

после работы Гейзенберга (1927), в к-рой было сформулировано *неопределённостей соотношение* — важнейшее соотношение, освещающее физ. смысл ур-ний К. м., её связь с классич. механикой и ряд др. принципиальных вопросов К. м. Эта работа была продолжена и обобщена в трудах Бора и Гейзенберга.

Детальный анализ спектров атомов привел к представлению [введённому Дж. Уленбеком (G. Uhlenbeck) и С. Гаудсмитом (S. Goudsmit)] и развитому В. Паули (W. Pauli) о том, что электроню кроме заряда и массы должна быть приписана ещё одна внутр. характеристика — *спин*. [Ранее представление о внутр. моменте электрона развивалось Р. Кронигем (R. Kronig), но его работа не была опубликована.] Важную роль сыграл открытый Паули (1925) т. н. принцип запрета (*Паули принцип*, см. ниже), имеющий фундам. значение в теории атомов, молекул, ядер, твёрдых тел.

В течение короткого времени К. м. была с успехом применена для описания широкого круга явлений. Были созданы теории атомных спектров, строения молекул, хим. связи, периодич. системы элементов, металлич. проводимости и ферромагнетизма. Дальнейшее принципиальное развитие квантовой теории связано гл. обр. с релятивистской К. м. Нерелятивистская К. м. развивалась в осн. в направлении охвата разнообразных конкретных задач физики атомов, молекул, твёрдых тел, а также совершенствования матем. аппарата и разработки количеств. методов решения разл. задач. Вместе с тем не прекращалась разработка и принципиальных проблем К. м. — альтернативных схем её интерпретации (в т. ч. с помощью *скрытых параметров*), теории измерений (*квантовые неразрушающие измерения*) и т. д., продолжали возникать и новые разделы и методы К. м. — теория движения в нерегулярном поле (*андерсоновская локализация*), теория комплексного углового момента (*Редже полюсов метод*), суперсимметричная К. м. (см. *Суперсимметрия*) и др. Р. Фейнманом (R. Feynman) была предложена новая формулировка К. м. в виде т. н. интегралов по траекториям (см. *Функционального интеграла метод*).

Физические основы К. м.

Корпускулярно-волновой дуализм. Физ. основой К. м. является корпускулярно-волновой дуализм — всеобщее и универс. свойство материи, согласно к-рому не только любой волне с частотой ω и волновым вектором k отвечает частица с энергией \mathcal{E} и импульсом p , соответственно равными:

$$\mathcal{E} = \hbar\omega, \quad p = \hbar k, \quad (1)$$

но и, обратно, с любой частицей, обладающей энергией \mathcal{E} и импульсом p , связана волна, частота и волновой вектор к-рой определяются соотношениями (1). Наличие у частиц волновых свойств доказано в огромном числе экспериментов. Интерференция и дифракция наблюдались для электронов, нейтронов, атомных ядер, атомов, молекул. Волновые свойства нейтронов лежат в основе *нейтронной оптики* (имеющей, в частности, прикладное значение) и широко используются при изучении структуры вещества (см. *Нейтронграфия*). Т. о., теория движения микрочастиц с необходимостью обязана учитывать наличие у них волновых свойств. Это с неизбежностью ведёт к отказу от нек-рых классич. представлений, сформировавшихся в результате наблюдения движения макроскопич. тел. В частности, наблюдение волновых явлений несовместимо с представлением о движении частицы по определённой классич. траектории.

В качестве примера рассмотрим дифракцию света на двух щелях (рис. 1). Если характерные размеры в рассматриваемой задаче соизмеримы с длиной волны света (а источник S можно считать точечным), то на экране Э будет наблюдаться интерференц. полосы. При корпус-

кулярной интерпретации данного результата это означает, что в точку M , отвечающую минимуму интерференции, фотоны не попадают. С точки зрения классич. представлений движения частиц по траекториям, фотоны не должны попадать в точку M ни по пути SaM , ни по пути SbM . Это, однако, противоречит след. опыту: закрывая щель b , можно наблюдать нек-рую освещённость в точке M , что указывает на возможность распространения фотонов по пути SaM . Аналогично, закрывая щель a , можно убедиться, что фотоны могут распространяться и по пути SbM . Исходя из классич. представлений о движении частиц, нельзя объяснить, почему фотоны, способные попадать в точку M как по пути SaM , так и по SbM в отдельности, не попадают в неё, когда оказывается возможным движение по обоим путям сразу. [Представление о том, что между фотонами, движущимися по разным путям, существует взаимодействие, обуславливающее интерференц. явления, опровергается опытом, из к-рого следует, что картина интерференции не зависит от интенсивности источника S . Более того, если вместо экрана использовать, напр., фотоэмульсию, накапливающую эффект, то при достаточно большой экспозиции интерференция будет наблюдаться при столь малой интенсивности источника, когда от него летят практически единичные фотоны. Образно говоря, каждый фотон интерферирует сам с собой, что и даёт в результате интерференц. картину (хотя попадание каждого отд. фотона на фотоэмульсию — случайно).] Причиной возникшего парадокса является предположение о том, что каждый фотон движется по волне и определяет траектории. Это предположение представляет собой необоснованное распространение понятия траектории (возникшего в результате наблюдения движения макроскопич. тел) на движение фотона, для к-рого оно не имеет места. Напротив, наблюдение интерференц. явлений [для осуществления к-рых необходимо по крайней мере два возможных пути движения фотонов (или к.-л. др. частиц)] указывает на то, что в этом случае нельзя считать, что частица движется по определ. траектории. Существенно, что соотношения (1), согласно к-рым с волной может быть сопоставлена частица, определяют лишь энергию и импульс этой частицы, не требуя её движения по к.-л. определ. траектории.

Принцип суперпозиции состояний. Для того чтобы устранить противоречие между корпускулярным и волновым описанием явлений (существующее в рамках классич. представлений о частицах как матер. точках, движущихся по определ. траекториям), оказывается необходимым спец. постулат — т. н. принцип суперпозиции состояний. Этот принцип позволяет описать волновые явления в терминах корпускулярных представлений ценой отказа от нек-рых классич. понятий, взятых из макроскопич. опытов и неприменимых к микропроцессам в квантовой области. Тем самым принцип суперпозиции состояний лежит в основе физ. содержания К. м. и определяет её матем. аппарат. К необходимости указанного принципа и его формулировке можно прийти, рассматривая конкретные примеры волновых процессов и попытку их интерпретации в терминах корпускулярных представлений. Рассмотрим 2 таких примера.

1. **Отражение и преломление волн.** Пусть волна $\psi_0 = A_0 \exp(-i\omega t + ik_0 r)$ падает на границу двух сред, в результате чего возникает отражённая $[\psi_1 = A_1 \exp(-i\omega t + ik_1 r)]$ и преломлённая $[\psi_2 = A_2 \times \exp(-i\omega t + ik_2 r)]$ волны (рис. 2) (ω — частота волны, k — соответствующие волновые векторы, A — амплитуда).

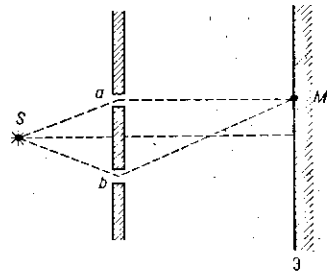


Рис. 1.