

## 19.7. Корпускулярно-волновая природа света

Опыты Ботэ, эффект Комптона, тепловое излучение, опыты Лебедева, опыты Добронравова казалось бы убедительно доказывают справедливость квантовых (корпускулярных) представлений о природе света.

Однако, с другой стороны, большая группа оптических явлений: интерференция, дифракция, поляризация света, дифракция электронов, дифракция рентгеновских лучей неопровержимо свидетельствуют о волновой природе света.

По современным представлениям свет *одновременно* обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов.

*Корпускулярные свойства обусловлены тем, что энергия, импульс и масса излучения локализованы в дискретных «частицах»-фотонах, волновые - статистическими закономерностями распределения фотонов в пространстве, определяющими вероятности нахождения фотонов в различных точках пространства.*

Опыты по дифракции с малыми и большими интенсивностями света дают одинаковую дифракционную картину, это позволяет считать, что волновые свойства присущи не только совокупности большого числа одновременно движущихся фотонов, но также каждому отдельному фотону.

*Волновые свойства* фотона проявляются в том, что для него нельзя указать точно, в какую именно точку экрана он попадет после прохождения через рассматриваемую оптическую систему. Можно говорить лишь о вероятности попадания фотона в различные точки экрана.

Т.е. фотоны качественно отличаются от световых корпускул Ньютона, движение которых как считал Ньютон, подобно движению макроскопических тел.

## 19.8. Волны де Бройля. Опыт Дэвиссона

По гипотезе де Бройля не только фотоны, но и все "обыкновенные частицы" (электроны, протоны, нейтроны и др.) обладают волновыми свойствами, которые, в частности, должны проявляться в явлениях интерференции, дифракции.

$$\lambda = h/mv \quad \text{Формула де Бройля} \quad (19.8.1)$$

Гипотеза де Бройля вскоре была подтверждена экспериментально. Дэвиссон и Джермер в 1927 г. наблюдали дифракцию электронов на монокристалле никеля.

Узкий пучок электронов направлялся на поверхность монокристалла никеля. Отраженные электроны улавливались цилиндрическим электродом (см. рис.), присоединенным к гальванометру. Интенсивность отраженного пучка оценивалась по силе тока, текущего через гальванометр.

# Луи де Бройль

*Louis Victor Pierre Raymond  
duc de Broglie*

*15.08.1892 – 19.08.1987*

*7-й герцог Бройльи*



*французский физик*

*Родился в Дьеппе, Франция (Dierre,  
France)*

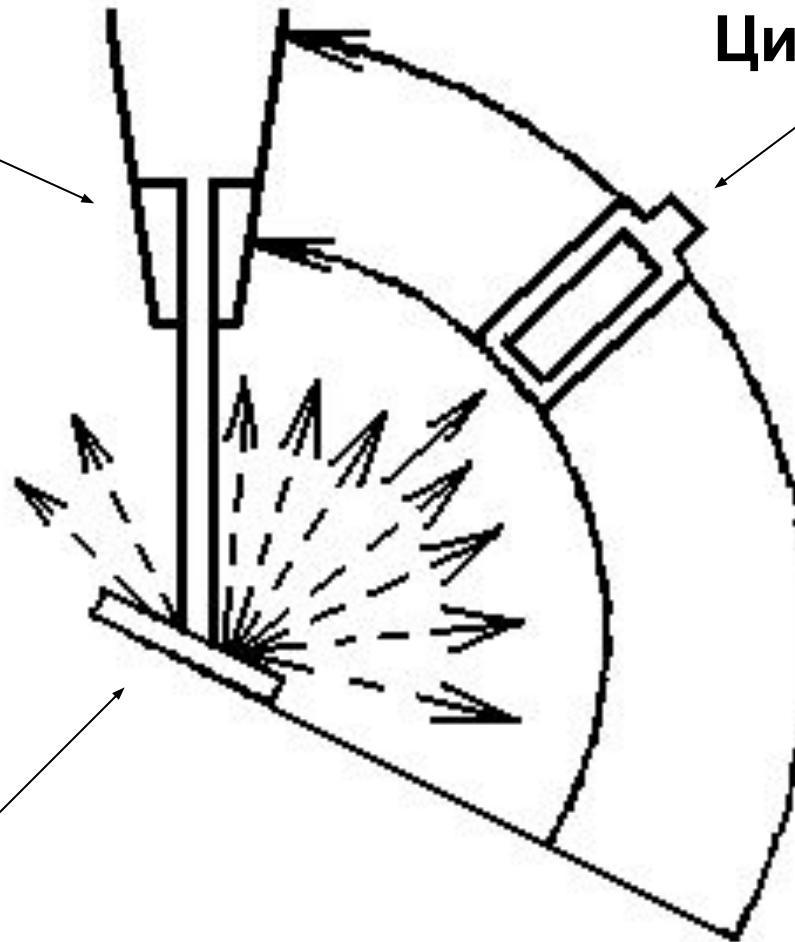
*Умер в Париже, Франция (Paris,  
France)*



**Электронная  
пушка**

**Цилиндр Фарадея**

**Кристалл  
никеля**



**Схема опытов Девиссона.**

# КЛИНТОН ДЭВИССОН

*Clinton Joseph Davisson*

*22.10.1881 – 01.02.1958*

*американский физик*

*Родился в Блумингтоне, США  
(Bloomington, Illinois)*

*Умер в Шарлотсвилле, США  
(Virginia, Charlottesville)*

**The Nobel Prize in Physics 1937**



# Лестер Джермер

*Lester Halbert Germer*

*10.10.1896 – 3.10.1971*

*американский физик*

*Родился в Кембридже, США (Chicago)*

*Умер в Нью-Йорке, США (Gardiner,  
New York)*





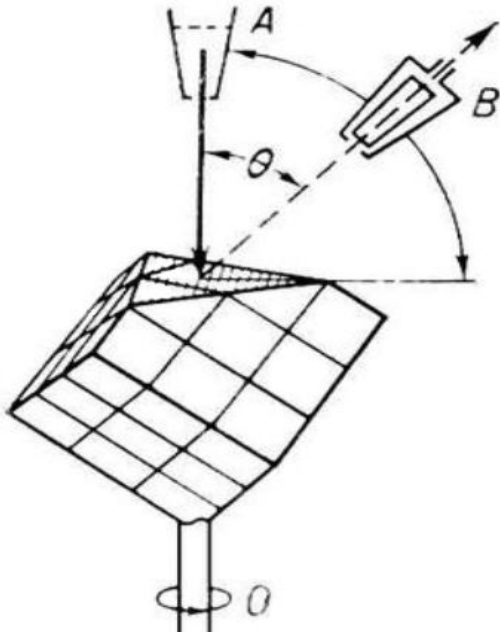
При прохождении электроном ускоряющей разности потенциалов:

$$eU = \frac{p^2}{2m}; \quad p = \sqrt{2meU}.$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \approx \frac{12,25 \text{ \AA}}{\sqrt{U}} \quad 15.3$$

Если энергия электрона несколько эВ, то длина волны порядка 1 нм, то есть порядка межплоскостных расстояний в кристалле (длины волны рентгеновского излучения). Поэтому для наблюдения дифракции микрочастиц следует использовать кристаллы.

