

2. 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 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» была высказана французским физиком Л. де Бройлем в 1924 и вскоре получила блестящее подтверждение в опытах по дифракции частиц.

Согласно квантовой механике, свободное движение частицы с массой m и импульсом $p = mv$ (где v — скорость частицы) можно представить как плоскую монохроматическую волну y_0 (волну де Бройля) с длиной волны

$$l = h/p, \quad (30)$$

распространяющуюся в том же направлении (например, в направлении оси x), в котором движется частица (рис. 23). Здесь h — постоянная Планка.

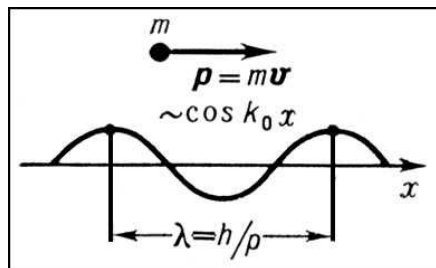


Рис. 23. Сопоставление волны и свободно движущейся частицы. Вверху показано прямолинейное движение частицы с массой m и импульсом $p = mv$ (v — скорость частицы), внизу — распространение соответствующей ей «материальной волны» $y_0 \sim \cos k_0 x$ с длиной волны $l = h/p$.

Зависимость y_0 от координаты x даёт формулой

$$y_0 \sim \cos(k_0 x), \quad (31)$$

где $k_0 = |k_0| = 2\pi/l$ — так называемое волновое число, а волновой вектор,

$$k_0 = \frac{2\pi}{h} p \quad (32)$$

направлен в сторону распространения волны, или вдоль движения частицы.

Волновой вектор монохроматической волны, связанной со свободно движущейся микрочастицей, пропорционален её импульсу или обратно пропорционален длине волны.

Поскольку кинетическая энергия сравнительно медленно движущейся частицы $E = mv^2/2$, длину волны можно выразить и через энергию:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (33)$$

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 l с расстоянием d между рассеивающими центрами: $l \sim d$.

Первым опытом по дифракции частиц, блестяще подтвердившим исходную идею квантовой механики — корпускулярно-волновой дуализм, явился опыт американских физиков К. Дэвиссона и Л. Джермера (1927) по дифракции электронов на монокристаллах никеля (Рис. 24). Если ускорять электроны электрическим полем с напряжением V , то они приобретут кинетическую энергию $E = eV$, (e — заряд электрона), что после подстановки в равенство (4) числовых значений даёт

$$\lambda = \frac{12,6}{\sqrt{V}} \quad (34)$$

Здесь V выражено в в, а l — в А ($1 \text{ А} = 10^{-8} \text{ см}$).

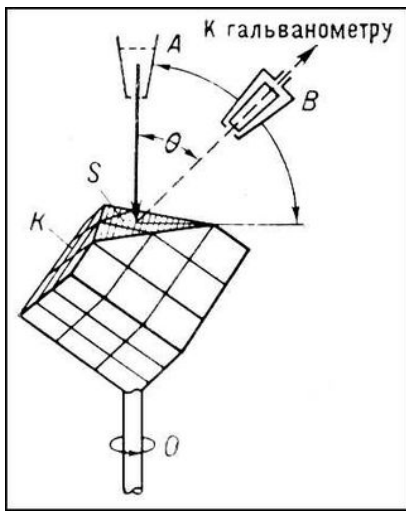


Рис. 24. Схема опыта Дэвиссона — Джермера: К — монокристалл никеля; А — источник электронов; В — приёмник электронов; θ — угол отклонения электронных пучков. Пучок электронов падает перпендикулярно отшлифованной плоскости кристалла S. При поворотах кристалла вокруг оси О гальванометр, присоединённый к приёмнику В, даёт периодически возникающие максимумы.

