

Гипотеза де Бройля

1. Корпускулярно-волновой дуализм света. Свойства фотонов

Для объяснения распределения энергии в спектре равновесного теплового излучения достаточно, как показал Планк, допустить, что свет только испускается порциями. Для объяснения фотоэффекта достаточно предположить, что свет поглощается такими же порциями. Однако Эйнштейн пошел значительно дальше. Он выдвинул гипотезу, что свет и распространяется в виде дискретных частиц, названных первоначально световыми квантами. Впоследствии эти частицы получили название фотонов, существование которых было доказано экспериментально.

Фотон обладает энергией

$$E = \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}, \quad \Leftrightarrow \quad \omega = \frac{E}{\hbar}, \lambda = \frac{2\pi\hbar c}{E} \quad (21)$$

определяемой только его частотой ω или длиной волны λ , и импульсом

$$p = mc, E = mc^2, p = \frac{E}{c} = \frac{2\pi\hbar c}{c\lambda} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{h}{mc} \quad (22)$$

Энергия фотона может быть выражена в электрон-вольтах. Длине волны $\lambda = 555$ нм соответствует энергия фотона $E = 2,23$ эв. Для рентгеновских лучей ($\lambda \approx 10^{-4} \div 8 \cdot 10^2$ Å) энергия фотона лежит в пределах от 15 эв до ~ 100 Мэв.

Согласно теории относительности частица с энергией E обладает массой

$$E = mc^2, m = \frac{E}{c^2} \quad (23)$$

Подставив значение E , получим для массы фотона выражение:

$$m = \frac{\hbar\omega}{c^2} \quad (24)$$

Фотон есть частица, движущаяся со скоростью c .

Согласно теории относительности

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (25)$$

Где m_0 - масса покоя частицы. Подстановка в формулу (24) значения $v = c$ обращает знаменатель формулы в нуль. Вместе с тем, как следует из (23), масса фотона конечна. Это возможно только в том случае, если масса покоя m_0 равна нулю. Таким образом, фотон — особенная частица, существенно отличающаяся от таких частиц, как электрон, протон и нейтрон, которые обладают не равной нулю массой покоя и могут находиться в состоянии покоя. Фотон не имеет массы покоя и может существовать, только двигаясь со скоростью c как в вакууме, так и в среде.

Таким образом, в таких явлениях, как интерференция и дифракция, свет проявляет себя как волна, а в таких явлениях, как фотоэффект, эффект Комптона, свет проявляет себя как частица. Следовательно, свет имеет двойственную структуру, называемую корпускулярно-волновым дуализмом. Свет представляет собой более сложный элемент реальности, чем просто волна или просто частица. Волновой и корпускулярный аспекты поведения света это разные стороны его природы, проявляющиеся в разных экспериментах. На первых этапах развития квантовой механики Бор выдвинул принцип дополнительности, согласно которому для объяснения конкретного эксперимента следует использовать либо волновые, либо корпускулярные представления о природе света, но **не те и другие одновременно**. Однако для полного понимания природы света необходимо учитывать как волновые, так и корпускулярные свойства света. Оба эти аспекта взаимно дополняют друг друга.

Проиллюстрируем на примере опыта Юнга, как осуществляется согласование волновых и корпускулярных свойств света в рамках современной квантовой оптики. Распределение интенсивности в интерференционной картине на экране определяется квадратом амплитуды колебаний светового вектора волны, образующейся в результате наложения волн от двух щелей. С другой стороны, освещенность участков экрана пропорциональна вероятности попадания фотонов на этот участок. Следовательно, квадрат амплитуды колебаний электрического вектора в точке экрана характеризует плотность вероятности обнаружения фотона в данной точке.

В заключение укажем, что последовательной теорией световых явлений является квантовая электродинамика.

2. Волны де Бройля.