## Опыты Дэвиссона и Джермера



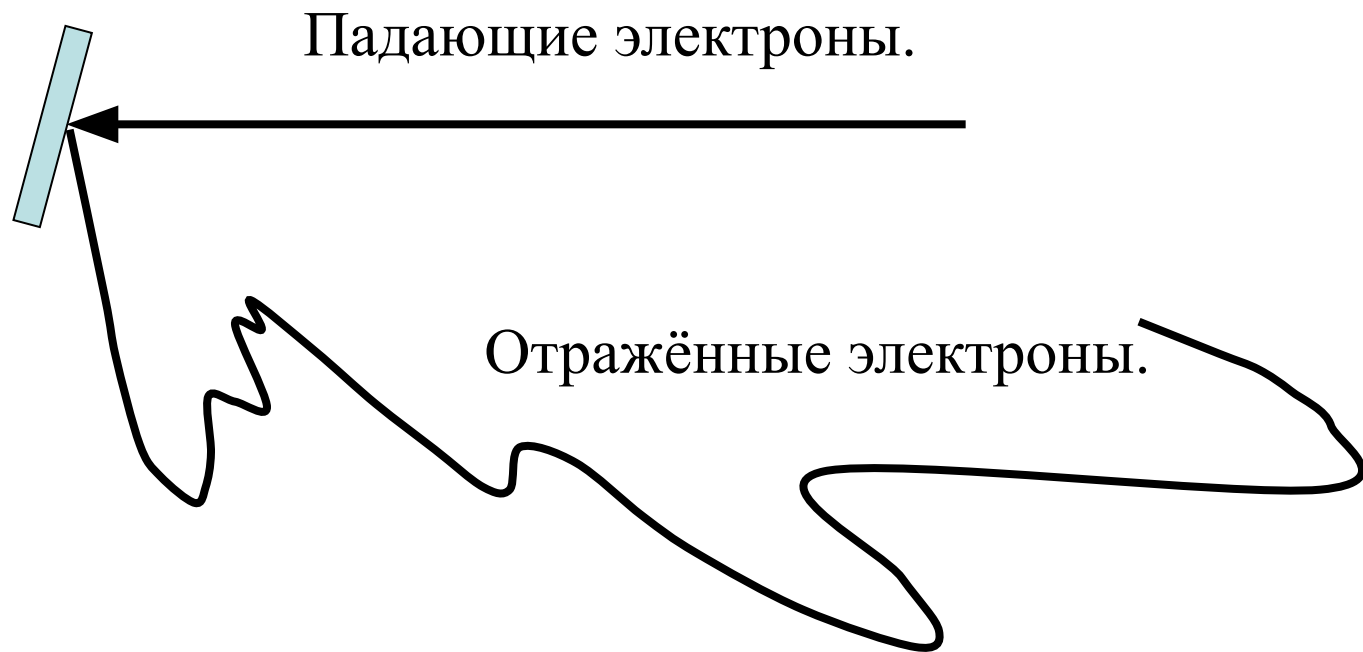
Первым опытом по дифракции частиц, подтвердившим исходную идею квантовой механики – корпускулярно-волновой дуализм, явился опыт американских физиков К. Дэвиссона и Л. Джермера, проведенный в 1927 по дифракции электронов на монокристаллах никеля.

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

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

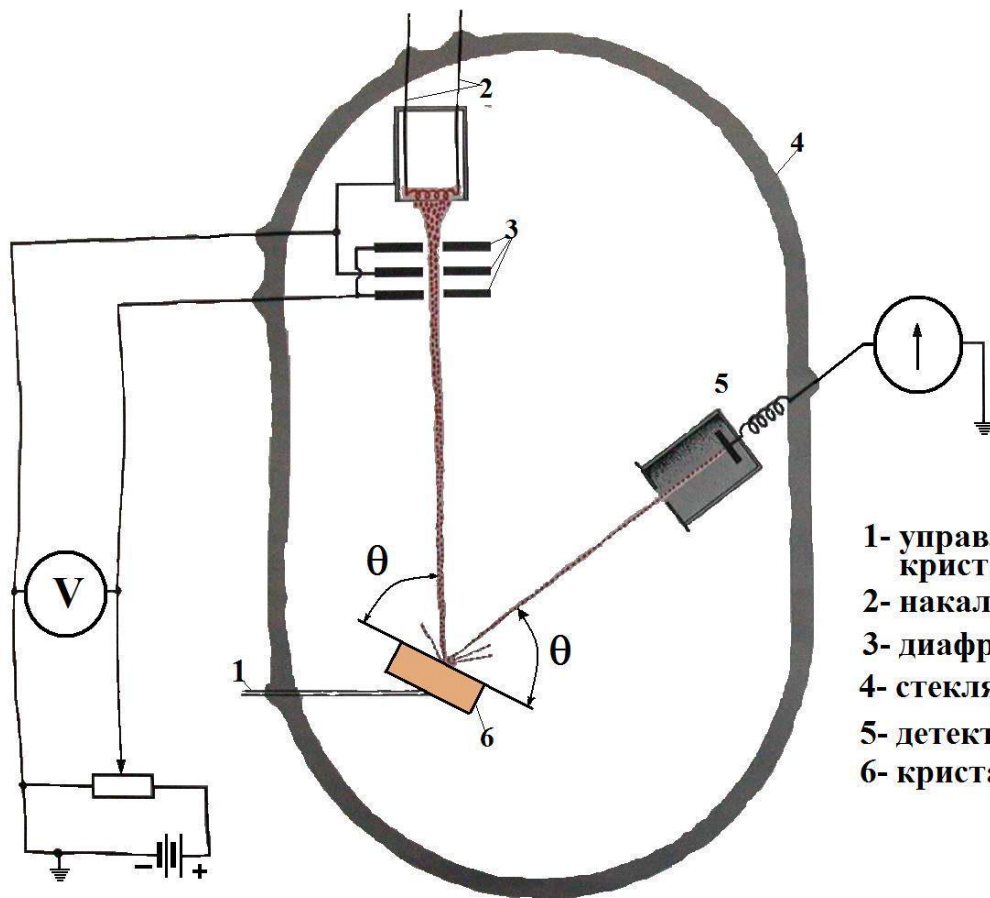
В опыте Дэвиссона и Джермера при «отражении» электронов от поверхности кристалла никеля при определённых углах отражения возникали максимумы.

*Ожидали* получить дифракционную картину, аналогичную картине возникающей при дифракции рентгеновских лучей на том же кристалле, поскольку длина волны де Бройля для электронов изменялась в диапазоне длин волн рентгеновских лучей. Ожидание подтвердилось.



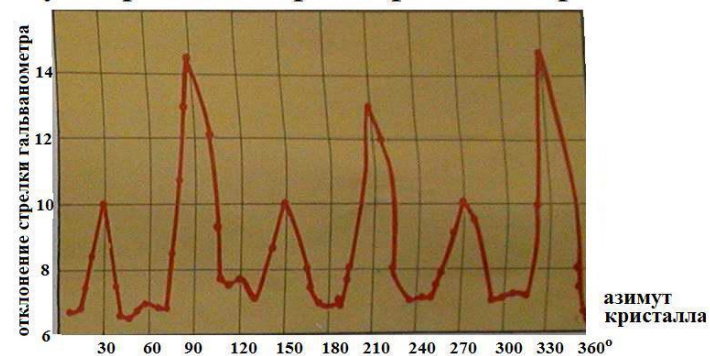
**Угловое распределение отражённых электронов в опытах Дэвиссона и Джермера.**

# дифракция электронов



- 1- управление ориентацией кристалла
- 2- накал
- 3- диафрагмы
- 4- стеклянный баллон
- 5- детектор электронов
- 6- кристалл

показания гальванометра в зависимости от положения азимута кристалла при энергии электрона 54 эВ



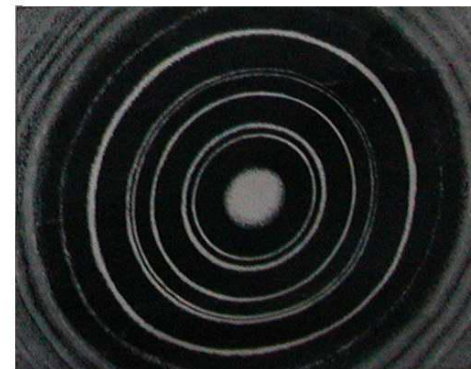
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$d$  - постоянная решетки кристалла  
 $\theta$  - угол скольжения  
 $\lambda$  - длина волны Де Бройля  
 $n$  - порядок дифракционного спектра

$$\lambda = \frac{2 \sin \theta}{n} = \frac{h}{\sqrt{2mT}}$$

$h$  - постоянная Планка  
 $m$  - масса электрона  
 $T$  - кинетическая энергия электрона

Электроннограмма порошка сернистого свинца



Максимумы на кривой соответствуют отдельным дифракционным максимумам. Их положение, найденное экспериментально, в точности совпало с вычисленным из условия Вульфа-Брегга, в которое подставлялась формула де Бройля для  $\lambda$ .

