

Корпускулярно-волновой дуализм

Темы кодификатора ЕГЭ: гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц, корпускулярно-волновой дуализм, дифракция электронов.

*Корпускулярно-волновой дуализм*¹ — это физический принцип, утверждающий, что любой объект природы может вести себя и как частица, и как волна.

С первым проявлением этого принципа мы столкнулись в предыдущем листке, когда говорили о двойственной, корпускулярно-волновой природе света. В явлениях интерференции и дифракции свет демонстрирует свою волновую природу. В явлении фотоэффекта свет выступает как дискретный поток частиц — фотонов.

Является ли свет каким-то особым объектом нашего мира, таким, что подобный дуализм присущ только ему? Или, быть может, корпускулярно-волновой дуализм — это свойство вообще всех материальных объектов, просто впервые обнаружен он был для света?

Гипотеза де Бройля

Идея об универсальной двойственности корпускулярных и волновых свойств всех объектов природы была впервые высказана Луи де Бройлем (в 1924 году) в качестве гипотезы о волновых свойствах частиц.

Итак, мы знаем, что свету с частотой ν и длиной волны λ соответствуют частицы — фотоны, обладающие энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h/\lambda$. Де Бройль, в сущности, постулировал обратное.

Гипотеза де Бройля. *Движению каждой частицы соответствует распространение некоторой волны. Частота и длина этой волны определяются энергией и импульсом частицы:*

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad \lambda = \frac{h}{p}. \quad (1)$$

Точно так же, любой волне с частотой ν и длиной волны λ отвечают частицы с энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h/\lambda$.

Чтобы лучше осмыслить гипотезу де Бройля, давайте обсудим дуализм «волна–частица» на примере электромагнитного излучения.

В случае электромагнитных волн мы имеем следующую закономерность. По мере увеличения длины волны всё легче наблюдать волновые свойства излучения и всё труднее — корпускулярные. И наоборот, чем меньше длина волны, тем ярче выражены корпускулярные свойства излучения и тем труднее наблюдать его волновые свойства. Изменение соотношения корпускулярных и волновых свойств хорошо прослеживается при движении по известной вам шкале электромагнитных волн.

- *Радиоволны.* Длины волн здесь настолько велики, что корпускулярные свойства излучения практически не проявляются. Волновые свойства в этом диапазоне абсолютно доминируют.

Длины волн могут составлять несколько метров или даже километров, так что волновая природа проявляется «сама собой» — радиоволны в процессе дифракции запросто огибают дома или горы. Излучение радиоволн и их взаимодействие с материальными объектами отлично описывается в рамках классической электродинамики.

¹Слово *дуализм* означает *двойственность*.

- *Видимый свет и ультрафиолет.* Это своего рода «переходная область»: в оптике мы можем наблюдать как волновые свойства света, так и корпускулярные.

Однако в обоих случаях надо постараться. Так, длины волн видимого света много меньше размеров окружающих нас тел, поэтому в опытах по интерференции или дифракции света нужно создавать специальные условия (малость щелей или отверстий, удалённость экрана). В свою очередь, термин «красная граница фотоэффекта» также подчёркивает пограничность данного диапазона: фотоэффект начинается лишь при переходе через красную границу.

- *Рентгеновское и гамма-излучение.* Длины волн очень малы, и наблюдать волновые свойства излучения весьма затруднительно. Так, верхняя граница длин волн рентгеновского излучения составляет 10 нм; это лишь на два порядка превышает размер атома. Ясно, что дифракцию на «обычных» препятствиях при такой длине волны наблюдать невозможно.

Однако в рентгеновский диапазон входят длины волн порядка размера атома и межатомных расстояний в кристалле (0,1 нм). Поэтому дифракция рентгеновских лучей наблюдается на «естественных» дифракционных решётках — кристаллических решётках твёрдых тел².

Энергия квантов в рентгеновском и гамма-диапазоне настолько велика, что излучение ведёт себя почти стопроцентно как поток частиц.

Рассуждая по аналогии с электромагнитными волнами, можно заключить, что и частица будет проявлять волновые свойства тем лучше, чем больше её длина волны де Бройля (в масштабах данной ситуации).

