

Кислицын А.А.
Физика атома, атомного
ядра и элементарных
частиц

5. (0). Волновые свойства
микрочастиц. Волны де-Бройля.

Оптико-механическая аналогия

Геометрическая
оптика

Теоретическая
механика

$\lambda \Rightarrow 0$

?

Волновая
оптика

Волновая
(квантовая)
механика

Оптико-механическая аналогия

Геометрическая
оптика

Принцип наименьшего
времени Ферма
(Fermat P.)

$$\int_A^B \frac{ds}{v} = \min$$

Теоретическая
механика

Принцип наименьшего
действия Мопертюи
(Maupertuis P.)

$$\int_A^B p ds = \min$$

Между этими двумя принципами имеется аналогия,
если предположить, что

$$p \propto \frac{1}{v} \quad (5.1)$$

где v - фазовая скорость волны, которую далее бу-
дем обозначать v_ϕ .

Гипотеза де-Бройля

Де-Бройль (de Broglie L.) предположил, что коэффициент пропорциональности в формуле, связывающей импульс и фазовую скорость, такой же, как и для фотона, т.е. равен $h\nu$:

$$p = \frac{h\nu}{v_{\phi}} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

где ν - линейная частота.

Это же соотношение можно записать в виде

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \tag{5.2}$$

где $|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, равное числу длин волн, укладываемых на отрезок 2π .

Коэффициент пропорциональности между энергией и частотой, согласно гипотезе де-Бройля, также должен быть таким же, как в оптике:

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (5.3)$$

где ω - циклическая частота, связанная с линейной частотой ν соотношением $\omega = 2\pi\nu$.

Формулы (5.2) и (5.3) иногда называют уравнениями де Бройля.

Волны де-Бройля

Итак, согласно гипотезе де-Бройля (1924г, нобелевская премия 1929г), микрочастицы обладают волновыми свойствами. Длина волны микрочастицы (электрона, протона, нейтрона, альфа-частицы и др.) называется *дебройлевской длиной волны* и определяется формулой де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (5.4)$$

где h – постоянная Планка, $p = mv$ – импульс частицы, v - "обычная" измеряемая в эксперименте скорость частицы, не равная фазовой скорости волны де Бройля v_{ϕ} . Подробнее вопрос о соотношении v и v_{ϕ} рассмотрим в следующей презентации.

Волны де-Бройля и правило квантования Бора

Пользуясь понятием дебройлевской длины волны, можно дать наглядное истолкование правилу квантования круговых орбит. Электрон обладает волновыми свойствами. Чтобы энергия волнового движения не распространялась в другие области (т.е. чтобы электрон при движении вокруг ядра не излучал энергию), волна должна быть стоячей.

На круговой орбите стоячая волна возникает, если на этой орбите уложится целое число длин волн де-Бройля: $2\pi r = n\lambda$. Отсюда, учитывая, что $\lambda = h/mv$, находим:

$$2\pi r = n \frac{h}{mv} \rightarrow mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \rightarrow L = n\hbar$$

т.е. правило квантования.

Таким образом, 1-ый постулат Бора – логическое следствие волновой природы электрона.

Экспериментальные доказательства волновых свойств микрочастиц

Опыты Дэвиссона и Джермера (дифракция электронов на монокристалле).

Опыты Томсона (дифракция электронов на поликристаллической пленке).

