

§ 5. Принцип причинности в квантовой механике

Мы видели в предыдущем параграфе, что понятия классической физики применимы к микрочастицам лишь в известных пределах. Возникает естественный вопрос: почему мы вообще можем и должны описывать движение микрочастиц с помощью терминов классической физики? Необходимость введения классических понятий в квантовую механику связана со следующим важным обстоятельством: выяснение свойств и законов движения любых микрообъектов возможно только путем приведения их во взаимодействие с макроскопическими телами. Макроскопическое тело, взаимодействующее с микрочастицами, носит название прибора. Процесс взаимодействия между прибором и микрочастицей называется измерением.

Разумеется, прибор в этом смысле слова не обязательно является устройством для регистрации свойств микрочастиц, изготовленным искусственно. Прибор есть всякое тело, могущее изменять свое состояние в результате взаимодействия с микрообъектами и с достаточной степенью точности описываемое законами классической физики. Процесс взаимодействия прибора с микрочастицей — измерение — является объективным процессом, протекающим в пространстве и времени. Ясно, однако, что, поскольку всякое научное знание может основываться только на факте и характере указанного взаимодействия, все характеристики микрочастиц должны быть непосредственно связаны со свойствами их взаимодействия с макроскопическими телами. Это и означает, что описание микрочастицы должно обязательно включать, хотя бы частично, понятия классической физики. Разумеется, могут также существовать и такие характеристики и свойства микрочастиц, которые проявляются во взаимодействиях с приборами, но не имеют никакого классического аналога. Мы увидим, например, в гл. VIII, что такой характеристикой микрочастиц является их спин.

Взаимодействие между микрочастицами и макроскопическими телами, разумеется, существенно отличается от взаимодействия макроскопических тел между собой. Именно, при взаимодействии между одним макроскопическим телом и другим, играющим роль прибора, всегда можно считать обратное воздействие прибора на тело как угодно малым или, хотя бы, точно учесть его. Поэтому говорят, что воздействие прибора не изменяет состояние макроскопического объекта.

Иначе дело обстоит при взаимодействии физических объектов разной природы — микрочастицы и макроскопического тела — прибора. Здесь принципиально невозможно считать воздействие прибора на микрочастицу малым и несущественным. Рассмотрим один простой пример. Предположим, что совокуп-

ность электронов последовательно пропускается через щель в некотором экране. Экран со щелью является макроскопическим телом — прибором, измеряющим y -ю координату электрона с точностью Δy , где Δy — ширина щели.

Состояние всех электронов до взаимодействия было одним и тем же. Пусть, например, на прибор падают электроны с определенной направлением импульса p вдоль оси x . При этом $p_y = 0$. Состояние прибора до взаимодействия также является заданным, но заданным макроскопическим образом. В процессе взаимодействия прибора с электроном последний локализуется в области Δy , определяемой размерами отверстия в экране. При этом состояние электрона существенно изменяется. Из состояния с определенной компонентой импульса $p_y = 0$ электрон переходит в состояние, в котором компонента импульса p_y имеет значение, лежащее в интервале $\Delta p_y \sim \frac{\hbar}{\Delta y}$. Действительно, как

мы знаем, при прохождении электронов через щель возникает дифракция и у электронов появляется слагающая импульса по оси y . Если последовательно пропускать электроны и измерять значения их компоненты импульса p_y , то мы будем получать всевозможные значения p_y , лежащие в интервале Δp_y .

Мы видим, таким образом, что воздействие прибора на электрон изменяет состояние электрона и при этом принципиально не может быть сделано малым. Хотя до измерения микрообъект и прибор находились в определенном состоянии, результат взаимодействия с прибором не является однозначным: мы получаем состояние с неопределенным значением компоненты импульса p_y . Мы можем лишь найти вероятность того или иного значения этой величины.

В результате проведения последовательной, как угодно большой, серии измерений мы получим не более точное значение p_y , а лишь более точное выражение для распределения вероятностей различных значений этой величины. Если микрообъект находился в заданных внешних условиях, то невозможно, тем не менее, точно предсказать результат измерения. Можно говорить лишь о вероятностном распределении результатов измерения. Это связано не с недостаточностью и пороками теории, но с самой природой микрочастиц. Отсюда следует, что принцип механического детерминизма не характеризует свойства микрочастиц.

Заданное начальное значение некоторой величины и определенный закон взаимодействия не определяют однозначно значение этой измеряемой величины для микрочастицы в последующие моменты времени. Таким образом, поведение отдельной микрочастицы, а не только их совокупности, определяется закономерностями статистического типа. Закон причинности для

микрочастицы приобретает следующий характер: пусть известно состояние частицы в начальный момент времени $t = 0$. Это означает, что известна ее волновая функция $\psi(\mathbf{r}, 0)$. Если известны все испытываемые микрочастицей взаимодействия, то, как мы увидим ниже (см. § 6), можно однозначно определить ее волновую функцию в последующие моменты времени $t > 0$.

Из смысла волновой функции вытекает, что тем самым мы можем предсказать вероятности (см. § 21) того, что характеризующие частицу величины — координата, импульс, энергия и другие, будут иметь то или иное значение в любой момент времени $t > 0$.

Сформулированный, таким образом, принцип причинности в квантовой механике имеет значительно более общий характер, чем динамическая закономерность (лапласовский детерминизм) классической механики ¹⁾.

¹⁾ Более подробное рассмотрение вопросов, затронутых в настоящем параграфе, читатель найдет в работах В. А. Фока «Об интерпретации квантовой механики», Сборник «Философские вопросы современной физики», Изд-во АН СССР, 1959 и «Квантовая физика и философские проблемы». Сборник «Ленинизм и современное естествознание», «Мысль», 1969 г. См. также Н. Бор, Атомная физика и человеческое познание, ИЛ, 1961.