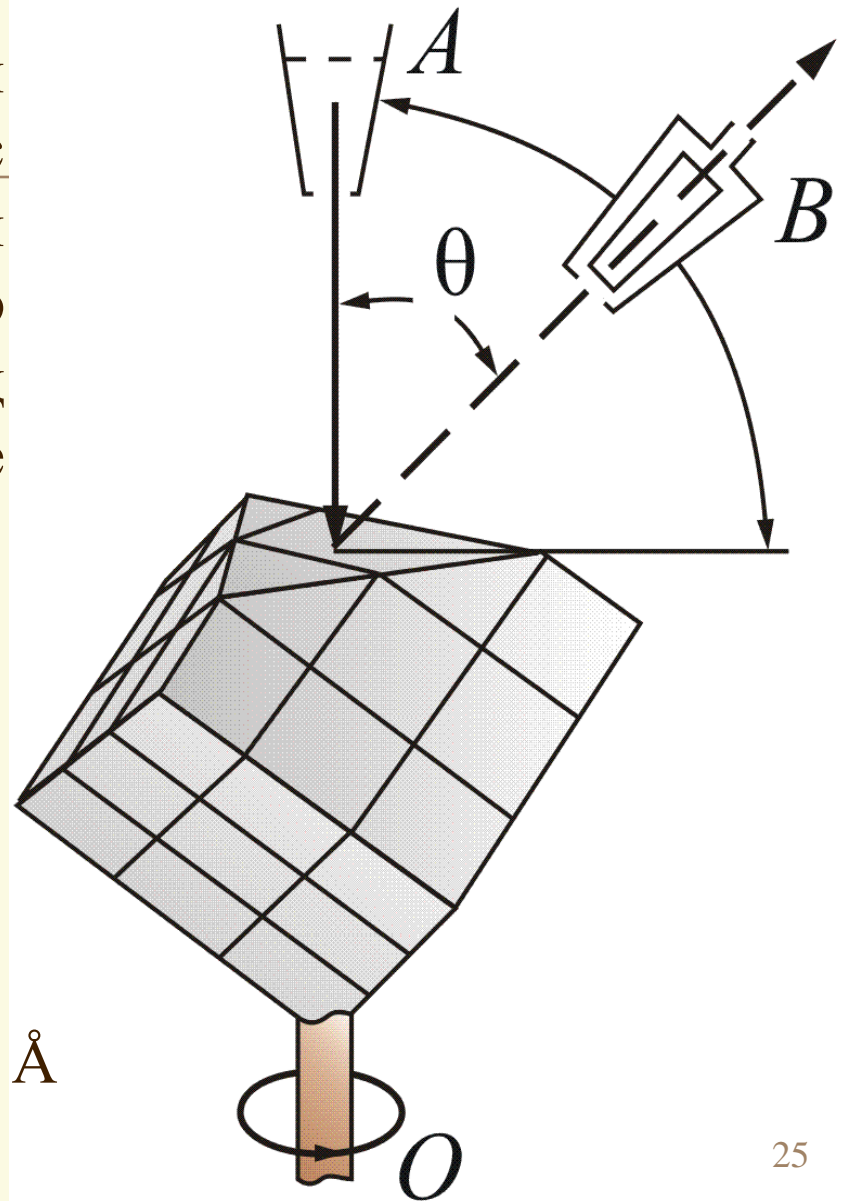
Если ускорять электроны электрическим полем с напряжением  $U$ , то они приобретут кинетическую энергию  $E_{кин} = eU$ , ( $e$  – заряд электрона), что после подстановки в равенство

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_{кин}}} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$

числовых значений даёт

$$\lambda = \frac{12,27}{\sqrt{U}}$$

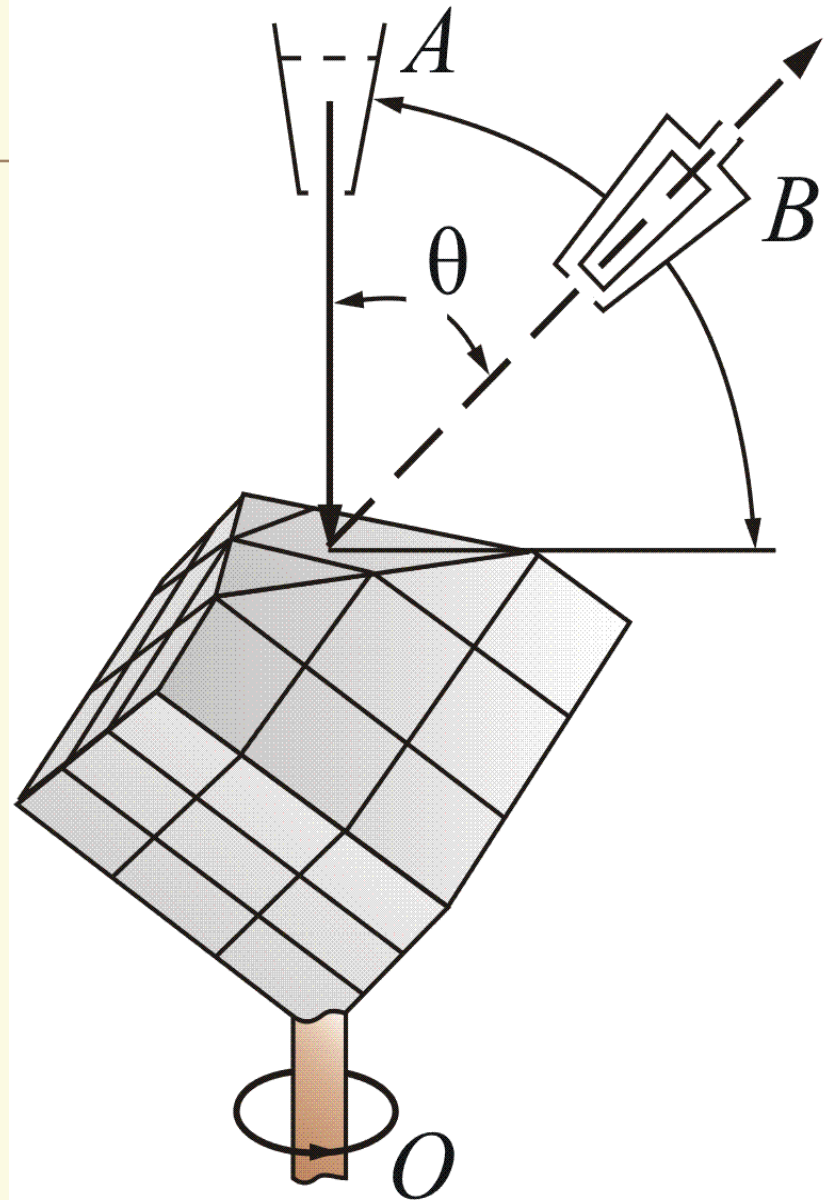
Здесь  $U$  выражено в В, а  $\lambda$  – в  $\text{\AA}$   
( $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ).

