

ГЛАВА XIII

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

§ 45. Дифракция электронов. Волны де Бройля

Затруднения с созданием модели строения атома, объясняющей все его наблюдаемые свойства, не могли быть преодолены в течение примерно 10 лет. Прямые опыты Резерфорда и его сотрудников доказали «ажурное» строение атома. Положительный заряд и основная масса атома сосредоточены в его ядре диаметром порядка 10^{-12} — 10^{-13} см. Сравнительно легкие отрицательно заряженные электроны заполняют основной объем атома диаметром порядка 10^{-8} см. Можно доказать в общем случае («теорема Ирншоу»; см. т. II, § 13), что статическая система электрических зарядов (при отсутствии неэлектрических сил!) не может быть устойчивой. Атом, как система разноименно электрически заряженных частиц, может быть устойчив только при условии, что эти заряды движутся друг относительно друга. Однако заряд, движущийся по замкнутой криволинейной траектории, имеет нормальное ускорение и, как всякий ускоренный заряд, должен непрерывно терять свою энергию, испуская электромагнитные волны. Теряя энергию, электрон должен непрерывно приближаться к ядру, т. е. такая система в принципе не может находиться в стационарном состоянии. Опыт же показывает, что атом является весьма устойчивой системой.

Изложенные обстоятельства приводили к выводу, что электроны в атомах движутся по законам, отличным от законов классической механики и электродинамики, установленных на опыте с макроскопическими телами. Так же как и в случае теории относительности, эти законы и вытекающие из них следствия должны в предельном случае макроскопических тел переходить в законы классической механики. Этот принцип соответствия являлся путеводной нитью в многочисленных попытках решения проблемы строения атома. Правильный путь решения был найден де Бройлем в 1924 г.

В 1922—1923 гг. прямые опыты Иоффе и Комптона (см. § 37) подтвердили правильность идеи Эйнштейна о двойственности корпускулярно-волновой природы излучения. Де Бройль сделал смелое предположение об аналогичной двойственной природе электронов, а затем и других частиц. Это значит, что с движением электрона, как и с движением фотона, следует сопоставить волновой процесс. Какую же волну следует приписать электрону?

Де Бройль использовал установленную в работах Ферма (см. § 2), Эйлера, Лагранжа, Гамильтона аналогию между законами оптики и механики. В классической оптике наряду с волновыми поверхностями (поверхностями равной фазы колебаний) можно рассматривать распространение света происходящим вдоль лучей — линий, ортогональных этим поверхностям (см. гл. III). В классической аналитической механике оказалось целесообразным наряду с возможными траекториями движущихся частиц рассматривать распространение перпендикулярных к ним поверхностей равной фазы некоторой «функции действия». Нахождение этой функции действия позволяет полностью решить поставленную механическую задачу.

Де Бройль предположил, что между корпускулярными и волновыми характеристиками электрона существует точно такая же связь, как между соответствующими характеристиками фотона. В гл. X была приведена связь импульса фотона с длиной волны излучения:

$$p = m_{\Phi}c = \frac{m_{\Phi}c^2}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (45.1)$$

или

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (45.2)$$

Де Бройль постулировал, что соотношение (45.2) справедливо не только для фотонов, но и для электронов. Впоследствии оказалось, что это соотношение верно для любых микрочастиц и систем, состоящих из них.

Электрон движется со скоростью $v < c$ и его импульс

$$p = m_e v, \quad \text{где} \quad m_e = \frac{m_{0e}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (45.3)$$

Таким образом, соотношение де Бройля сопоставляет электрону с импульсом p длину волны

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v}. \quad (45.4)$$

При ускорении электрона в электрическом поле с разностью потенциалов U , не превышающей 10^4 в, масса электрона m_e практически не отличается от массы покоя m_{0e} . Кинетическая энергия,

приобретаемая электроном в ускоряющем поле, равна -

$$\frac{1}{2} m_{0e} v^2 = eU,$$

и скорость

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_{0e}}}. \quad (45.5)$$

Из (45.4) и (45.5) следует (переходя для U к вольтам):

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{m_{0e} v} = \frac{h}{m_{0e} \sqrt{\frac{2eU}{m_{0e}}}} = \frac{h}{\sqrt{2em_{0e}U}} = \\ &= \frac{6,62 \cdot 10^{-27}}{\sqrt{(U/300) \cdot 2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 9,11 \cdot 10^{-28}}} = \frac{1,23 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{U}} \text{ см} \end{aligned}$$