У кристалла никеля  $d = 0,91 \text{ \AA}$  и при  $U = 54 \text{ В}$  дебройлевская длина волны равна **0,167** нм. Соответствующая длина волны, найденная по формуле Вульфа-Брэггов, равна **0,165** нм. Совпадение очень хорошее, так что гипотеза де Бройля подтверждается экспериментально.

Описанные опыты были аналогичны опытам Лауэ с рентгеновскими лучами.

Вскоре после опытов Девиссона и Джермера, в 1928 г., волновые свойства электронов были обнаружены экспериментально П. С. Тартаковским (Ленинградский университет) и независимо от него Г. Томсоном и Рейдом. Они обнаружили дифракцию электронов, пропуская пучки электронов через тонкие слои различных металлов (толщиной порядка  $10^{-7}$  м), имеющих поликристаллическую структуру. Опыты эти были аналогичны наблюдениям дифракционных картин рентгеновских лучей на порошках поликристаллов по методу Дебая-Шерера. На рис.25 изображены фотографии дифракционной картины при прохождении рентгеновских лучей пластины алюминия (*а*) и пучка электронов сквозь тонкие пленки золота и меди (*б*). Используя этот метод, Томсон определил по формуле Де-Бройля длину волны и далее,

по известным соотношениям для дифракции на трехмерных структурах, нашел периоды кристаллических решеток металлов, сквозь которые пропускались электроны. Результаты совпали с данными о периодах решеток, известными из рентгеноструктурного анализа.

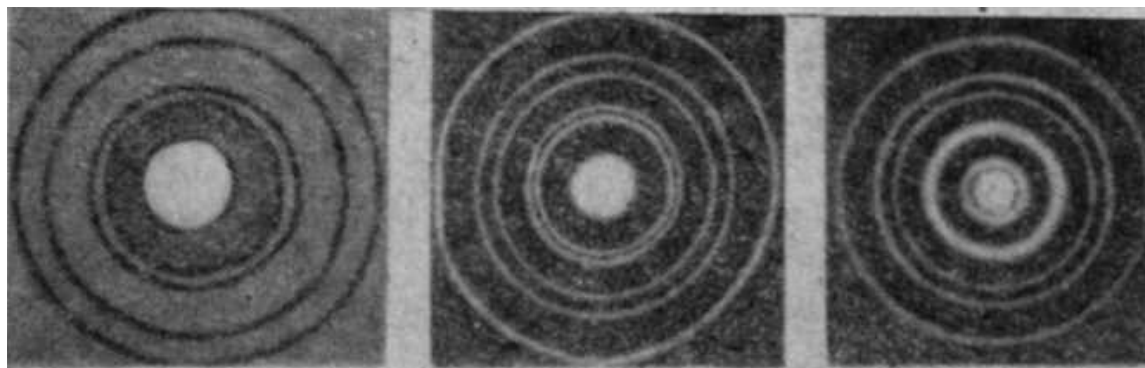


Рис.25

*а*

*б*

В методе Дебая - Шеррера диаметр  $D$  дифракционного кольца данного порядка прямо пропорционален длине волны и поэтому отношение  $D/\lambda$  для данного материала при неизменном расстоянии от образца до фотопластинки должно оставаться постоянным.

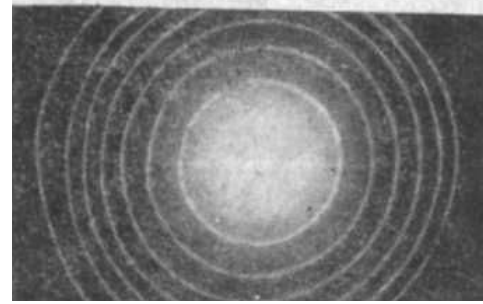
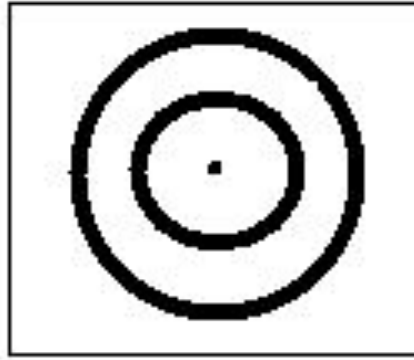
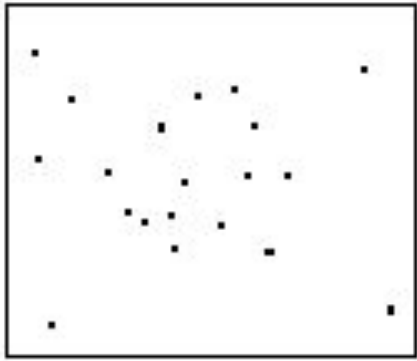


Рис.26

В 1949 г. Л.М. Биберман, Н.Г. Сушкин, В.А. Фабрикант использовали пучок малой интенсивности - такой, что каждый рассеянный электрон проходил через кристалл поодиночке и регистрировался фотопластинкой (рис. 26). Т.е. **было доказано, что волновыми свойствами обладает каждый отдельный электрон.**



**Дифракция электронов на двух щелях.** Эксперимент по дифракции электронов на двух щелях сложно осуществить, поскольку характерная длина волны электронов оказывается много меньше длин волн видимого света. Подлинную картину интерференции электронов на двух щелях удалось зафиксировать на фотопластинки в эксперименте, выполненном К. Йенссоном в 1961 г. Схема этого эксперимента приведена на рис. 33, а полученные результаты воспроизведены на рис. 34, а.