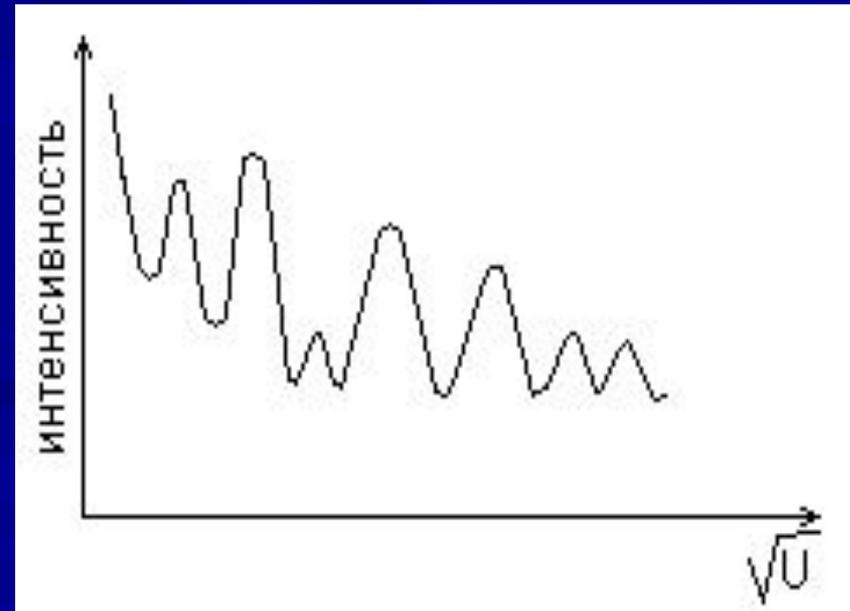
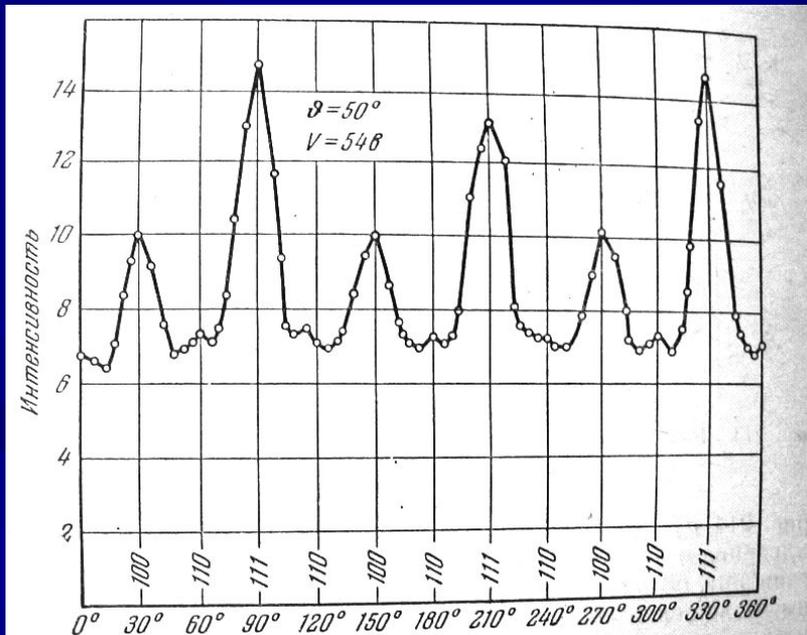
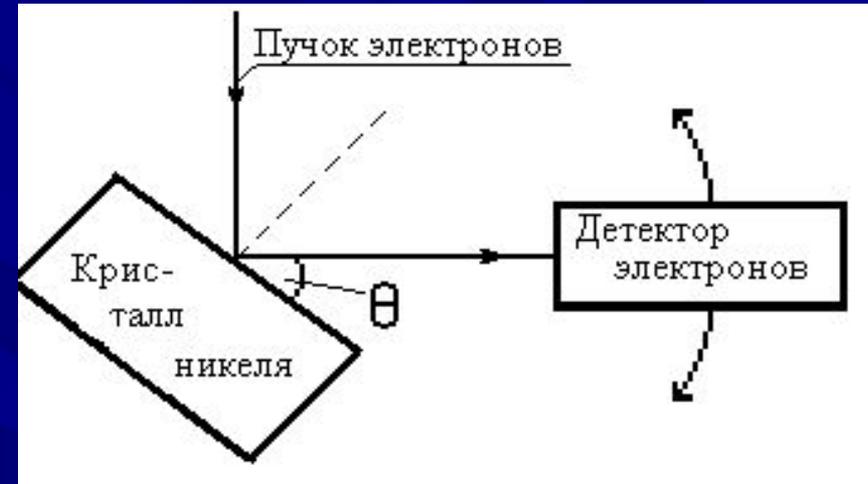
Опыты Штерна (дифракция атомов водорода на монокристалле).