или

$$\lambda = \frac{12,3}{\sqrt{U}} \text{ \AA}. \quad (45.6)$$

Ускоряющие поля в обычных электронных приборах лежат в интервале $1 \div 10^4$ в. Соответствующие длины волн летящих электронов составляют $10 \div 0,1$ \AA, т. е. меняются в диапазоне длин волн обычных рентгеновских лучей. При размерах электронных приборов $l \approx 10$ см

$$\lambda \ll l$$

и волновые свойства для электронного пучка практически не проявляются. Волновые свойства, в частности дифракция электронов, могут наблюдаться на

дифракционной решетке с постоянной порядка $\sim \lambda$. Так же как и для рентгеновских лучей, дифракцию электронов можно пытаться обнаружить с помощью естественной — кристаллической — решетки. Такие опыты были поставлены в 1927 г. Дэвисоном и Джермером.

Пучок монохроматических электронов из электронной пушки P падал на поверхность кристалла никеля (рис. 2.7), структура кото-

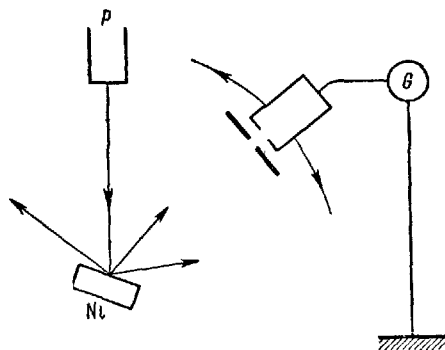


Рис. 2.7.

рого была хорошо известна из данных рентгеноструктурного анализа. Рассеянные от кристалла электроны улавливались специальным электродом, присоединенным к чувствительному гальванометру. Приемник электронов мог перемещаться так, чтобы улавливать электроны, рассеиваемые под различными углами.

В частности, при энергии электронов в 54 эв получался острый максимум для угла отражения $\theta=50^\circ$, что отвечает по формуле Вульфа — Брэгга (16.1) длине волны 1,67 Å. Из уравнения (45.6) также следует:

$$\lambda = \frac{12,3}{\sqrt{54}} = 1,67 \text{ Å.}$$

Результат представляет собой прекрасное доказательство правильности идеи де Бройля. Формула де Бройля проверялась неоднократно, причем всегда получалось полное соответствие теории с опытом. Так, советский ученый П. С. Тартаковский исследовал прохождение быстрых электронов через тонкие металлические пленки. При этом получается дифракционная картина, в точности такая же, как и при прохождении рентгеновских лучей через кристаллические порошки. Это показывает, что такие пленки имеют микрокристаллическую структуру. На рис. II (в конце книги) приведена фотография дифракции электронов от монокристалла, а на рис. III — от мелкокристаллической пленки металла.

Итак, электроны, как и фотоны, обладают волновыми свойствами наряду со свойствами корпускулярными. Следует отдать себе ясный отчет в соотношении этих двух сторон природы электрона.

Не присущи ли волновые свойства только потоку большой совокупности электронов? Такое предположение высказывалось и в отношении фотонов, но оно опровергается работами С. И. Вавилова, Яноши и др. (см. §§ 37, 38). Для электронов аналогичная задача была решена В. Фабрикантом и его сотрудниками.

В 1948 г. В. Фабрикант, Л. Биберман и Н. Сушкин осуществили опыт по дифракции электронов со столь малой силой тока в приборе, что каждый электрон проходил через прибор независимо от других. Среднее время между прохождениями двух электронов через прибор примерно в 30 000 раз превышало время прохождения электрона через прибор. При длительной экспозиции была получена такая же дифракционная картина, как и при короткой экспозиции электронного потока большой плотности. Этот опыт показывает, что волновые свойства присущи каждому электрону в отдельности.