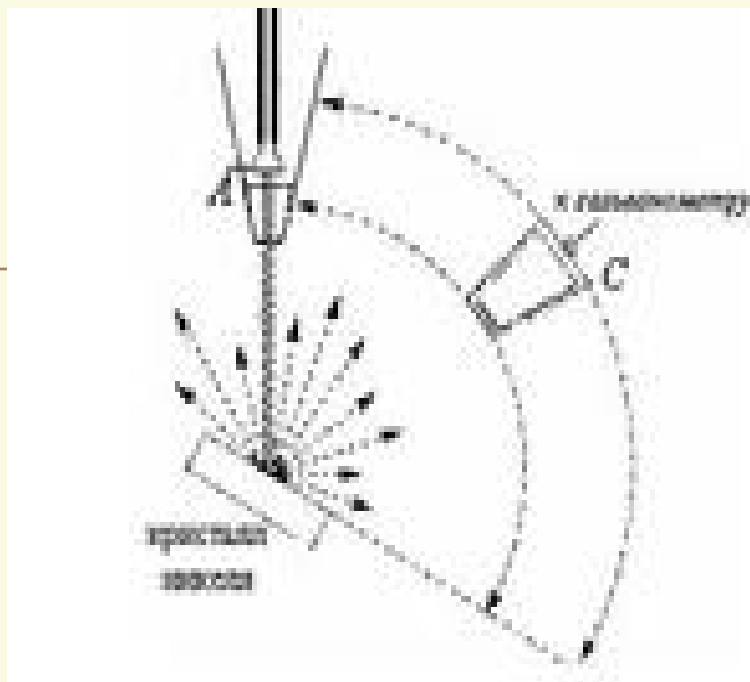


## Дифракции электронов на монокристаллах никеля

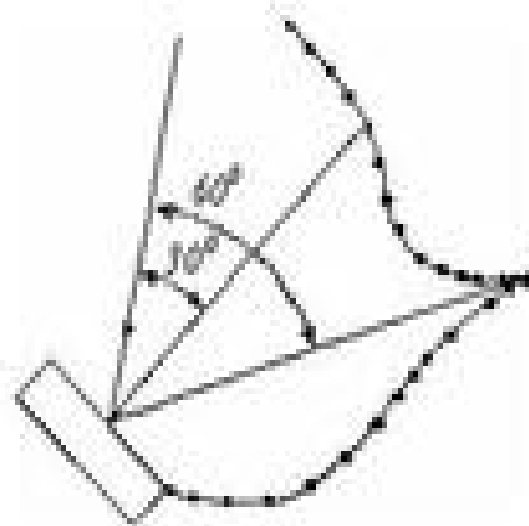
При напряжениях  $U$  порядка 100 В ( $\sqrt{150} = 12,25$ ), получаются так называемые «медленные» электроны с  $\lambda$  порядка 1 Å. Эта величина близка к межатомным расстояниям  $d$  в кристаллах, которые составляют несколько Å, и

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



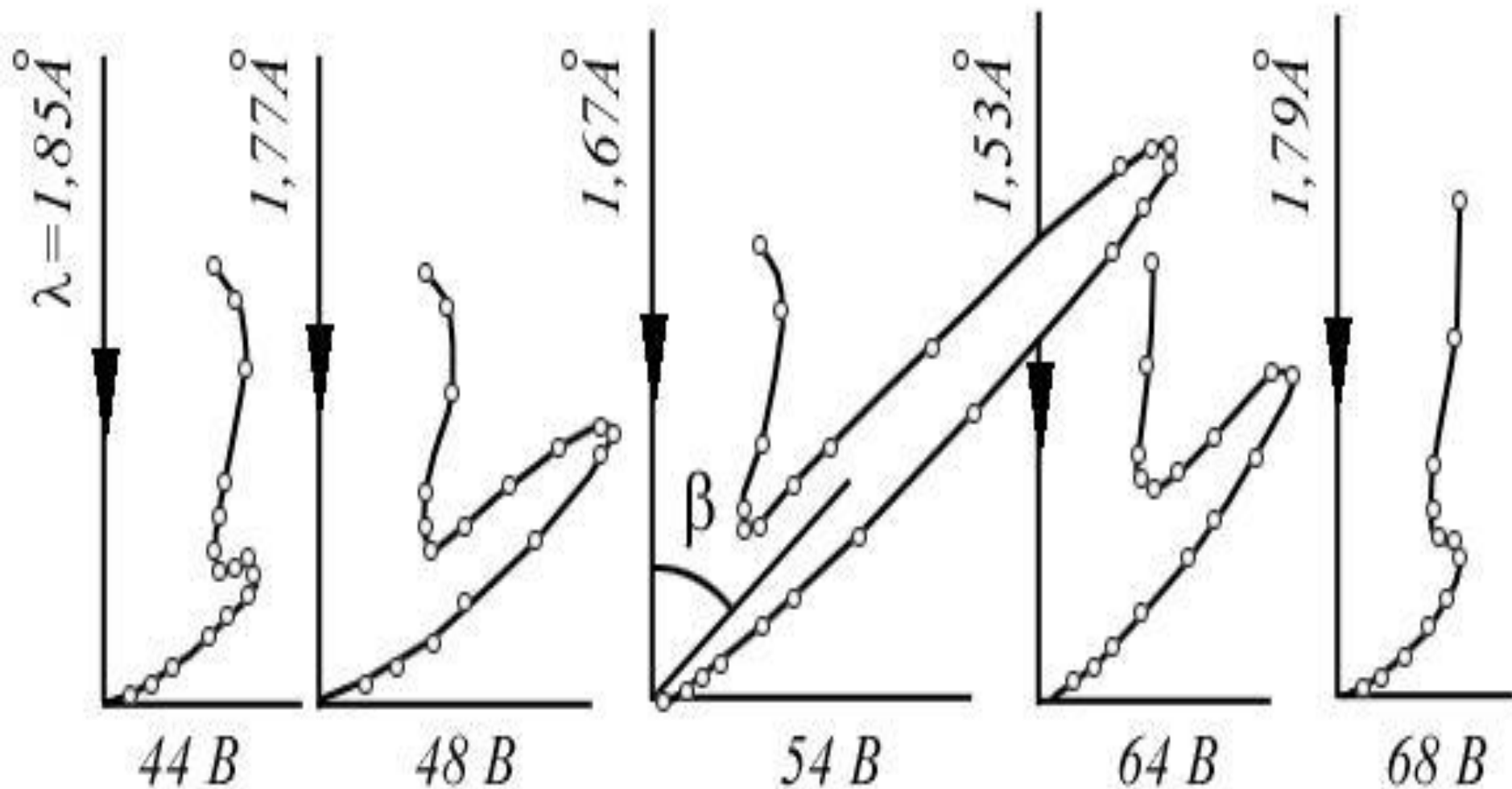


Параллельный пучок электронов одинаковой скорости, создаваемый “электронной пушкой”  $A$  направлялся на монокристалл  $Ni$ . Рассеянные электроны улавливались коллектором  $C$ , соединенным с гальванометром.



Полярная диаграмма интенсивности рассеяния электронов. На ней имеется резко выраженный максимум, соответствующий зеркальному отражению электронов, когда угол падения равен углу отражения. Для поликристал.- нет.