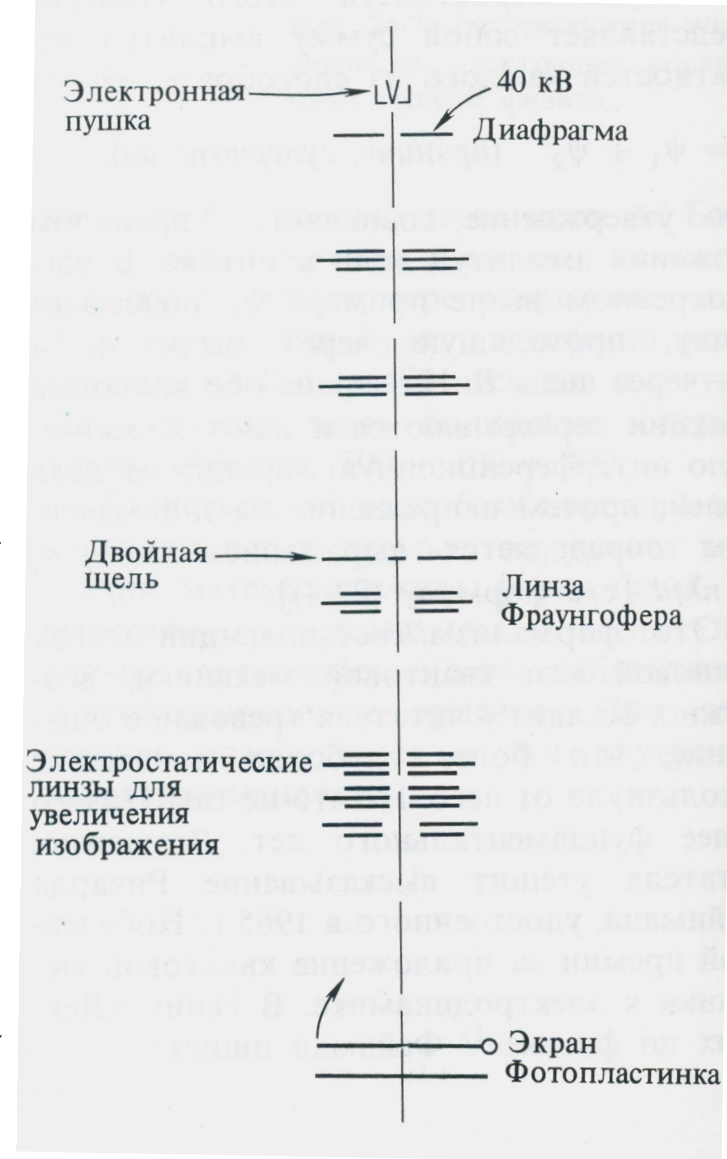
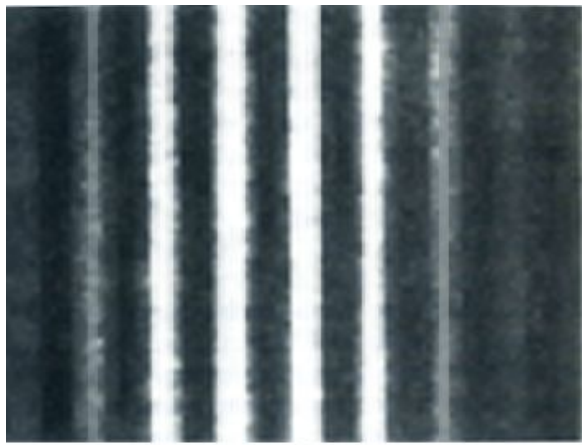
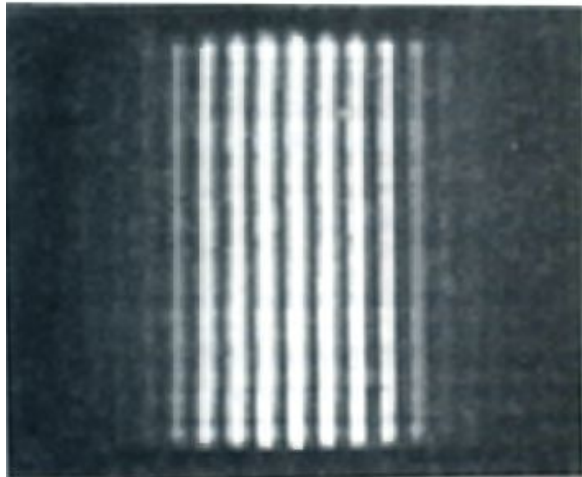


Рис.33.



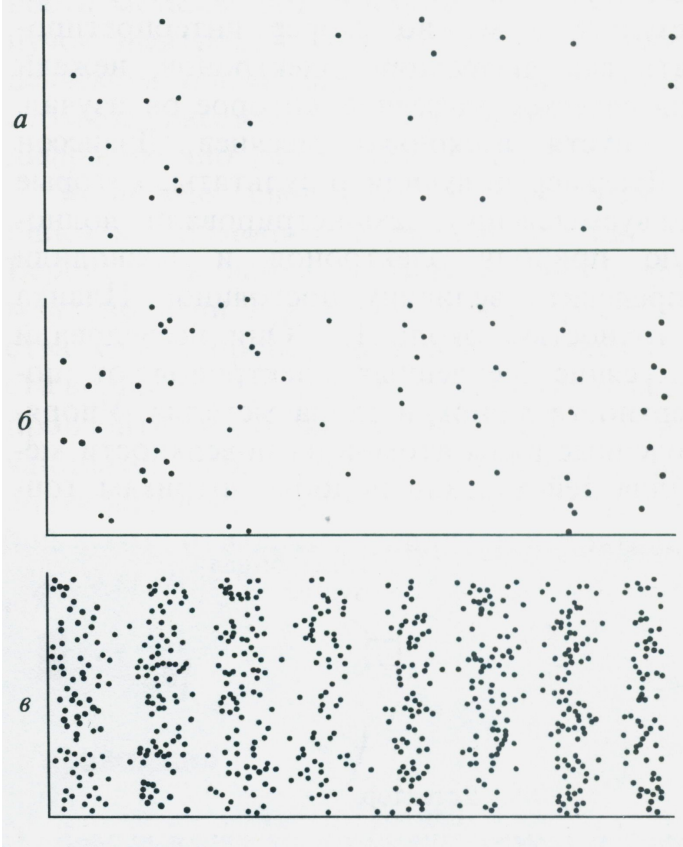
*a*



*б*

В том месте, где электрон попадает на пластинку, образуется черное пятно. Приведенная фотография – это результат попадания большого числа электронов от двойной щели. Для сравнения на рис. 34, б показана интерференционная картина, полученная при дифракции света на двух щелях.

Рис. 34. Интерференционная картина от двух щелей в случае электронов, **каждое из зерен негатива образовано отдельным электроном** (*a*); *б* – для сравнения приведена интерференционная картина от двух щелей в случае света, на этом фото **каждое из зерен негатива образовано отдельным фотоном**



С помощью генератора случайных чисел, удовлетворяющих распределению вероятностей вида  $\sin^2 x$ , можно смоделировать распределение на рис. 34, *а*, полученное в условиях малой интенсивности. На рис. 35, *а* воспроизведено попадание 27 электронов на фотопластинку. Рис. 35, *б* и *в* отвечают попаданию 70 и 735 электронов соответственно.

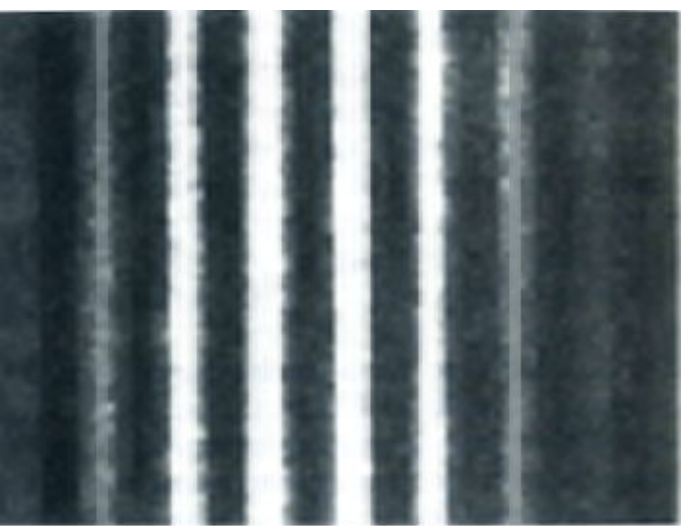


Рис. 35. Результаты моделирования эксперимента с двумя щелями. Распределения отвечают экспозициям с малым числом электронов:  
*а* – 27 электронов; *б* – 70 электронов; *в* – 735 электронов

Применимость формулы де Бройля не ограничивается только электронами; любой частице соответствует волна, определяемая этой формулой.

Для теннисного мяча ( $v = 25$  м/с) –  $\lambda = 6 \cdot 10^{-22}$  см, для атомов водорода –  $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-8}$  см, т.е около  $1 \text{ \AA}$  .