Как и в случае фотонов, дифракция одного электрона не дает всей системы точек, которая получается в результате дифракции потока электронов. След от одного электрона, прошедшего дифракционную решетку-кристалл, окажется лишь в одной из тех точек, которые разрешаются условиями дифракции. Этим проявляется корпускулярная сторона природы электрона — он не может «расплыться» по всем направлениям, для которых удовлетворяются

условия дифракции, его действие проявляется лишь в одном месте. В каком именно из возможных направлений проявится это действие, сказать нельзя. Современная теория позволяет лишь вычислить, какова вероятность того, что действие электрона проявится в той или иной точке пластинки. Это делает возможным достаточно точно судить о поведении большой совокупности электронов.

Таким образом, мы приходим к следующим заключениям о природе электрона:

1. Волновая природа электрона, проявляющаяся, в частности, в том, что электроны обнаруживают дифракцию, свидетельствует о невозможности представить электрон в виде «материальной точки» — маленькой дробинки, корпускулы. Электрон является сложным материальным образованием, сложной структурой, обладающей волновыми свойствами. Эта структура, очевидно, меняется в зависимости от условий, в которых находится электрон, т. е. в зависимости от характера его взаимодействия с окружающей материей. Так, очевидно, что области локализации электрона (т. е. области, в которой отлична от нуля амплитуда волны де Бройля) различны, когда электрон находится в атоме или проходит кристалл, взаимодействуя одновременно с тысячами атомов решетки. О том, что электрон взаимодействует при прохождении решетки одновременно со множеством атомов, свидетельствует острота дифракционных максимумов (см. гл. V, § 14).

2. Корпускулярная сторона природы электрона проявляется в том, что электрон действует всегда как единое целое, никогда не дробясь на части. Его неделимость не обусловлена его «точечностью» (так как он — не материальная точка), но имеет гораздо более сложную природу, разгадка которой — дело будущего. «Электрон так же *неисчерпаем*, как и атом», — указывал В. И. Ленин в «Материализме и эмпириокритицизме».

И по сей день нет единой точки зрения в понимании природы соотношения корпускулярного и волнового аспектов. Рассмотрение этой проблемы выходит далеко за пределы общего курса физики. Сказанное выше должно лишь пояснить, почему наличие корпускулярно-волновых свойств приводит к статистичности описания, возможности судить о поведении электрона лишь вероятно.

Следует иметь также в виду, что волна де Бройля описывает движение материальной частицы, но не дает никаких сведений о том, что принято называть «структурой» частицы. Знание структуры электронов (как и других частиц) должно объяснить тождество их зарядов, масс покоя, спинов, характера взаимодействия с себе подобными частицами и частицами другой природы и т. д.

В настоящее время дифракция электронов широко используется для исследования строения вещества. Несмотря на то, что диапазон длин волн электронов тот же, что и для рентгеновских лучей, электронная дифракция позволяет решать задачи, существенно отличные от тех, которые доступны рентгеноструктурному анализу. Это имеет место по следующим причинам:

1. Рентгеновские лучи рассеиваются электронной оболочкой атома и практически не рассеиваются атомными ядрами. Наглядное классическое объяснение состоит в том, что ядра атомов, в силу большой массы, практически не испытывают ускорения в электромагнитном поле фотона и, следовательно, не испускают рассеянных волн, как электроны.

Электроны же взаимодействуют благодаря электромагнитным силам не только с электронами атома, но и с ядром. Расчет показывает, что интенсивность рассеяния электронами пропорциональна их числу в атоме, т. е. Z , а интенсивность рассеяния ядром заряда Ze пропорциональна Z^2 . Таким образом, основная доля электронов рассеивается атомными ядрами. То, что интенсивность рассеяния ядром пропорциональна Z^2 , позволяет различать атомы даже с близкими Z . Кроме того, рентгеноструктурный анализ не позволяет обнаруживать положение атома водорода в молекуле или кристалле, так как единственный электрон атома водорода при этом «обобществляется», входя в состав общей электронной оболочки, а протон практически не рассеивает рентгеновских лучей. Электронографический анализ позволяет находить положение протонов.

2. Рентгеновские лучи рассеиваются в веществе весьма слабо. Для получения рентгенограммы необходима достаточно большая толщина вещества и экспозиция в течение многих часов.

Электроны взаимодействуют с веществом, благодаря наличию заряда, очень сильно и позволяют получать прекрасные электронограммы от тончайших пленок толщиной, например, в 20—30 Å. Снимок получается при экспозиции в несколько секунд. Дифракция электронов позволяет исследовать, например, изменение структуры тончайшего поверхностного слоя металлов при их полировке, что совершенно невозможно сделать методами рентгеноструктурного анализа, хотя и представляет огромный интерес для прикладных целей, так как именно структура поверхностных слоев металла определяет устойчивость детали на износ.