"Брэгговский скачок" (дифракция нейтронов на поликристаллическом графите).

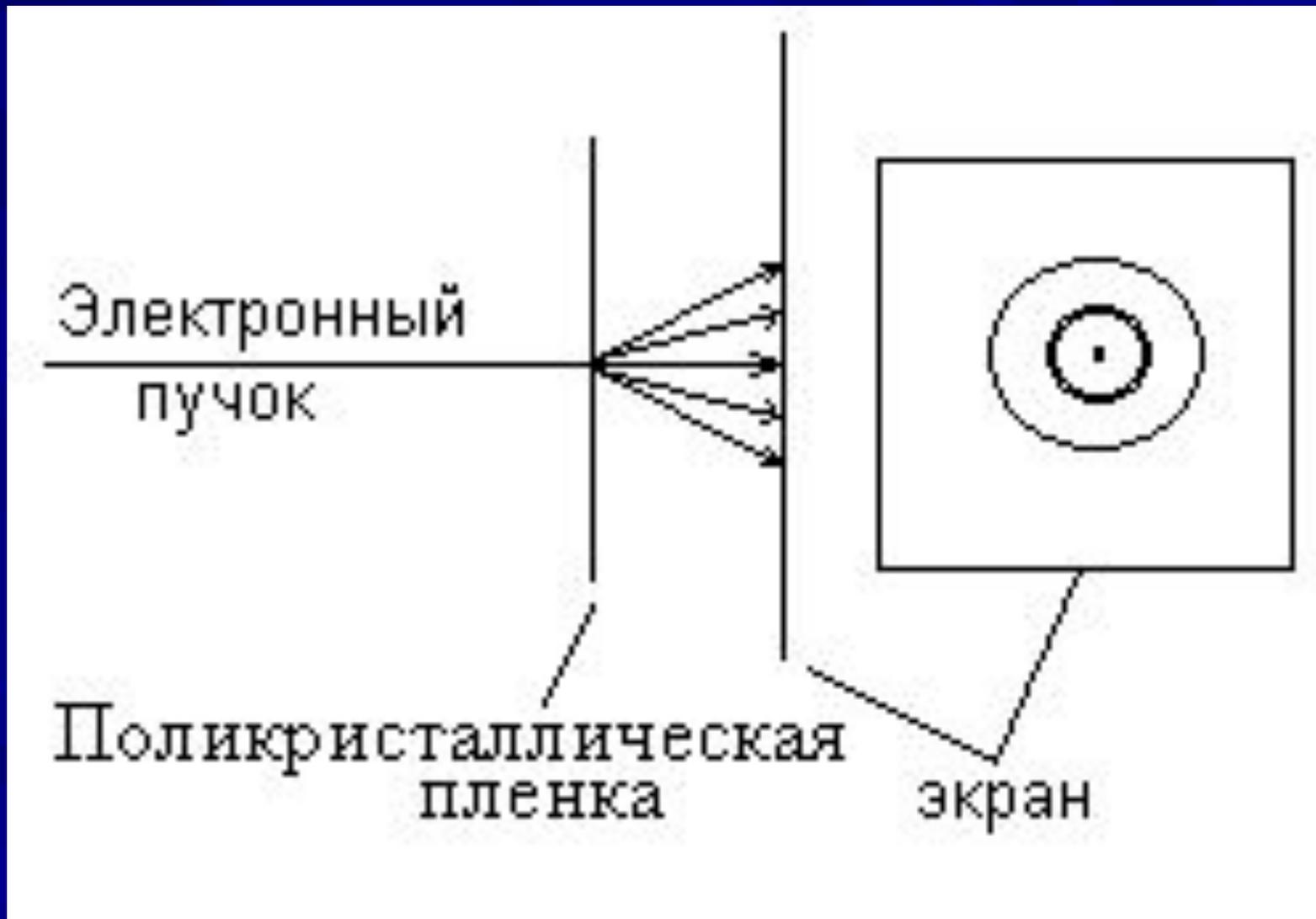
Опыты Дэвиссона и Джермера (Davisson C., Germer L., 1926-1927гг)