**Экспериментально доказано, что волновые свойства присущи всем без исключения микрочастицам.**

Дифракция позднее наблюдалась и для более тяжелых заряженных частиц – протонов, ионов гелия и др.

⊠  
A

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 (рис. 27).

Первые исследования дифракции нейтронов на кристаллах были выполнены в 1936 г. Х. Хальбаном, П. Прайсверком и Д. Митчеллом. В этих экспериментах использовались радиовобериллиевые источники нейтронов. В дальнейших исследованиях дифракции нейтронов источником нейтронов стал служить ядерный реактор (рис. 28).

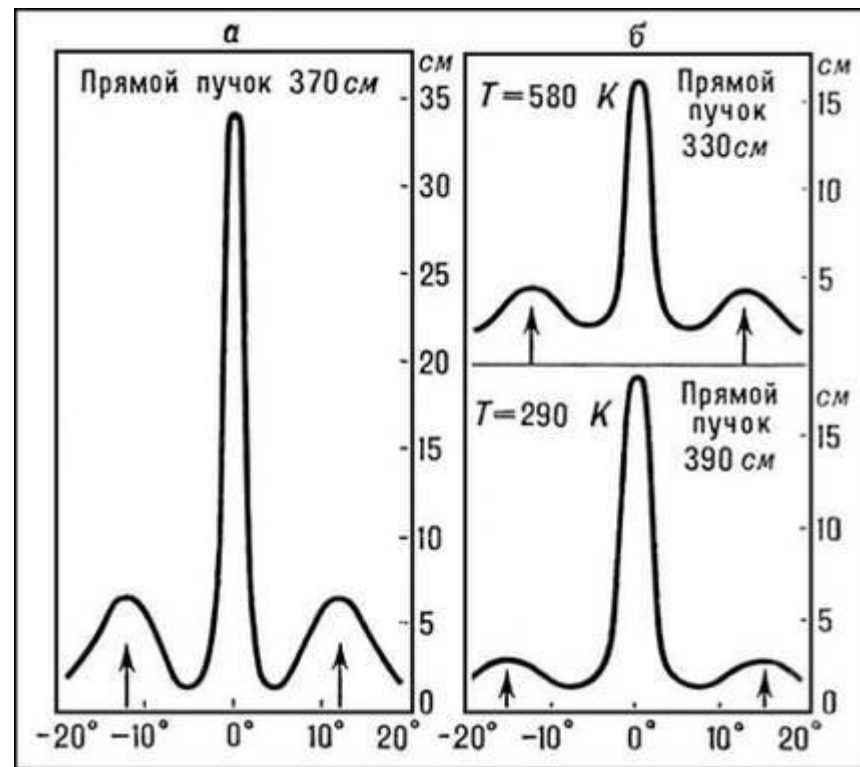


Рис.27

Нейтроны от ядерного реактора  $R$  проходят через замедлитель  $S$  и теряют в нем часть своей энергии. В коллимирующей системе  $K$  формируется узконаправленный пучок нейтронов. Они попадают на кристалл  $C$ , выполняющий роль дифракционной решетки. Дифрагировавший пучок нейтронов регистрируется детектором нейтронов  $D$ .

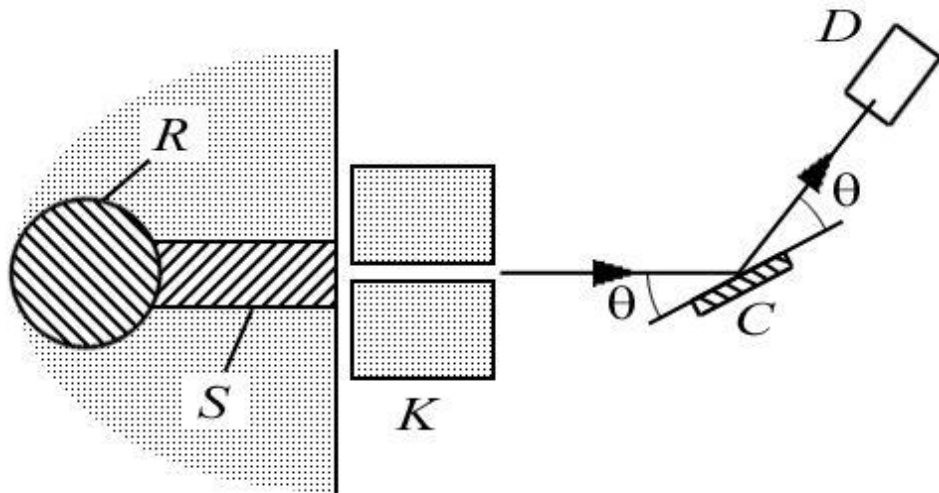


Рис.28

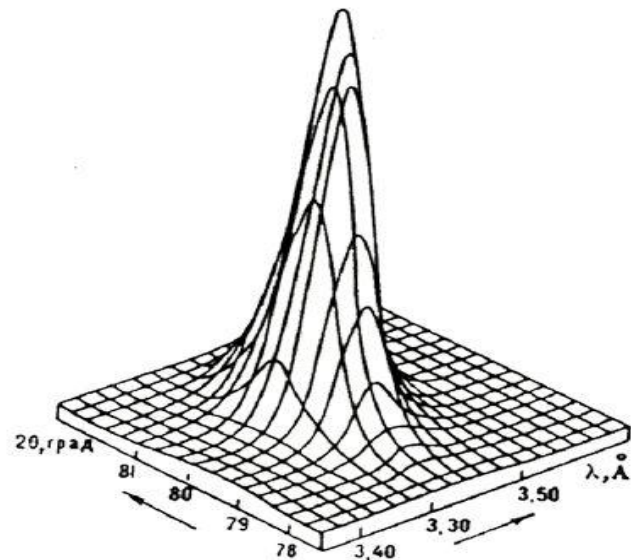


Рис.29

Зависимость интенсивности дифрагировавших нейтронов от брэгговского угла  $\theta_0$  и де-бройлевской длины волны  $\lambda_B$  отраженных от монокристалла  $\text{CsHSeO}_4$ , приведена на рис. 29

В качестве замедлителя нейтронов используются большие поликристаллические образцы графита, бериллия, висмута и других веществ, ядра которых слабо поглощают нейтроны. В замедлителе нейтроны испытывают многократное дифракционное отражение и отдают избыток своей энергии ядрам кристалла.

Кроме того, в поликристаллическом замедлителе происходит выделение низкоэнергетической части спектра нейтронного пучка (*фильтрация*), также основанное на дифракции нейтронов.

Из условия Вульфа – Брэггов

$$2d \sin \theta_{\text{Б}} = \lambda_{\text{Б}}$$

следует, что максимальная дебройлевская длина волны нейтронов, которые могут испытывать дифракционное отражение, равна

$$\lambda_{\text{Б}}^{\text{max}} = \left\{ \frac{2d \sin \theta_{\text{Б}}}{n} \right\}_{\text{max}} = 2d.$$

Эту длину волны  $\lambda_B$  называют граничной длиной волны и обозначают  $\lambda_{гр}$ . Наиболее **быстрые нейтроны** с длиной волны  $\lambda < \lambda_{гр}$  будут испытывать дифракцию в кристалле, отклоняться за счет этого от своего первоначального направления и выбывать из проходящего пучка (рис. 30).