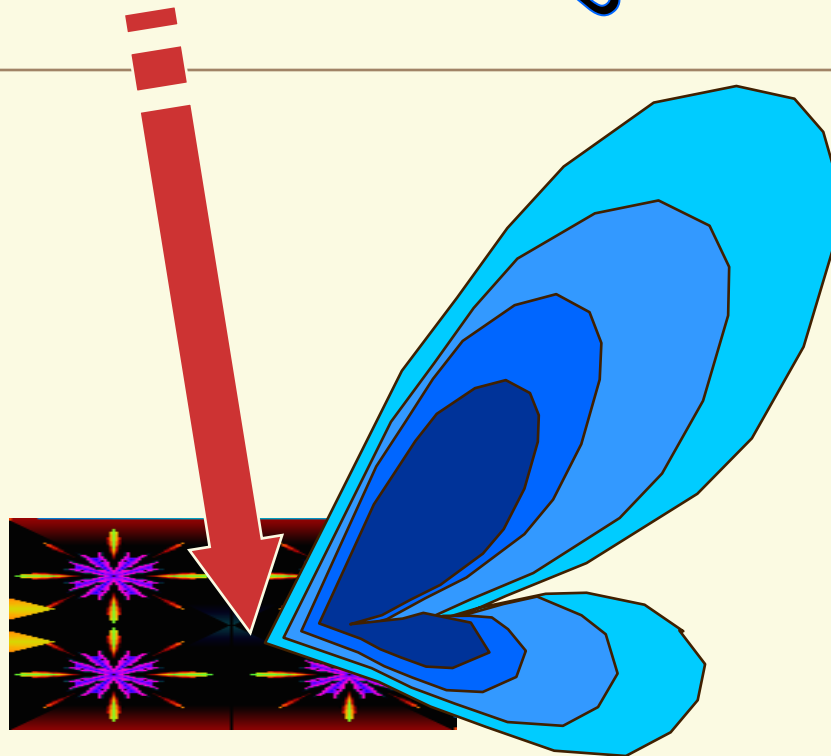




Динамика дифракционного отражения  
 электронов при изменении ускоряющей  
 разности потенциалов  $U$  :

$$\lambda = \frac{12,27}{\sqrt{U}}$$

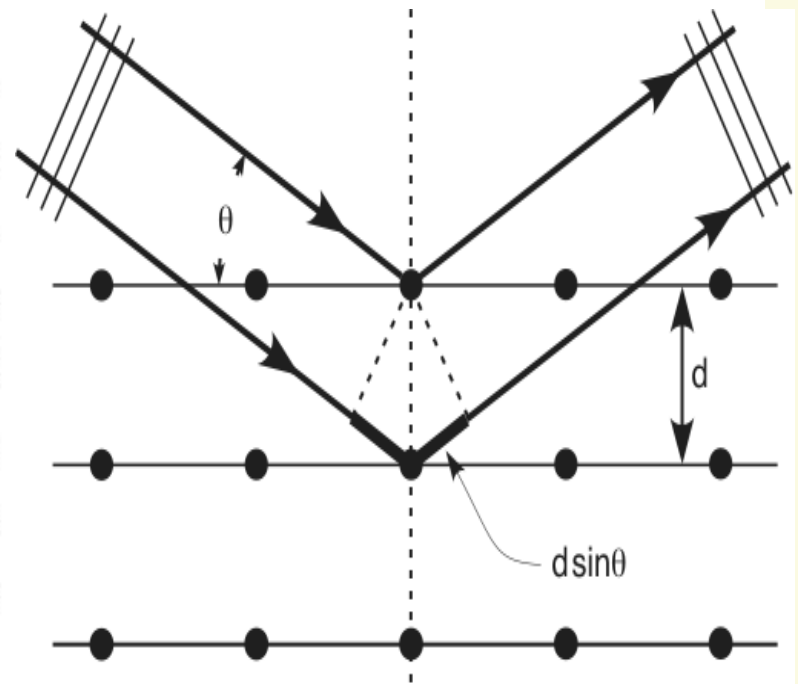
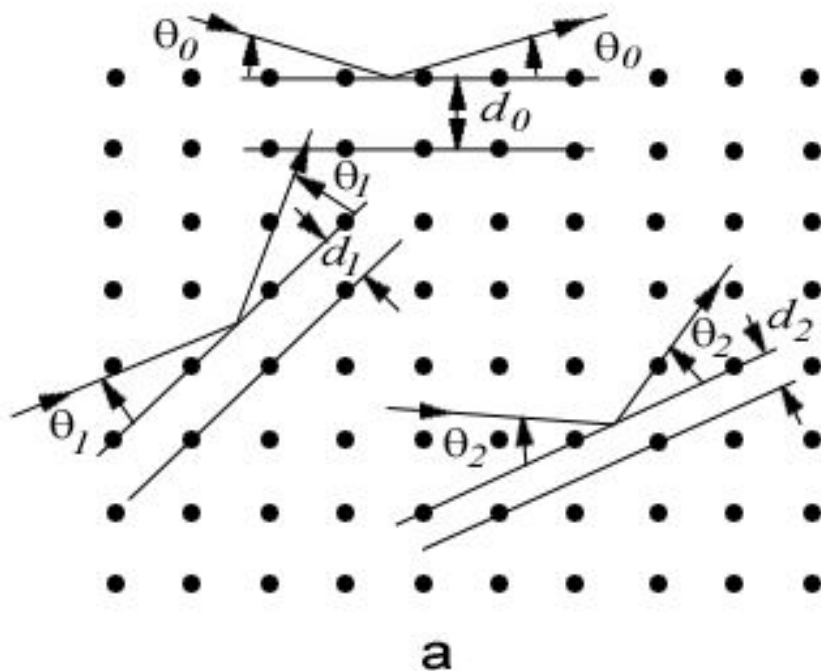
поток электронов



Ni монокристалл

Σ Γ К Ф Д Σ К Σ  
Σ Γ К Ф Д Σ К Σ





Электроны с дебройлевской длиной волны  $\lambda$  могут дифрагировать на различных атомных плоскостях (рис.а), выбор которых осуществляется взаимной ориентацией падающего пучка электронов и рассеивающего кристалла.

При значении угла, удовлетворяющем условию Брэгга-Вульфа:  $2d \sin \theta = n\lambda$  -дифракционный максимум отраженной волны. Здесь  $\theta$  - брэгговский угол,  $d$  - постоянная решетки кристалла,  $n = 1, 2, 3, \dots$  порядок отражения.

В опытах Дэвиссона и Джермера максимальное отражение электронов наблюдалось при ускоряющей разности потенциалов  $U = 54 \text{ В}$ , что соответствует дебройлевской длине волны

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_{\text{кин}}}} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = 0,167 \text{ нм} = 1,67 \text{ \AA}$$

Длина волны, определяемая из условия Брэгга-Вульфа, для постоянной решетки никеля,  $d = 2,15 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,15 \text{ \AA}$  равнялась  $\lambda = 0,165 \text{ нм} = 1,65 \text{ \AA}$ . Это совпадение экспериментальных и расчетных значений служит прекрасным *подтверждением гипотезы де Бройля о наличии у частиц волновых свойств.*