Так, мы совсем не наблюдаем волновых свойств у окружающих нас тел. (Видели вы, например, интерференцию движущихся автомобилей?) А почему? Давайте посчитаем длину дебройлевской волны объекта массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 1} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ м.}$$

Это на 25 порядков меньше размера атома. Воображение отказывается представить себе столь малую величину. Разумеется, никакого волнового поведения у нашего объекта при таких условиях не обнаруживается — он стопроцентно ведёт себя как «частица», то есть как материальная точка классической механики.

Дифракция электронов

Совсем другое дело — электрон. Масса электрона равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, и столь малое значение массы (а стало быть, и импульса в формуле $\lambda = h/p$) может дать длину волны де Бройля, достаточную для экспериментального обнаружения волновых свойств.

И вот оказывается, что электроны с энергией 100 эВ (при такой энергии становится несущественным хаотическое тепловое движение электронов, и электронный пучок можно считать когерентным) имеют дебройлевскую длину волны примерно 0,1 нм — это как раз порядка размера атома и расстояний между атомами в кристаллической решётке! Опыт по наблюдению дифракции рентгеновских лучей на кристаллических структурах уже имелся, поэтому оставалось направить на кристаллическую решётку пучок электронов.

Впервые это было сделано в знаменитом эксперименте американских физиков Дэвиссона и Джермера (1927 год). Дифракция электронов на кристаллах была обнаружена! Как и ожидалось, полученная дифракционная картина имела тот же характер, что и при дифракции на кристаллической решётке рентгеновских лучей.

²Эта идея была высказана немецким физиком Лауэ в 1912 году.

Впоследствии волновые свойства были обнаружены и у более крупных частиц: протонов, нейтронов, атомов и молекул. Гипотеза де Бройля, таким образом, получила надёжное опытное подтверждение.

Соотношение неопределённостей

Обнаружение корпускулярных свойств электромагнитных волн и волновых свойств частиц показало, что объекты микромира подчиняются необычным законам. Эти законы совершенно непривычны для нас, привыкших наблюдать за макроскопическими телами.

Наше сознание выработало некоторые образы частицы и волны, вполне пригодные для описания объектов классической физики. Частица — это маленький, локализованный в пространстве сгусток вещества. Волна — это распределённый (не локализованный) в пространстве колебательный процесс. Как же эти понятия могут совмещаться в одном объекте (например, в электроне)?

Вообразить такое действительно получается с трудом. Но что поделать — это факт. Природа оказывается намного богаче нашего воображения. В своей повседневной жизни мы находимся очень далеко от микромира, и в привычном нам диапазоне макроскопических тел природа демонстрирует свои «крайние» проявления — в виде «только частиц» или «только волн». Вот почему корпускулярные и волновые свойства представляются нам несовместимыми друг с другом. Но на самом деле это не так: в микромире оказывается, что один и тот же объект (например, электрон) легко может обладать обоими свойствами одновременно — словно человек, обладающий разными, несовместимыми на первый взгляд чертами характера.

Так, будучи частицей, электрон локализован в пространстве; но, будучи волной, локализован не в точке, а «размазан» по некоторой области. Координаты и скорость электрона не могут быть измерены одновременно сколь угодно точно. Неопределённость координаты Δx и неопределённость соответствующей проекции импульса Δp_x оказываются связанными *соотношением неопределённостей* Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar. \quad (2)$$

Соотношение неопределённостей (2) имеет фундаментальный характер — оно применимо к любым объектам природы. Чем точнее мы знаем координаты объекта (то есть чем в меньшей пространственной области он локализован), тем больше получается разброс значений его импульса (то есть тем с большей скоростью объект «готов вылететь» из этой области). И наоборот, чем точнее мы знаем импульс объекта, тем меньше у нас информации о том, где этот объект находится.

Но коль скоро нет возможности одновременно точно измерить координаты и скорость, то теряет смысл понятие траектории движения объекта. Механика Ньютона перестаёт работать в микромире и уступает место *квантовой механике*.