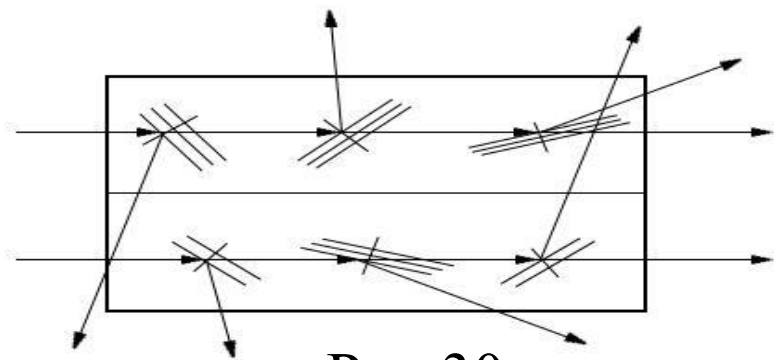


Рис.30

Низкоэнергичные **медленные нейтроны** с длиной волны  $\lambda > \lambda_{гр}$  не испытывают дифракцию и проходят через поликристалл практически без изменения интенсивности пучка. Наблюдавшаяся на эксперименте

зависимость интенсивности пучка нейтронов, прошедших через поликристаллический бериллиевый фильтр, от дебройлевской длины волны  $\lambda$  представлен на рис.31. Резкое уменьшение интенсивности прошедшего пучка происходит при значении длины волны нейтронов  $\lambda \approx 0,4$  нм, что согласуется со значением граничной длины волны для бериллиевого фильтра:  $\lambda_{гр} = 0,395$  нм.



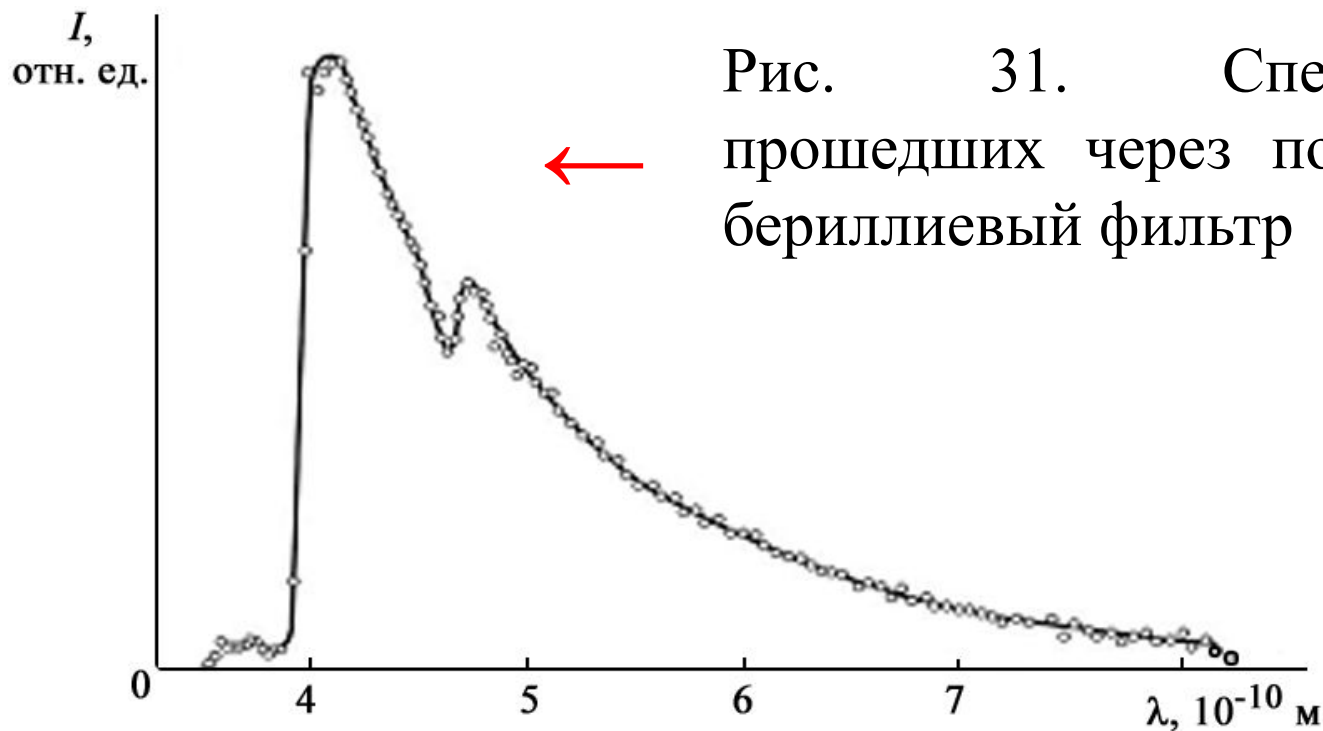


Рис. 31. Спектр нейтронов, прошедших через поликристаллический бериллиевый фильтр

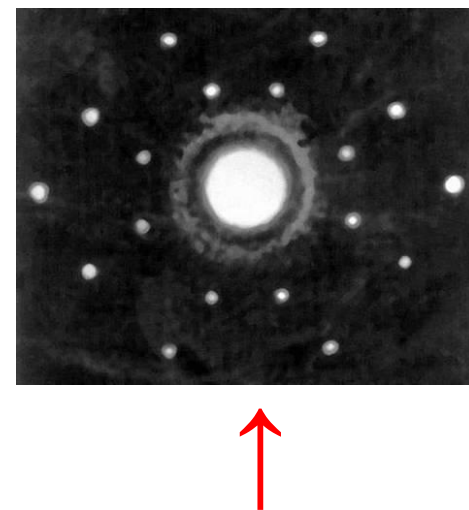


Рис.32. Дифракция нейтронов

Проходящие через поликристаллический фильтр нейтроны низких энергий получили название холодных нейтронов. Оценка температуры этих нейтронов поясняет такое название. Определим температуру  $T$ , соответствующую самым коротким волнам де Бройля нейтронов, пропускаемых поликристаллом графита, постоянная решетки которого  $d = 0,335$  нм.

Граничная длина волны нейтронов, пропускаемая графитом  $\lambda_{\text{гр}} = 2d = 0,67$  нм. Найдем температуру  $T$ , соответствующую самым коротким волнам де Бройля нейтронов, пропускаемых графитом. Поскольку  $\lambda_{\text{Б}} = h/p = h/\sqrt{2mE} = h/\sqrt{3mkT}$ , выразим температуру  $T$  как функцию  $\lambda_{\text{Б}}$ :

$$T = \frac{(2\pi\hbar)^3}{3mk\lambda_{\text{Б}}^2}$$

Подставляя сюда  $\lambda = \lambda_{\text{гр}} = 0,67 \cdot 10^{-9}$  м, находим, что

$$T = \frac{(6,62 \cdot 10^{-34})^2}{3 \cdot 1,675 \cdot 10^{-27} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (0,67 \cdot 10^{-9})^2} = 14 \text{ К.}$$

Нейтронам, прошедшим через поликристаллический фильтр, соответствуют очень низкие температуры и их называют холодными нейтронами.

## Корпускулярно-волновой дуализм

Если бы в экспериментах со светом сразу обнаружили эффект Комптона и фотоэффект, то все были бы убеждены в том, что свет представляет собой поток частиц – фотонов. В этом случае наблюдение интерференционной картины от двух щелей должно было бы вызвать изумление, поскольку частицы не должны обнаруживать свойства, присущие классическим волнам. Частица может пройти только либо через одну, либо через другую щель. Интерференцию фотонов друг с другом можно исключить, уменьшив интенсивность света настолько, чтобы средний интервал времени между испусканием фотонов значительно превышал время пролета фотонов от источника света до экрана. Если экран удален от источника на 3 м, то время пролета составит  $t = L/c = 10^{-8}$  с. Поэтому выберем интенсивность источника порядка  $10^{-11}$  Вт, что соответствует испусканию менее 108 фотонов в секунду.