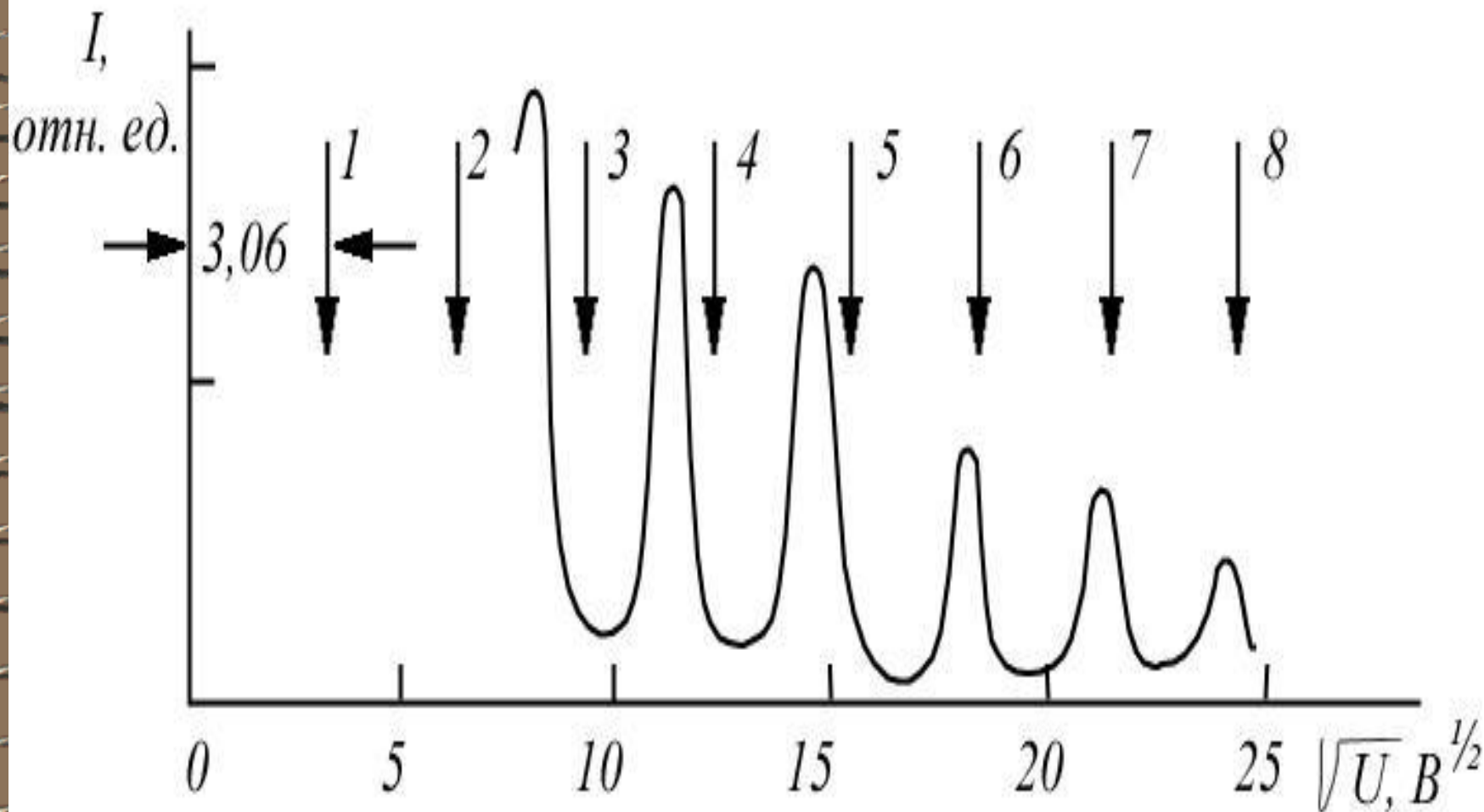
Дэвиссоном и Джермером была также измерена **интенсивность дифрагировавших электронов** при фиксированном угле отражения (постоянном угле скольжения  $\theta$ ) **в зависимости от ускоряющей разности потенциалов**  $U$ . Результаты этого опыта приведены на рис. . Наблюдаемые на эксперименте максимумы отражения отстоят друг от друга на равном по шкале  $\sqrt{U}$  расстоянии в  $3,06 B^{1/2}$ , что подтверждается в теории:

$$\frac{12,27}{\sqrt{U}} = \frac{2d \sin \theta}{n}$$

Отсюда:

$$\sqrt{U} = n \frac{12,27}{2d \sin \theta},$$

где  $U$  выражено в В, а  $\lambda$  — в Å.



Зависимость интенсивности пучка электронов, дифрагировавшего на монокристалле никеля, от ускоряющего напряжения  $U$  при постоянном значении угла  $\theta = 80^\circ$ . При малых  $n$  получались расхождения.

Причина указанного расхождения была выяснена Бете, который показал, что **электронным волнам де Бройля в кристалле надо приписать показатель преломления**, больший показателя преломления их в вакууме.

Положительно заряженные ионы кристаллической решетки металла и отрицательные электроны между ними пространственно не совпадают. Поэтому в металле существует электрическое поле, потенциал которого периодически меняется от точки к точке. При грубом рассмотрении его можно заменить **постоянным потенциалом**  $U_o$ , который получается из истинного потенциала путем усреднения его по пространству (для  $Ni$  :  $U_o \approx 15B$  ). Если электрон падает на металл и он прошел **ускоряющий потенциал**  $U$ , то его скорость будет

$v_1 \sim \sqrt{U}$  . В металле скорость этого электрона возрастет до:

$$v_2 \sim \sqrt{U + U_o}$$

При входе в металл траектория электрона и связанная с ним волна де Бройля должны испытать преломление. Относительный показатель преломления будет:

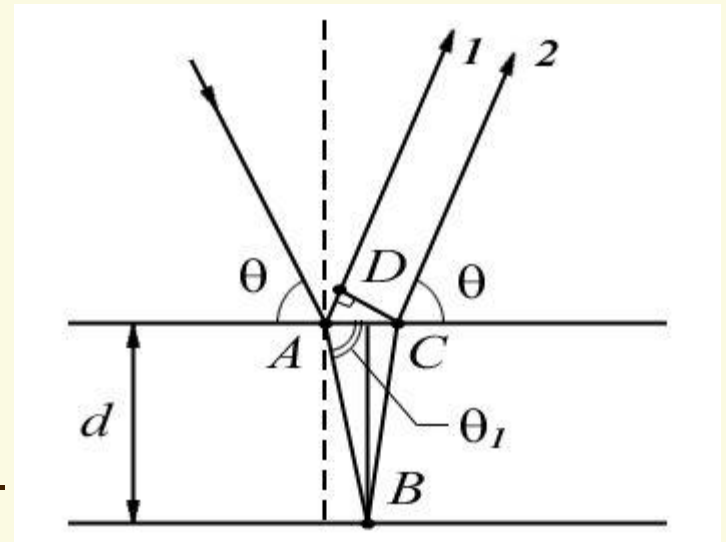
$$\mu_{21} = \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\sqrt{U + U_o}}{\sqrt{U}} = \sqrt{1 + \frac{U_o}{U}} \equiv \mu$$