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

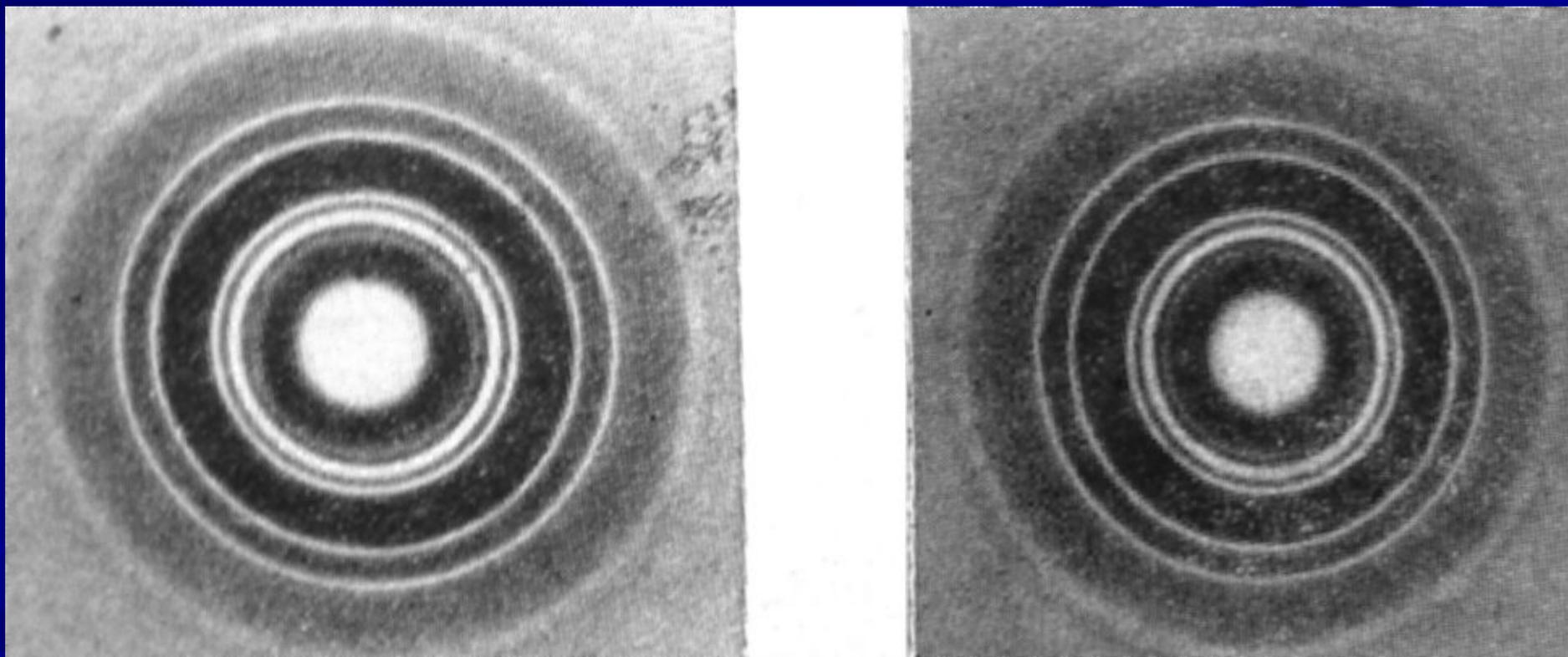
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} = \frac{12.25}{\sqrt{U}} \left(\overset{\circ}{\text{A}} \right)$$