При закрытой щели  $B$  получается распределение интенсивности, соответствующее одной щели  $A$  (рис. 33). Если открыта только щель  $B$ , то получается идентичная, сдвинутая картина (рис. 33). В случае, когда открыты обе щели, распределение интенсивности света на экране не будет суммой распределений от каждой щели в отдельности.

Возникает интерференционная картина Юнга от двойной щели. Таким образом, свет обладает одновременно свойствами, характерными как для волн, так и для частиц.

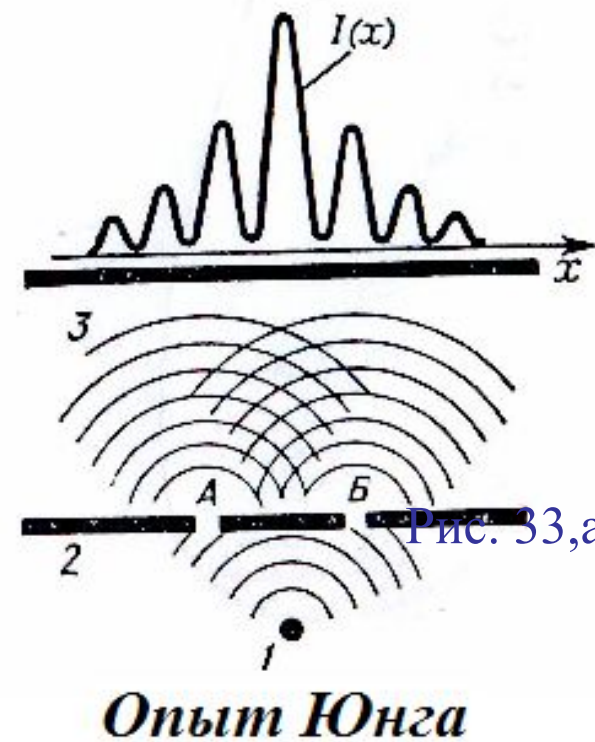
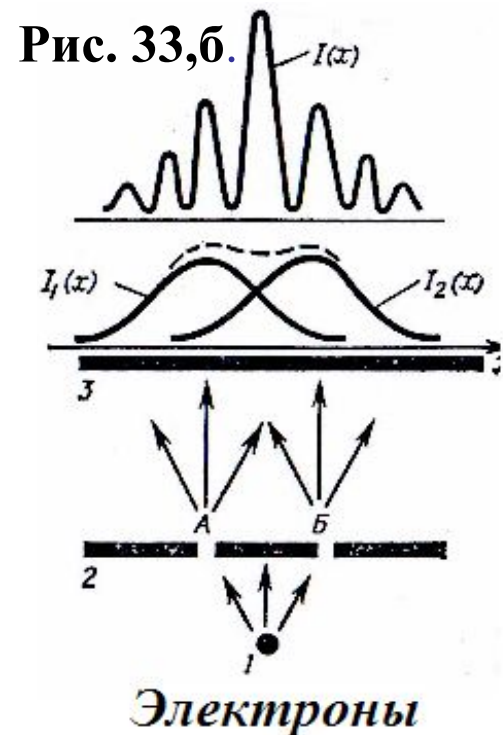


Рис. 33,а

В 1927 г. благодаря обнаружению волновых свойств у электрона !  
**этот парадокс стал еще более значительным!**

Парадокс можно устранить, предположив, что отдельный фотон после прохождения через щели  $A$  и  $B$  способен расщепляться и интерферировать с самим собой. Однако парадокс усиливается, если заменить пучок фотонов на пучок электронов. В природе никогда не наблюдалось половины или части электрона.



Независимо от того, находится детектор за щелью  $A$  или  $B$ , электрон всегда обнаруживается целиком.