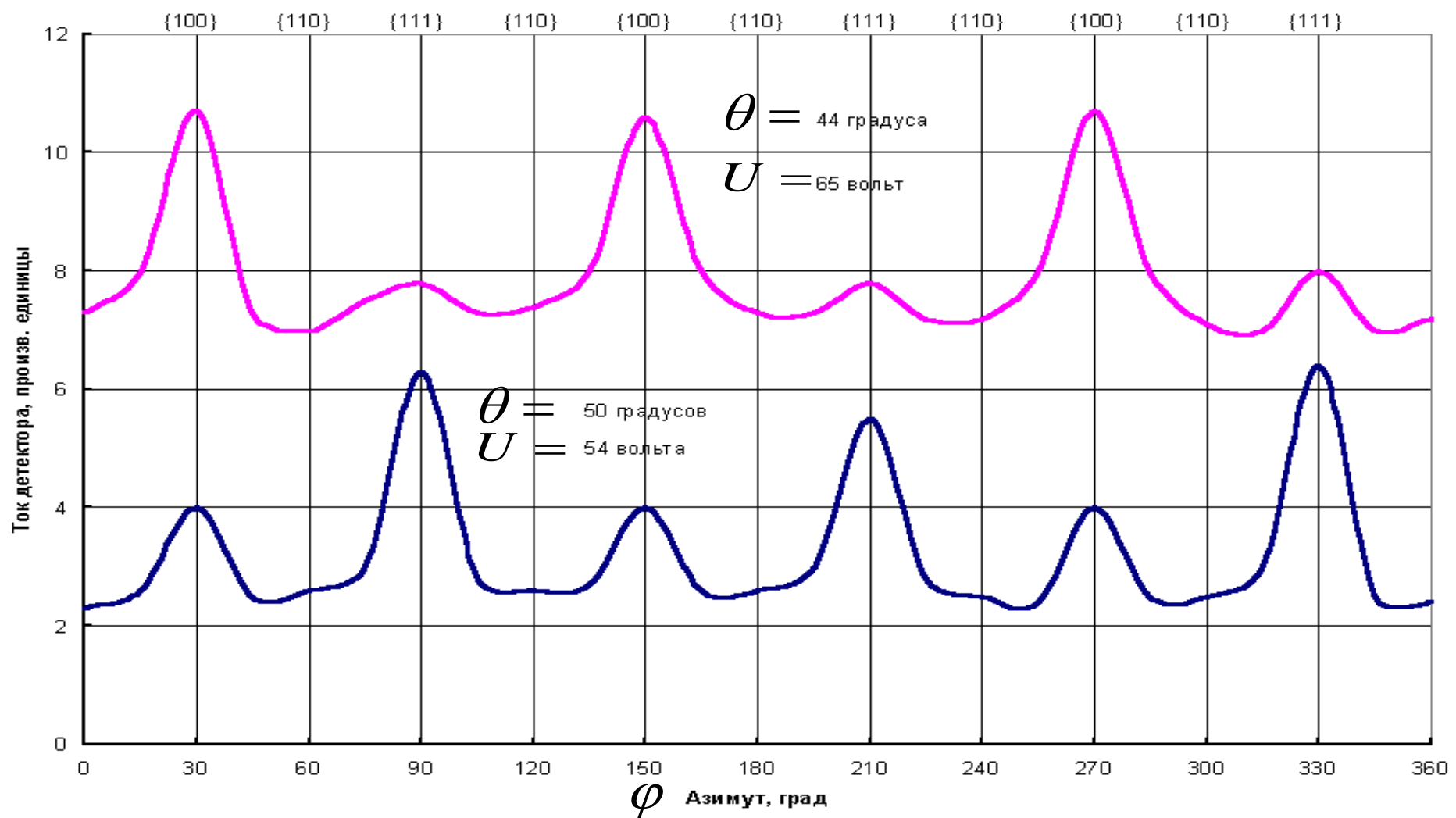
С учётом преломления электронных волн де Бройля условие *max* следует писать:

$$2d\mu \sin \theta_1 = n\lambda$$

Откуда с учётом закона преломления получаем:

$$2d\sqrt{\mu^2 - \cos^2 \theta} = n\lambda$$





Запись дифракционных максимумов в опыте Дэвиссона — Джермера по дифракции электронов при различных углах поворота кристалла  $\varphi$  для двух значений угла отклонения электронов  $\theta$  и двух ускоряющих напряжений  $U$ . Максимумы отвечают отражению от различных кристаллографических плоскостей, индексы которых указаны в скобках.



Отклонение гальванометра (в произвольных единицах)

Отклонение гальванометра

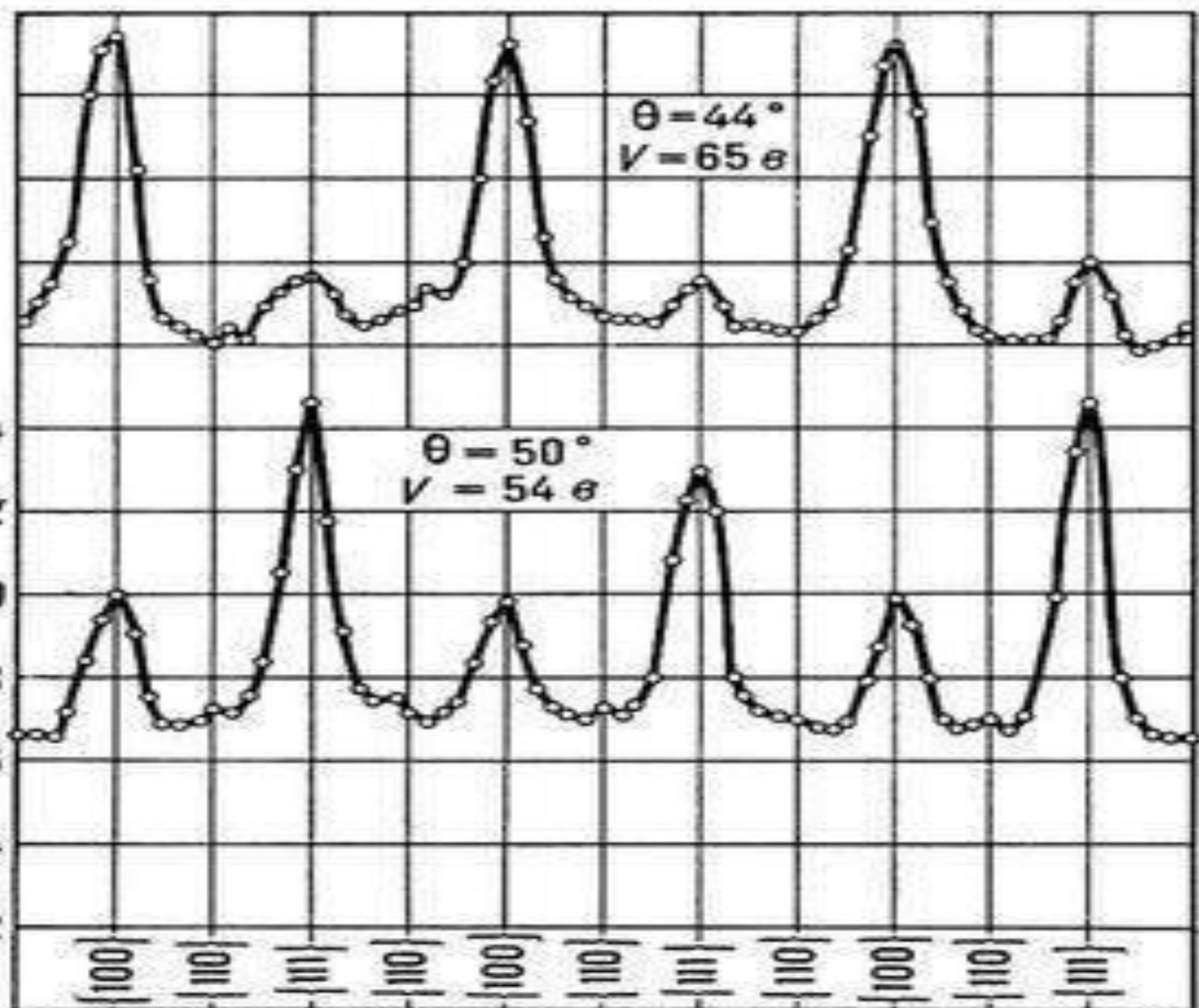
$\theta = 44^\circ$   
 $V = 65 \text{ в}$