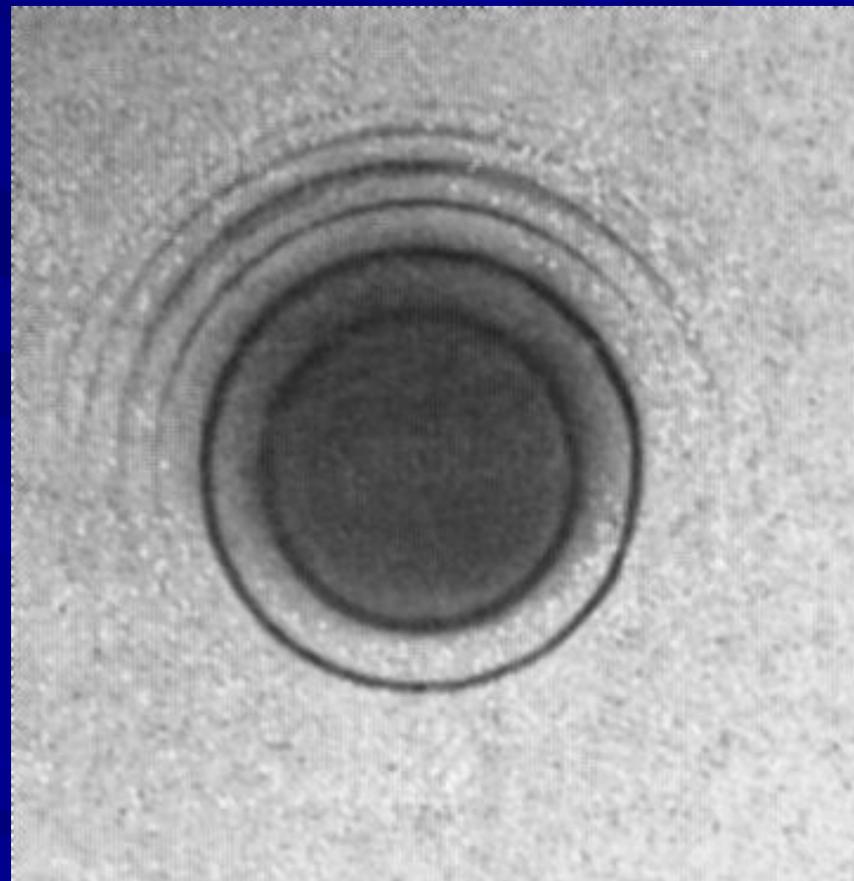
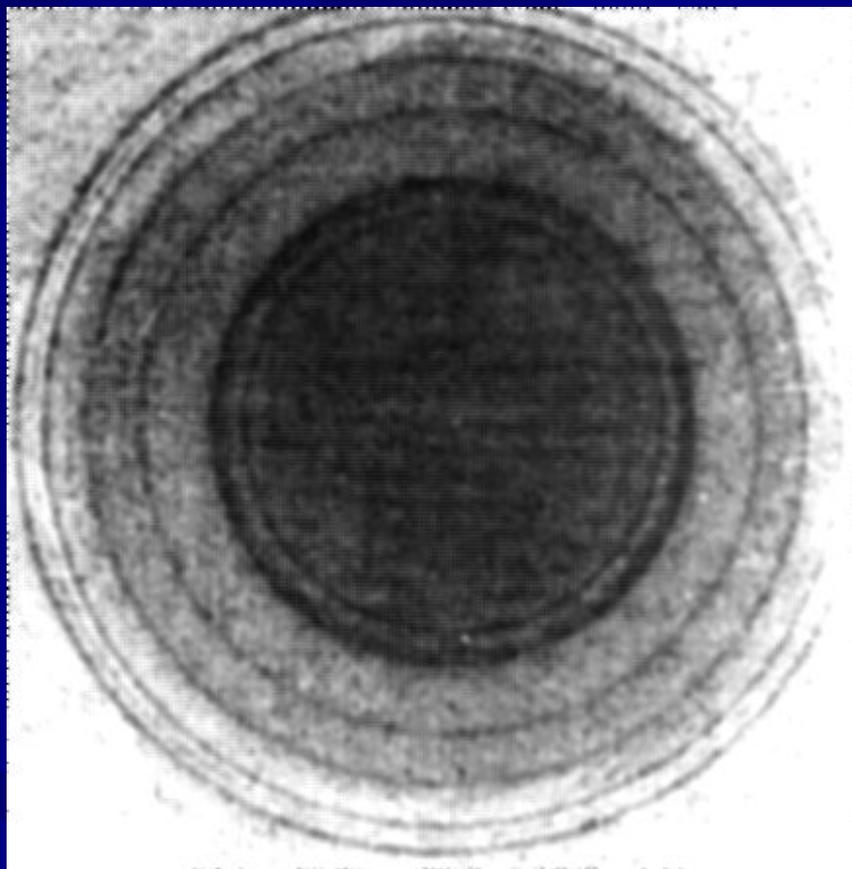
Опыты Томсона (Thomson G., 1928г)