Волновые свойства вещества Недостаточность теории Бора сделала необходимым критический пересмотр основ квантовой теории и представлений о природе элементарных частиц (электронов, протонов и т. п.). Возник вопрос о том, насколько исчерпывающим является представление электрона в виде малой механической частицы, характеризуемой определенными координатами и определенной скоростью.

В результате углубления знаний о природе света выяснилось, что в оптических явлениях обнаруживается своеобразный дуализм. Наряду с такими свойствами света, которые самым непосредственным образом свидетельствуют о его волновой природе (интерференция, дифракция), имеются и другие свойства, столь же непосредственно обнаруживающие его корпускулярную природу (фотоэффект, явление Комптона).

В 1924 г. Луи де-Бройль выдвинул смелую гипотезу, что дуализм не является особенностью одних только оптических явлений, но имеет универсальное значение.

«В оптике, — писал он, — 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.

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

$$p = m_e v, m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (26)$$

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

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{h}{mv}, \omega = \frac{E}{\hbar} \quad (27)$$

Гипотеза де Бройля получила подтверждение в опытах по наблюдению дифракции электронов. При наблюдении дифракции электронов на двух щелях были получены следующие результаты, приведенные на рис. 4.

Вначале поток электронов пропусклся через левую щель при закрытой правой (слева на рисунке), затем – через правую щель при закрытой левой (в центре) и, наконец, через обе открытые щели (справа на рисунке). В последнем случае была получена дифракционная картина, типичная для интерференции электромагнитных волн. Этот опыт был выполнен в 1961 г. немецким физиком Ионссоном.

Дифракция наблюдается если направлять не только поток большой совокупности электронов, но и электроны по одиночке, так чтобы каждый электрон проходил через прибор независимо от других. Среднее время между прохождением 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.

Физический смысл волн де Бройля

Макс Борн: волны де Бройля описывают вероятность нахождения частицы в данной области пространства

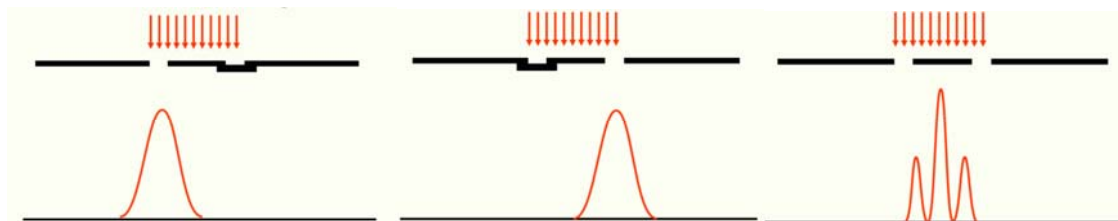


Рис.4. Опыты по наблюдению дифракции электронов

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, т.е. волны де Бройля описывают вероятность нахождения частицы в данной области пространства.** Вероятностный подход 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.

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.

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 вероятностно.

Все эти результаты свидетельствуют об особых свойствах микрочастиц, которые нельзя представить в виде малого шарика или какого-либо другого локализованного объекта. Более того, как следует из теории (соотношение неопределенности Гейзенберга: $\Delta x \Delta p \geq \hbar$, где Δx - неопределенность в измерении координаты, Δp - неопределенность в измерении импульса частицы), невозможно

одновременно точно измерить координату и импульс частицы, можно говорить лишь о некоторых интервалах возможных значений этих величин.

Такая запись соотношения неопределенностей означает, что произведение неопределенностей координаты и соответствующего ей импульса не может быть меньше величины порядка \hbar . Чем точнее определена одна из величин, x или p , тем больше становится неопределенность другой. Возможны состояния частицы, при которых одна из величин имеет вполне точное значение, но тогда вторая величина будет совершенно неопределенной. При определенных условиях понятия положения в пространстве и траектории оказываются приближенно применимыми к движению микрочастиц, подобно тому, как в приближении геометрической оптики оказывается справедливым закон прямолинейного распространения света.

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.