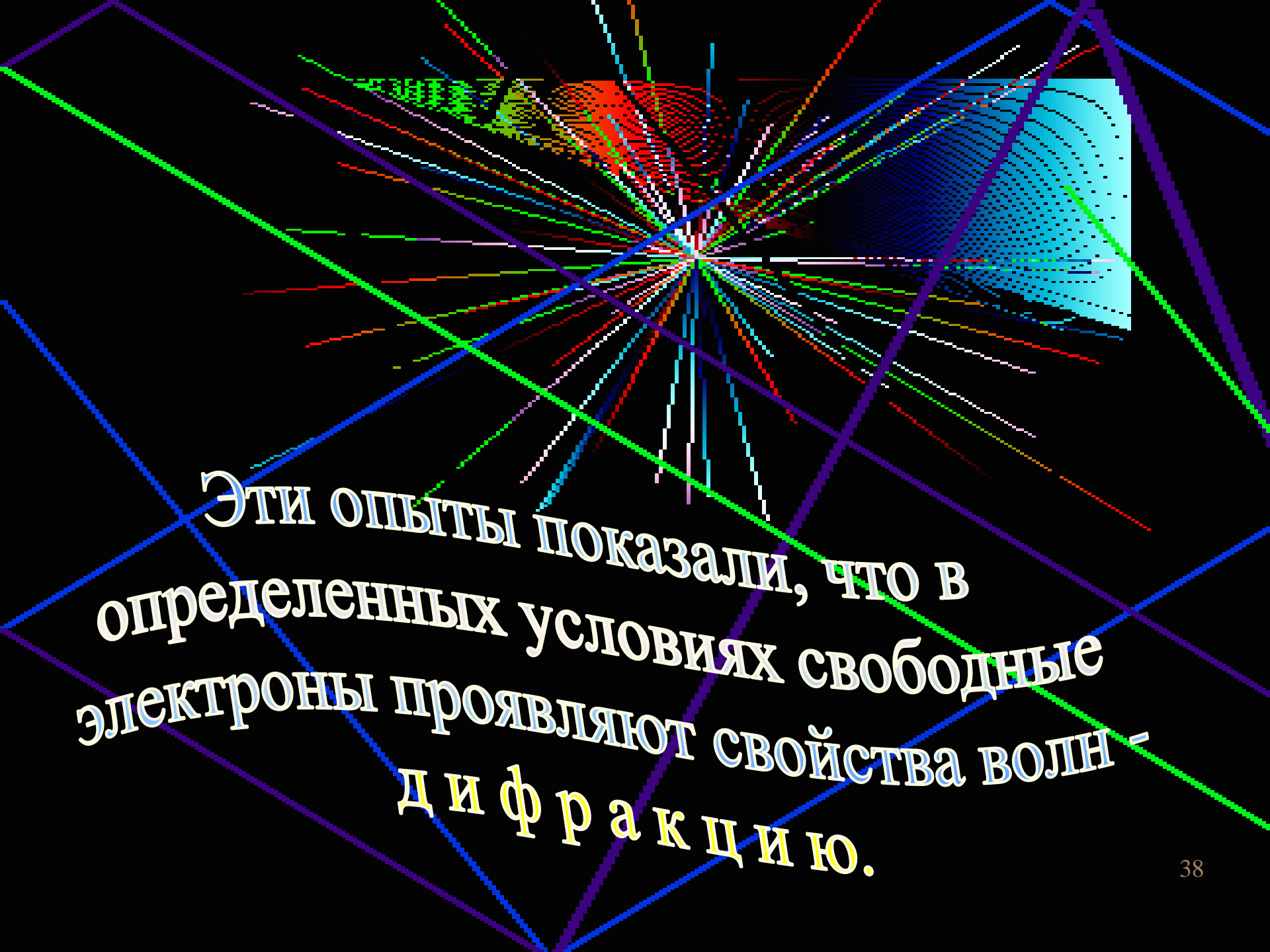
$\theta = 50^\circ$   
 $V = 54 \text{ в}$

$0^\circ$   $30^\circ$   $60^\circ$   $90^\circ$   $120^\circ$   $150^\circ$   $180^\circ$   $210^\circ$   $240^\circ$   $270^\circ$   $300^\circ$   $330^\circ$   $360^\circ$   $\varphi$

Угол поворота кристалла

$\overline{100}$   $\overline{110}$   $\overline{111}$   $\overline{110}$   $\overline{100}$   $\overline{110}$   $\overline{111}$   $\overline{110}$   $\overline{100}$   $\overline{110}$   $\overline{111}$





Эти опыты показали, что в  
определенных условиях свободные  
электроны проявляют свойства волн –  
дифракцию.

При более высоких ускоряющих электрических напряжениях (десятках кВ) электроны приобретают достаточную кинетическую энергию, чтобы проникать сквозь тонкие плёнки вещества (толщиной порядка  $10^{-5}$  см, т. е. тысячи Å).

Тогда возникает так называемая *дифракция быстрых электронов на прохождение*, которую на *поликристаллических плёнках алюминия и золота* впервые исследовали английский учёный *Дж. Дж. Томсон* и советский физик *П. С. Тартаковский*.

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*:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mkT}}$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,

$E_{кин} = 2/3kT$  - средняя кинетическая энергия атома

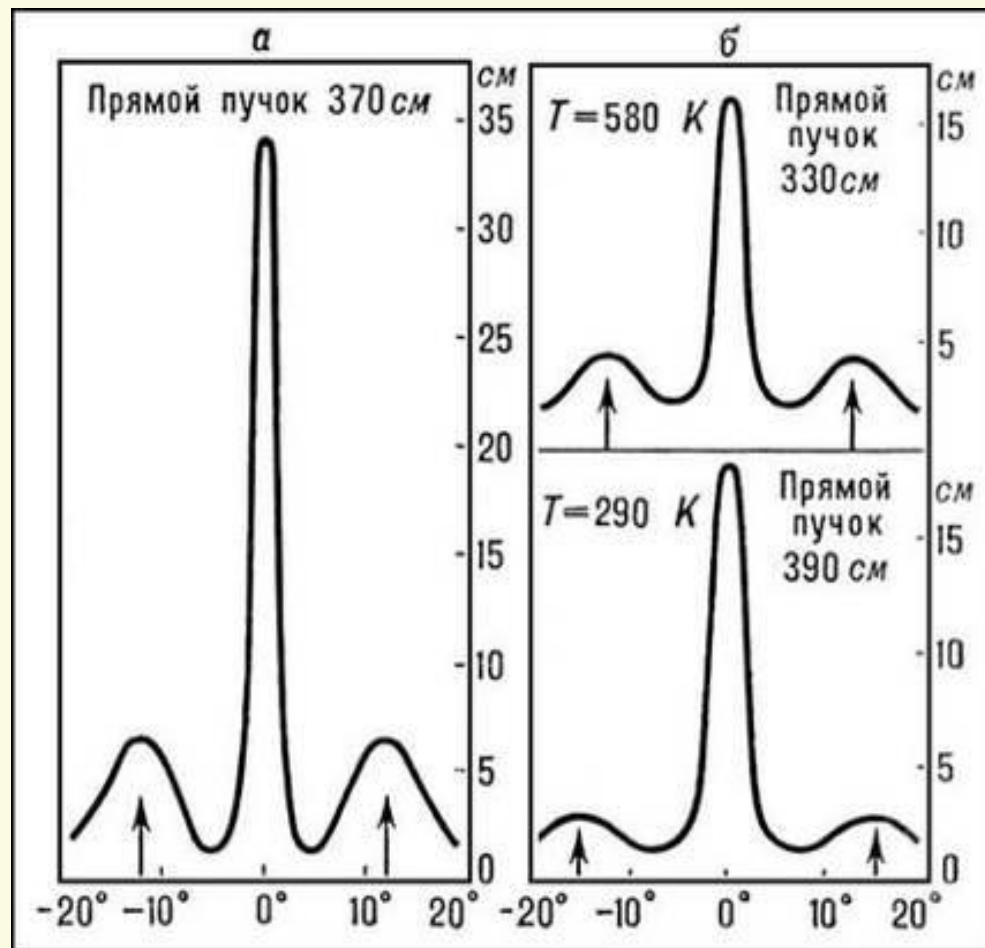
Для лёгких атомов и молекул (H, H<sub>2</sub>, He), и температур в сотни градусов Кельвина, длина волны также составляет около 1 Å.