Формула де Бройля (45.4) применима к любым частицам, простым и сложным. Однако дифракционные явления, следовательно волновые свойства частиц, можно заметить далеко не всегда. Это происходит в силу того, что длина волны де Бройля λ обратно пропорциональна массе частиц.

Если для электрона с энергией в 1 эв получается сравнительно очень большая величина: $\lambda = 12,3 \text{ Å}$, то для протона той же энергии она составляет уже 0,28 Å, а для молекулы кислорода при комнатной температуре—0,14 Å. Кроме

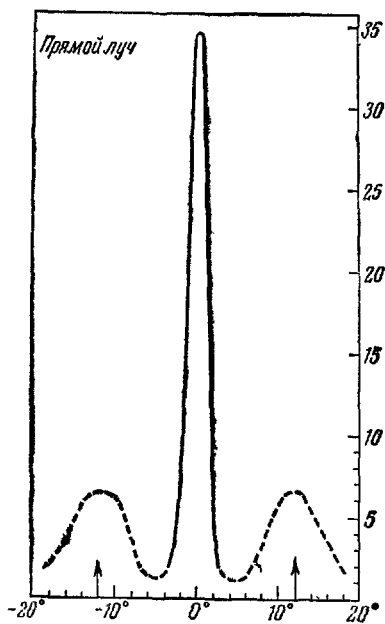


Рис. 2.8.

малости длины волны, исследования дифракции атомов и молекул затрудняются тем, что атомы и молекулы неспособны проникать в толщу кристалла и поэтому могут дать лишь дифракцию от поверхностей решетки кристалла. Трудно также получить достаточно монохроматический атомный или молекулярный пучок. Тем не менее получена достаточно четкая дифракционная картина атомов гелия (рис. 2.8) и молекул водорода (рис. 2.9) от кристалла фтористого лития. Полученные результаты подтверждают пригодность формулы де Бройля для сложных («составных») частиц.

На рис. IV (в конце книги) воспроизведена фотография дифракции нейтронов (об этих элементарных частицах подробнее см. ниже, § 62) в кристалле кварца. О способах сенсibilизации (т. е. «очувствления») пластинок для регистрации этих нейтральных частиц будет сказано ниже. В настоящее время исследование структуры вещества с помощью дифракции нейтронов — «нейтронография» — получает все более широкое применение. Дифракция нейтронов позволяет исследовать упорядоченные структуры сплавов типа FeCo, Ni₃Mn, у которых близость атомных номеров не позволяет различать методами дифракции рентгеновских лучей или электронов атомы различных типов. Нейтроны рассеиваются ядрами этих атомов различно, и установить их взаимное расположение оказалось возможным методом нейтронографии. Любопытно, что установить структуру кристалла льда — определить расположение в нем атомов кислорода и водорода — удалось лишь методом нейтронографии.

Что касается макроскопических частиц материи, то их дифракцию наблюдать невозможно.

Так, например, пылинка с массой $m = 10^{-12}$ г, линейных размеров $\sim 10^{-4}$ см и скорости всего 1 см/сек имеет длину волны

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-27}}{10^{-12} \cdot 1} = 6,62 \cdot 10^{-15} \text{ см} = 6,62 \cdot 10^{-7} \text{ \AA}.$$

При такой длине волны невозможно реализовать условия, с помощью которых можно было бы наблюдать дифракцию, т. е. макроскопические частицы проявляют явно только одну сторону своей природы — корпускулярную.

Таким образом, новая теория, трактующая материальные частицы как объекты двойственной корпускулярно-волновой природы, не отбрасывает старых корпускулярных представлений о макроскопических частицах материи, но, обосновывая эти представления с новой точки зрения, одновременно дает и пределы их применимости.

§ 46. Волновая функция. «Соотношения неопределенностей»

Итак, прямые опыты по дифракции подтвердили, что электрон не является материальной точкой, а представляет собой сложный материальный объект, обладающий волновыми свойствами. Каковы же размеры электрона и какую область пространства он заполняет, как говорят, какова же «локализация» (от латинского locus — место)