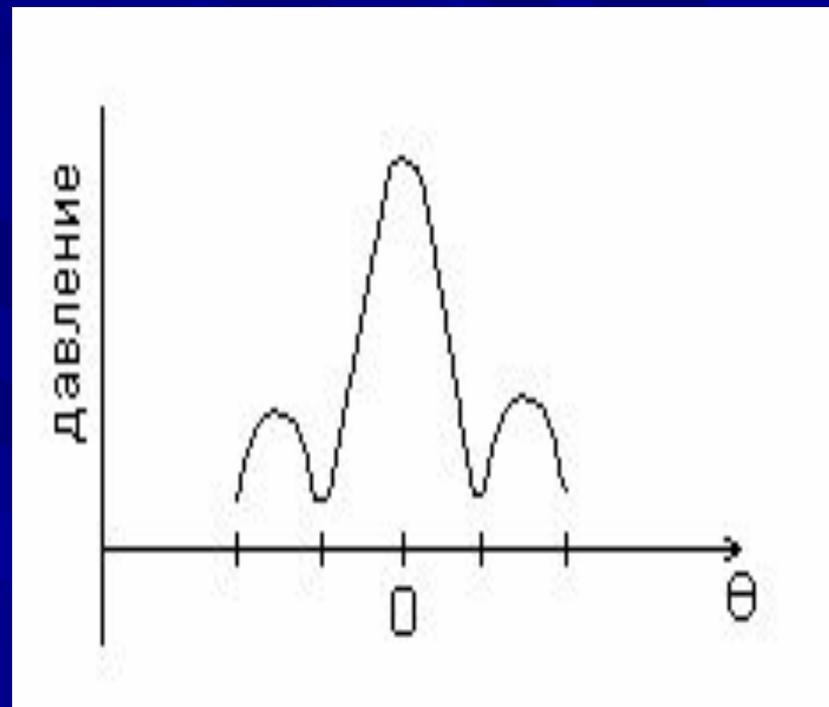
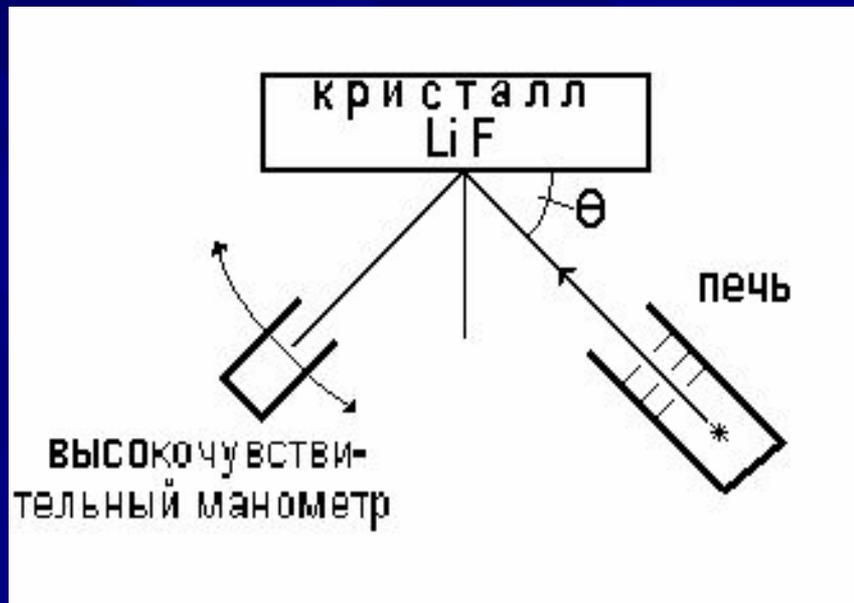
Дифракция электронов на тонких пленках золота (слева) и меди (справа)