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.

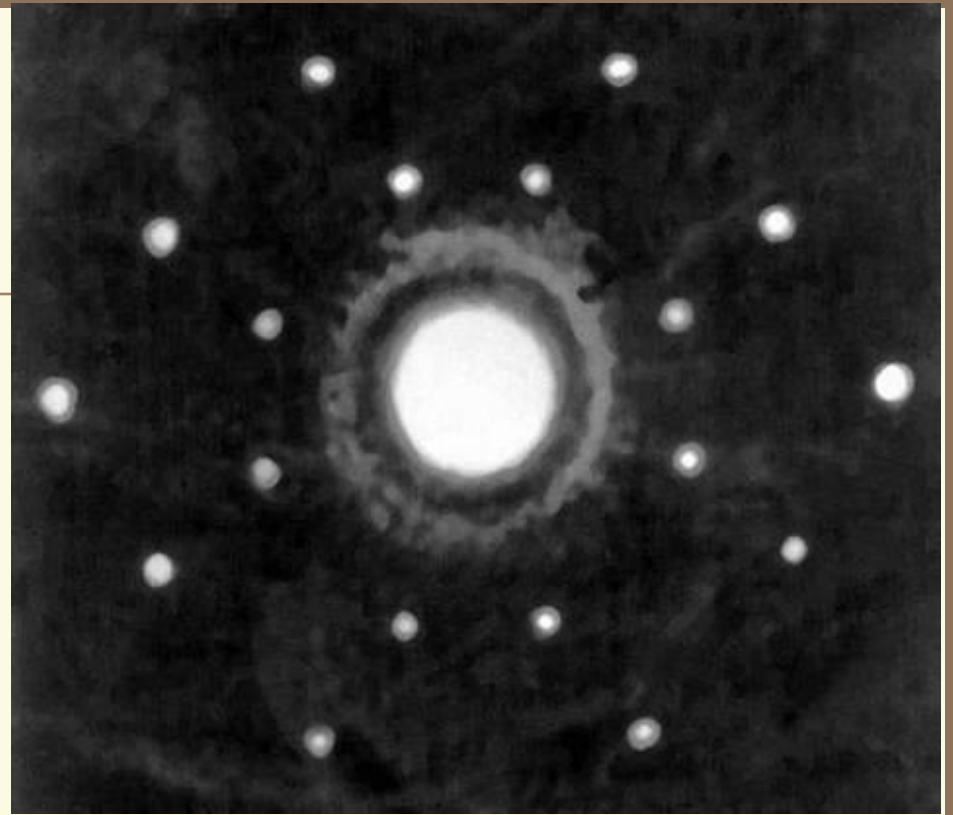
наблюдали дифракцию атомных и молекулярных пучков.





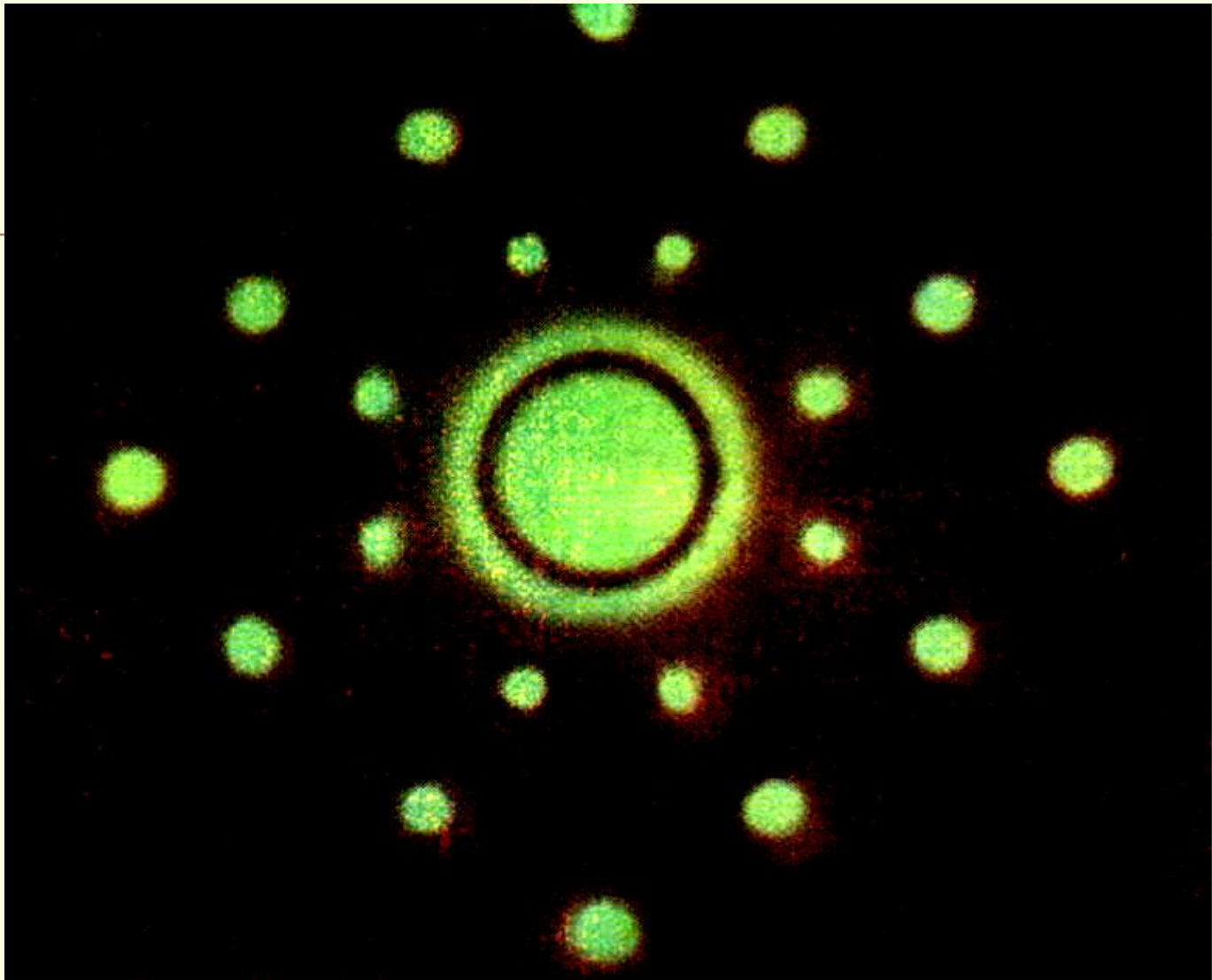
Позднее была обнаружена  
дифракция  
протонов, нейтронов,  
и атомов водорода.