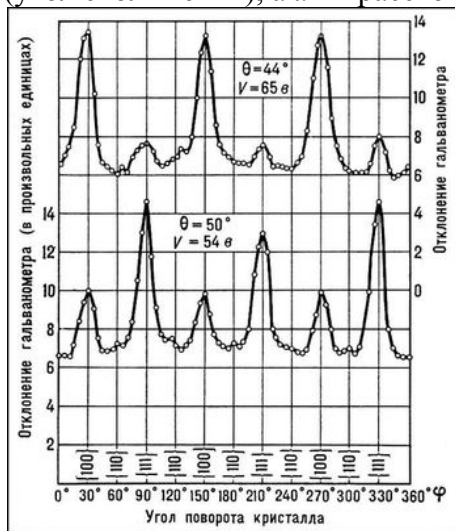
При напряжениях V порядка 100 в, которые использовались в этих опытах, получаются так называемые «медленные» электроны с l порядка 1 А. Эта величина близка к межатомным расстояниям d в кристаллах, которые составляют несколько А и менее, и соотношение $l \sim d$, необходимое для возникновения дифракции, выполняется.

Кристаллы обладают высокой степенью упорядоченности. Атомы в них располагаются в трёхмерно-периодической кристаллической решётке, т. е. образуют пространственную дифракционную решётку для

соответствующих длин волн. Дифракция волн на такой 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 Брэгга-Вульфа:

$$2d \sin J = n\lambda, \quad (35)$$

здесь J — угол, под которым падает пучок электронов на данную кристаллографическую плоскость (угол скольжения), а d — расстояние между соответствующими кристаллографическими плоскостями.



В опыте Дэвиссона и Джермера при «отражении» электронов от поверхности кристалла никеля при определённых углах отражения возникали максимумы (Рис. 25). Эти максимумы отражённых пучков электронов соответствовали формуле (6), и их появление не могло быть объяснено никаким другим путём, кроме как на основе представлений о волнах и их дифракции; т. о., волновые свойства частиц — электронов — были доказаны экспериментом.

Рис. 25. Запись дифракционных максимумов в опыте Дэвиссона — Джермера по дифракции электронов при различных углах поворота кристалла j для двух значений угла отклонения электронов θ и двух ускоряющих напряжений V . Максимумы отвечают отражению от различных кристаллографических плоскостей, индексы которых указаны в скобках.

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 А). Тогда возникает так называемая дифракция быстрых электронов на прохождении, 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 молекул. Позже наблюдалась дифракция протонов, а также дифракция нейтронов. Так было доказано экспериментально, что волновые свойства присущи всем без исключения микрочастицам.

Следует подчеркнуть, что волновые свойства присущи каждой частице в отдельности. Это было подтверждено опытом В. А. Фабриканта (1947) по дифракции электронов, поочерёдно летящих через образец. При этом постепенно, по истечении некоторого времени, возникала обычная картина дифракции. Это означало, что каждый из электронов подчиняется всем законам волновой оптики, а дифракционный эффект обязан взаимодействию волны де Бройля каждого электрона со всем объёмом кристалла. Начальная волна λ_0 (Ур.2), описывающая движение начального электрона, при прохождении через кристалл превращается в рассеянную волну λ .

Образование дифракционной картины при рассеянии частиц интерпретируется в квантовой механике следующим образом. Прошедший через кристалл электрон в результате взаимодействия с кристаллической решёткой образца отклоняется от своего первоначального движения и попадает в некоторую точку фотопластинки, установленной за кристаллом для регистрации электронов. Войдя в фотографическую эмульсию, электрон проявляет себя как частица и вызывает фотохимическую реакцию. На первый взгляд попадание электрона в ту или иную точку пластинки носит совершенно произвольный характер. Но при длительной экспозиции постепенно возникает упорядоченная картина дифракционных максимумов и минимумов в распределении электронов, прошедших через кристалл.

Точно предсказать, в какое место фотопластинки попадёт данный электрон, нельзя, но можно указать вероятность его попадания после рассеяния в ту или иную точку пластинки. Эта вероятность определяется волновой функцией электрона ψ , точнее квадратом её модуля (т.к. ψ — комплексная функция) $|\psi|^2$. Однако, поскольку вероятность при больших числах испытаний реализуется как достоверность, при многократном прохождении электрона через кристалл или, как это имеет место в реальных дифракционных экспериментах, при прохождении через образец пучка электронов, содержащего громадное количество частиц, величина $|\psi|^2$ определяет уже распределение интенсивности в дифрагированных пучках. Таким образом, результирующая волновая функция электрона ψ , которую можно рассчитать, зная u_0 и потенциальную энергию взаимодействия электрона с кристаллом, даёт полное описание дифракционного опыта в статистическом смысле.