Дифракция электронов на тонких пленках бериллия (слева) и олова (справа)



Опыты Штерна (Stern O., 1929г) Дифракция атомов водорода



$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mkT}}$$

Дифракция нейтронов "Брэгговский скачок"

Из формулы Вульфа-Брэгга
(Вульф Ю.В., Bragg L.)

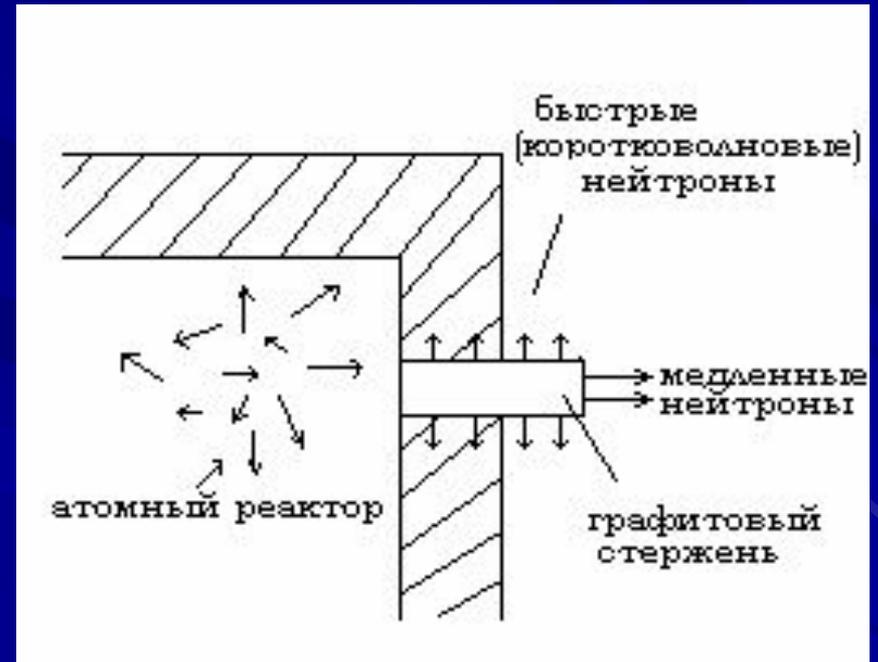
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