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

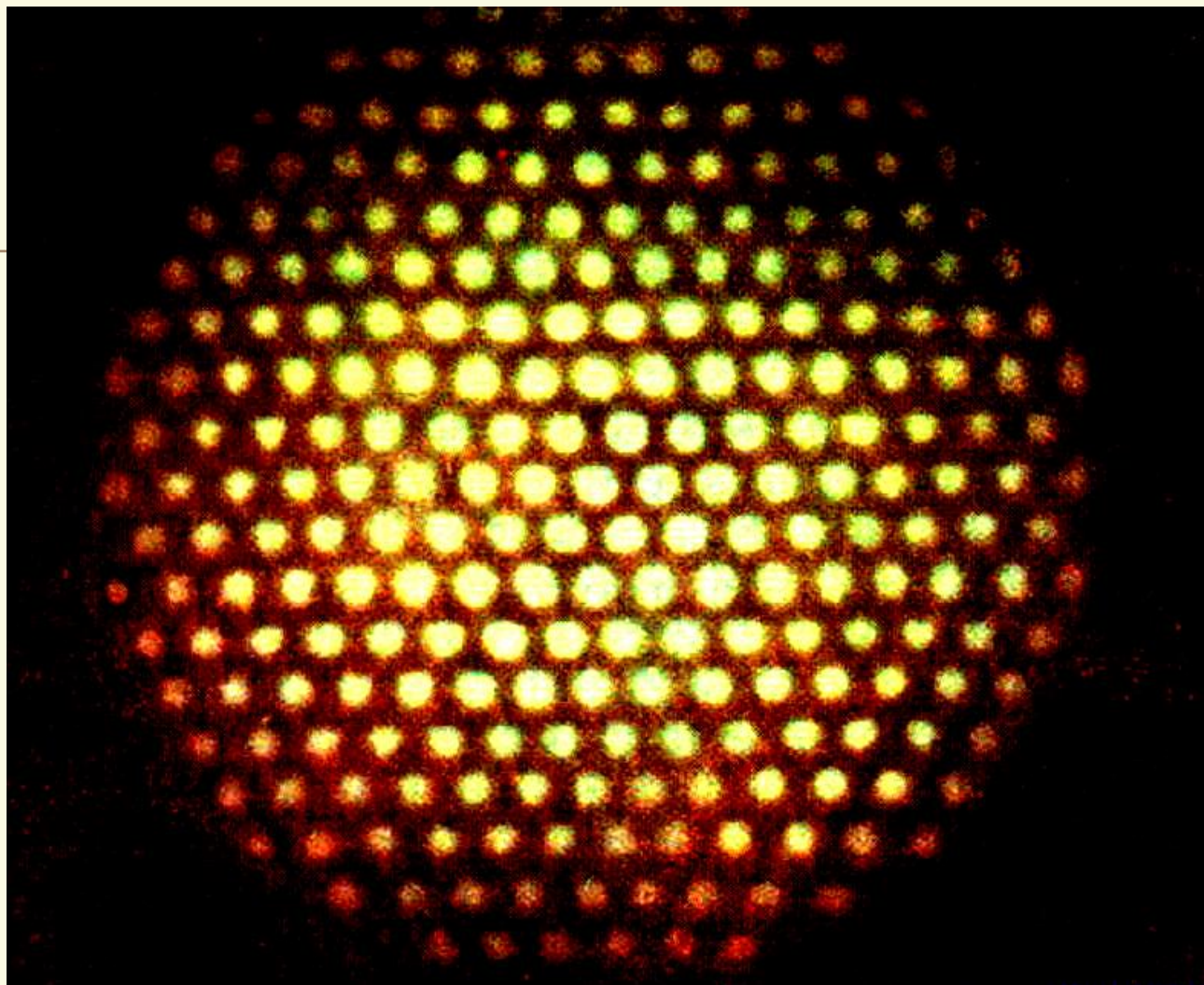


*Дифракция* при рассеянии *нейтронов* на монокристалле NaCl.

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



*Картина дифракции нейтронов на кварце*

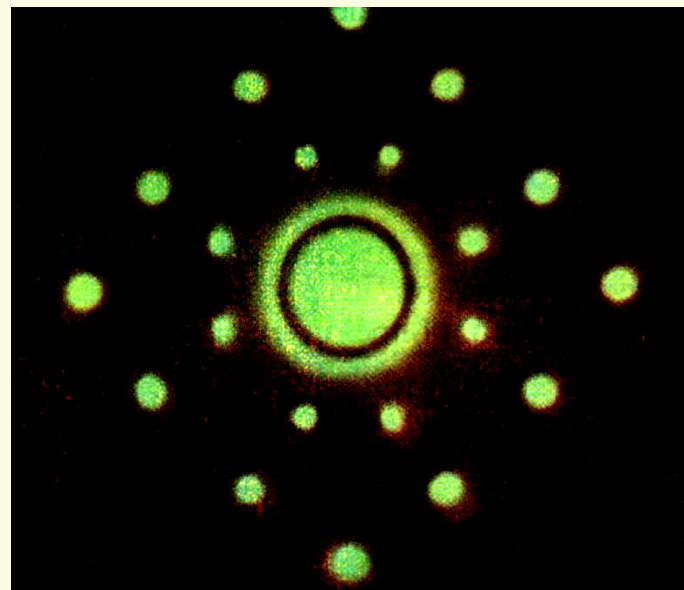
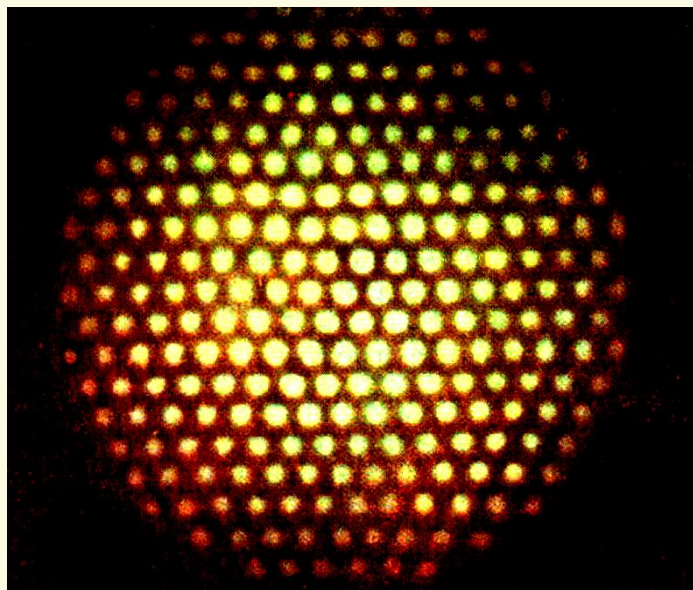



*Картина дифракции электронов на слюде*



*Дифракция частиц*, сыгравшая в своё время столь большую роль в установлении двойственной природы материи — корпускулярно-волнового дуализма (и тем самым послужившая *экспериментальным обоснованием 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.*





Это означает, что волновые  
свойства присущи всем  
частицам микромира.





ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!