**В этом сущность атомизма, справедливого для всех элементарных частиц, включая фотоны.**

# Прохождение фотонов и микрочастицы через две щели

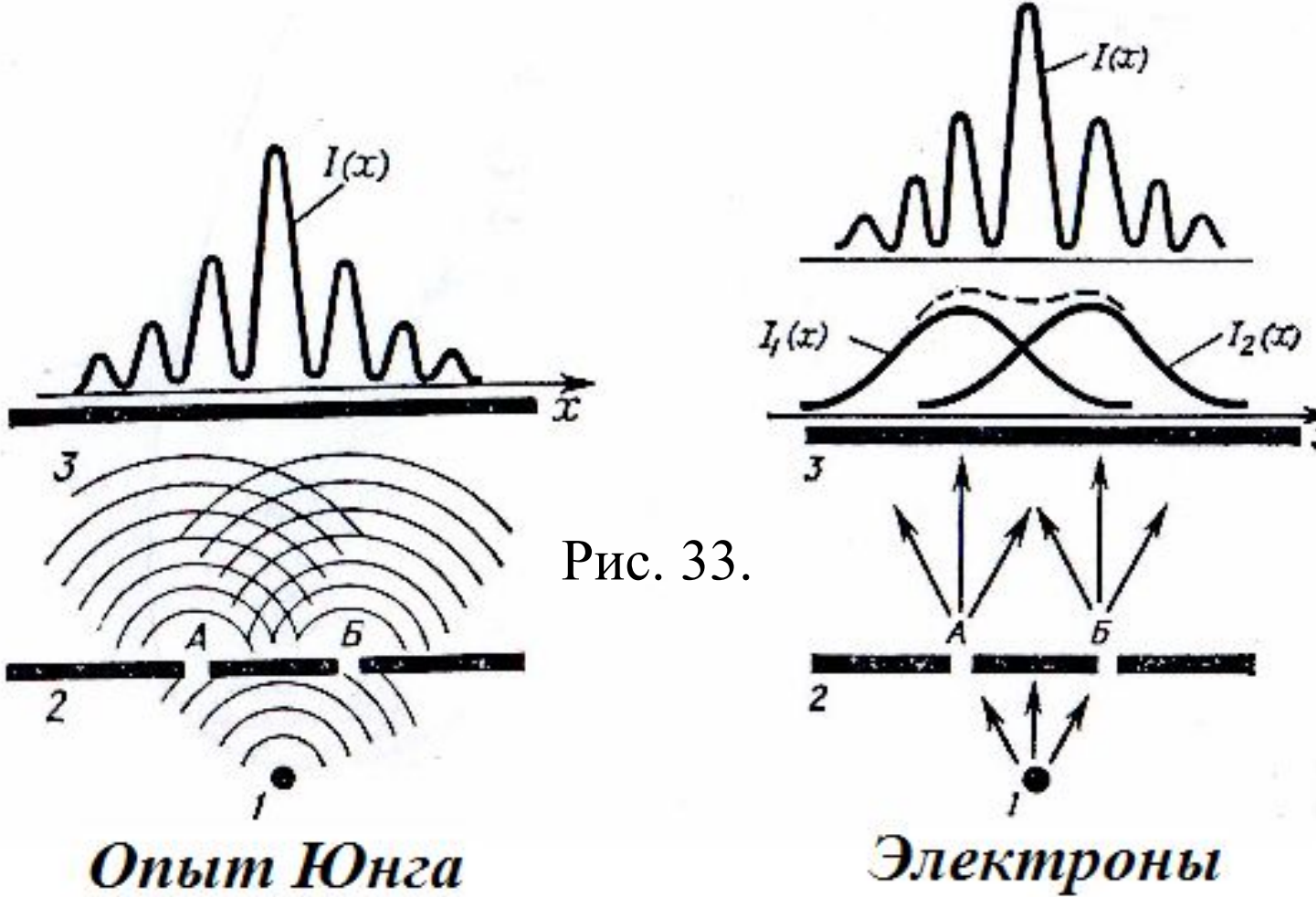
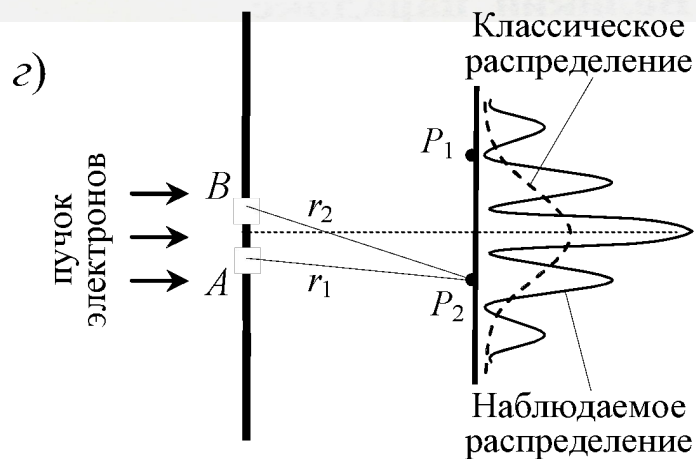
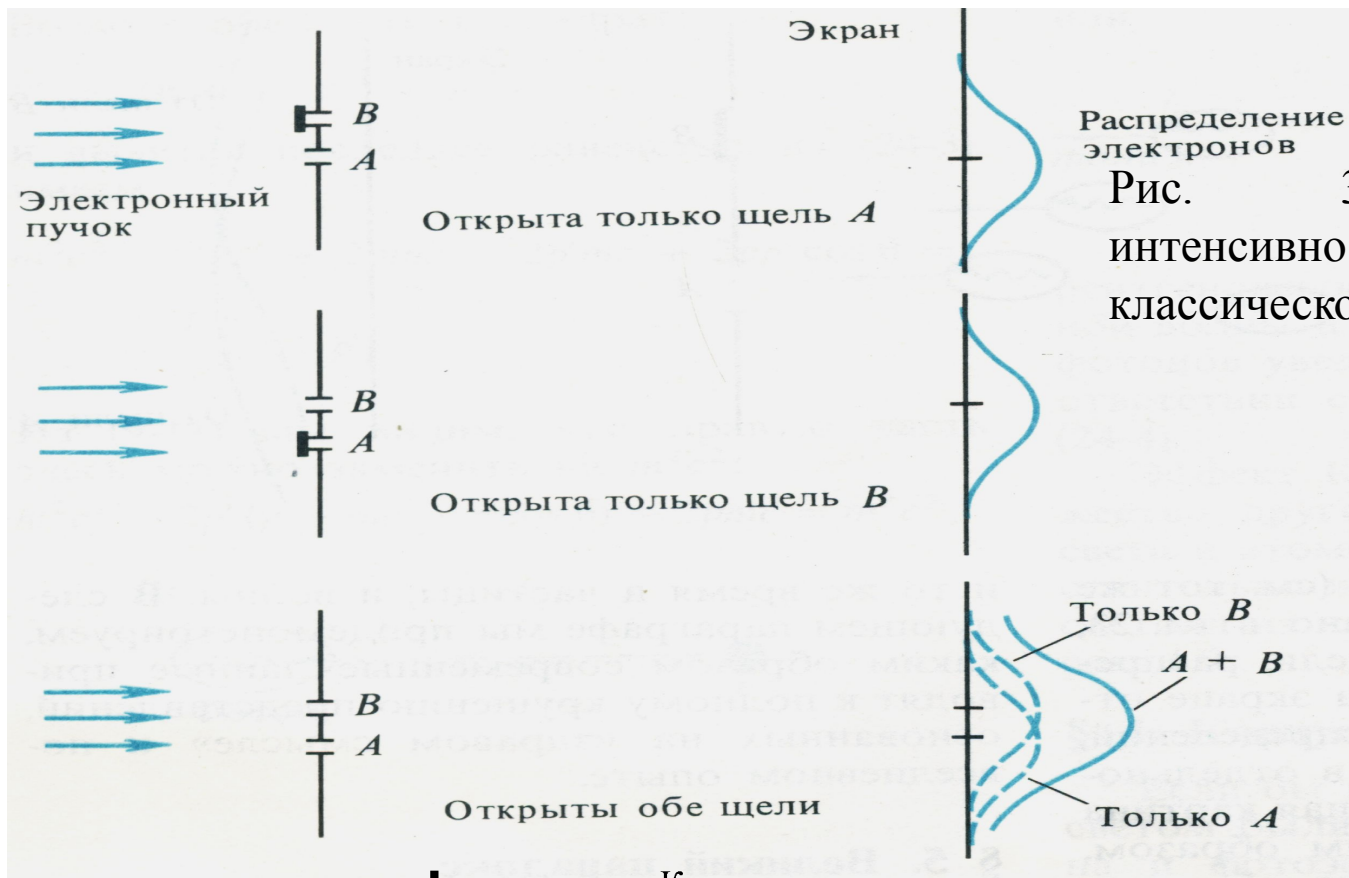


Рис. 33.

Картина для электронов идентична картине для фотонов.

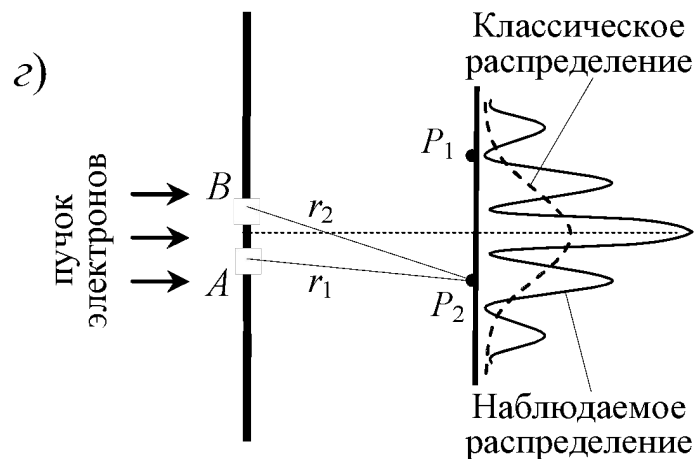
С этой точки зрения мы приходим к выводу, что отдельный электрон может пройти лишь через одну из двух щелей на рис. 34. Распределение электронов на экране должно быть суммой распределений для каждой из щелей в отдельности. **Хотя логика эта кажется безукоризненной, распределение, характерное для  $(A + B)$ , не имеет места!** Вместо этого мы видим стандартную интерференционную картину для двух щелей, изображенную на рис. 35.



← Рис.35. Распределение интенсивности электронов согласно квантовой теории



Предположим, что в точке  $P_1$  на рис. 35 находится счетчик Гейгера, регистрирующий ежесекундно 100 электронов, когда открыта любая из щелей  $A$  или  $B$ . При этом, когда открыты обе щели одновременно, счетчик перестает регистрировать электроны. Это значит, что точка  $P_1$  попадает в интерференционный минимум ( $r_2 - r_1 = \lambda/2$ ). Если сначала открыть только щель  $A$ , а затем постепенно открывать щель  $B$ , то мы вправе ожидать, что скорость счета по мере открывания щели  $B$  будет постепенно увеличиваться от 100 до 200 отсчетов в секунду. Вместо этого наблюдается уменьшение скорости счета от 100 до нуля.



Таким образом, открывание щели  $B$  может повлиять на электроны, которые, казалось бы, прошли через щель  $A$ . Более того, если счетчик Гейгера поместить в точку  $P_2$ , то по мере открывания щели  $B$  скорость счета будет постепенно увеличиваться от 100 до 400 отсчетов в секунду, когда вторая щель полностью открыта. Таким образом, должно быть  $100 + 100 = 400!$ , что возможно, если происходит сложение амплитуд  $(10 + 10)^2 = 400$ .