следует, что при

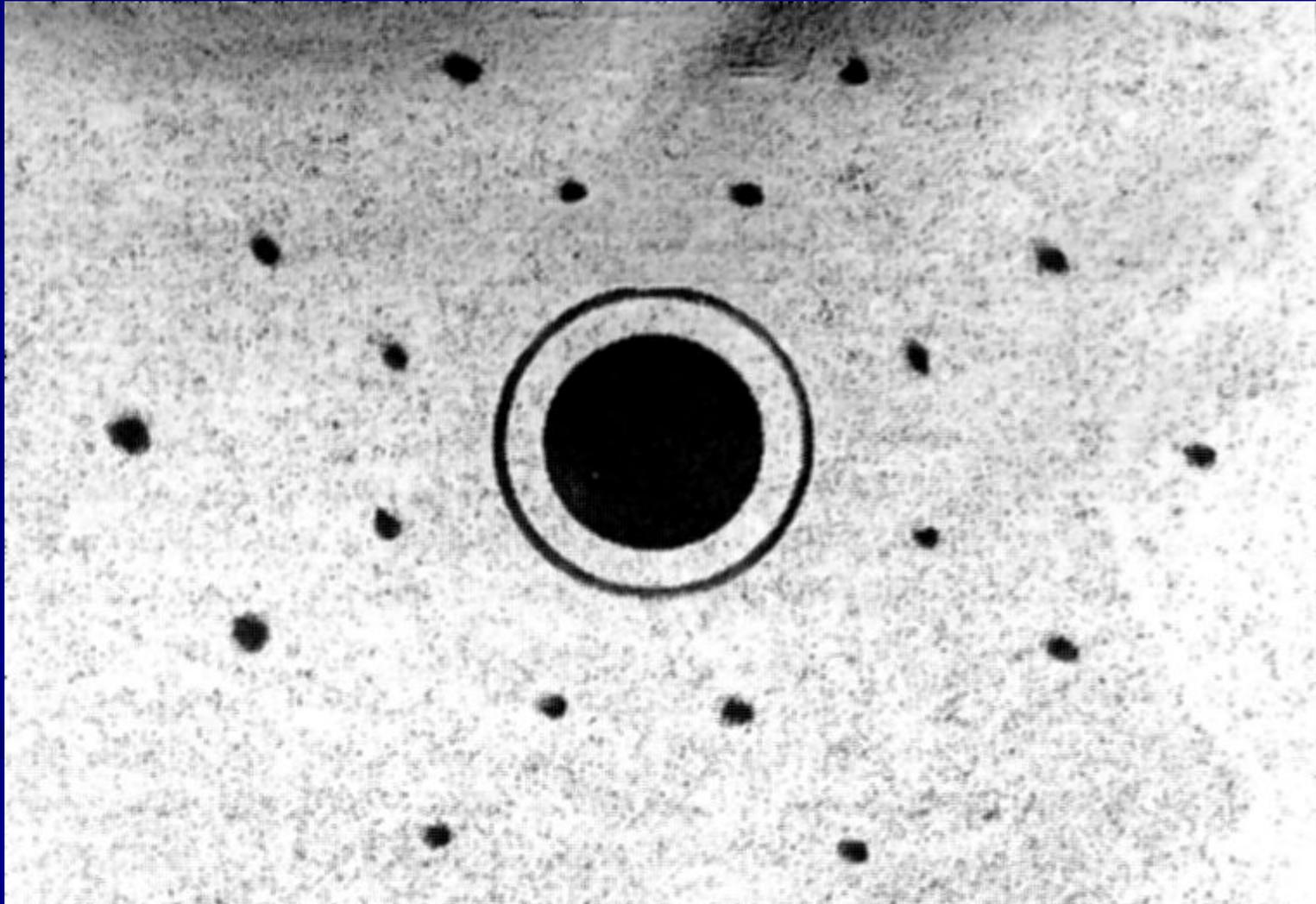
$$\lambda > 2d$$

дифракция невозможна
при любом значении n ,
даже при минимальном
 $n = 1$, т.к. тогда

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d} > 1$$



Дифракция нейтронов при прохождении через кристалл NaCl



Итак, реальность волновых свойств микрочастиц подтверждена прямыми экспериментами.

В 1937 году К.Дэвиссон и Дж.Томсон получили Нобелевскую премию за открытие дифракции электронов. О. Штерн получил Нобелевскую премию позднее, в 1943 году.