

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ*)****В. А. Фок**

Характерной чертой современной физики является то, что она все глубже и глубже проникает в закономерности мира атомов и других мельчайших частиц материи. Закономерности эти требуют не только новой экспериментальной техники для своего обнаружения, но и новых понятий для своей формулировки. Для описания атомных явлений нужны новые методы, отличные от тех, какие применяются при изучении более крупных объектов внешнего мира. Новая постановка задачи описания атомных объектов имеет большое принципиальное значение, поскольку связанные с ней понятия могут найти применение и в других областях естествознания. На почве современной физики возникают, таким образом, некоторые вопросы философского характера, на которые мы хотели бы здесь обратить внимание.

Как не раз бывало в истории физики, математическая часть теории, вместе с некоторыми формальными рецептами, связывающими теорию с опытом, была построена раньше, чем были выработаны соответствующие физические понятия. Аппарат нерелятивистской квантовой механики, не содержащий никаких внутренних противоречий, успешно применялся к решению конкретных задач атомной физики, но физическое толкование его оставалось долгое время неясным. Все острее и острее стала ощущаться необходимость надлежащей физической интерпретации готового аппарата квантовой механики.

§ 1. ПОПЫТКИ КЛАССИЧЕСКОГО ТОЛКОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ И ПРИЧИНЫ ИХ НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТИ

Первоначально выдвинутая де Бройлем и Шредингером точка зрения состояла в том, что в квантовой механике волновая функция представляет некоторое распределенное в пространстве поле, подобное электромагнитному и другим известным ранее полям; стационарным состояниям атомов соответствуют, по Шредингеру, собственные колебания этого поля. Немного позже де Бройль выдвинул несколько иную точку зрения, согласно которой распределенное в пространстве поле является носителем частиц и определяет их движение в классическом смысле (волна-пилот, или, точнее, волна-лоцман). Эта точка зрения была вскоре оставлена де Бройлем, но впоследствии, через 25 лет, он к ней вернулся. К ней примыкают также работы Бома, который пытался сохранить понятие траектории и согласовать его с формулами обычной квантовой механики путем введения специально подбираемого в каждом отдельном

*) Английский текст настоящей статьи печатается в Чехословацком физическом журнале.

случае «квантового потенциала». Некоторым видоизменением точки зрения «волны-пилота» являются попытки Вижье применить к данному случаю идеи Эйнштейна о частице как особенной точке поля; впрочем, попытки эти не подкреплены сколько-нибудь убедительными математическими аргументами.

Если в первые годы развития волновой механики и было естественно пытаться толковать ее в классическом духе, то этого никак нельзя сказать о попытках де Бройля и его последователей, предпринятых ими за последние годы. Общей чертой этих попыток является их крайняя искусственность и полное отсутствие какой-либо эвристической ценности: ни одной новой задачи авторы этих попыток решить и не пытались. Напротив того, рассуждения их подгонялись (притом не убедительно) под заранее известный из квантовой механики результат. Таким образом, критерий практики решительно говорит против этого научного направления.

Каковы же те особенности квантовой механики, которые не позволяют ее толковать в классическом духе и видеть в волновой функции распределенное в пространстве поле, подобное классическому? Оставляя пока в стороне более глубокие основания гносеологического порядка, можно указать ряд формальных причин, препятствующих такому толкованию. Во-первых, в случае сложной системы, состоящей из многих частиц, волновая функция зависит не от трех координат, а от всех степеней свободы системы. Это есть функция точки в многомерном конфигурационном пространстве, а не в реальном физическом пространстве. Во-вторых, в квантовой механике допустимы канонические преобразования волновой функции типа преобразования Фурье, причем все получаемые таким путем преобразованные волновые функции описывают одно и то же состояние и вполне равноправны с первоначальной волновой функцией, выраженной через координаты; физический смысл имеют не только квадрат модуля первоначальной волновой функции, но и квадраты модулей преобразованных функций. В-третьих, задача многих тел (в частности, задача многих одинаковых частиц) имеет в квантовой механике особенности, не позволяющие сводить ее к задаче об отдельных частицах, ни тем более формулировать ее как задачу о поле в обычном трехмерном пространстве. Так, если сложная система имеет волновую функцию, общую для всех частиц, то отдельным частицам особых волновых функций приписывать нельзя; кроме того, в случае одинаковых частиц, подчиняющихся принципу Паули, существует особого рода квантовое взаимодействие между частицами, не сводимое к силовому взаимодействию в обычном пространстве. Иного рода взаимодействие, также несводимое к классическому, существует между одинаковыми частицами, если они описываются симметричными волновыми функциями. Наконец, не только в случае многих частиц, но и для отдельной частицы волновая функция существует не всегда, и не всегда она меняется по уравнению Шредингера; при известных условиях она просто зачеркивается и заменяется другой (так называемая редукция волнового пакета, см. § 11). Очевидно, что такого рода «мгновенное изменение» не согласуется с понятием поля.

Указанные особенности квантовой механики заранее обрекают на неудачу всякие попытки толковать волновую функцию в классическом духе.

Связь квантовой механики с классической — в другом, а именно в принципе соответствия, согласно которому существует предельный случай, когда те формулы квантовой механики, которые непосредственно сравниваются с опытом, переходят в классические. В этом предельном случае характерные для данной механической системы величины, имею-

щие размерность действия, можно считать большими по сравнению с «квантом действия» h^*). Принцип соответствия был установлен Бором в самом начале развития квантовой механики и сыграл в ее развитии большую роль.

§ 2. ИДЕИ НИЛЬСА БОРА И ЕГО ТЕРМИНОЛОГИЯ

Истинный смысл волновой функции и других понятий квантовой механики стал выясняться понемногу, начиная с работ Макса Борна о статистическом толковании квантовой механики. Выяснилось фундаментальное значение понятия вероятности, хотя первоначально не было ясно, о вероятности чего именно идет речь. Существенную роль в выяснении этого вопроса, как и вообще в интерпретации квантовой механики, сыграли идеи Нильса Бора о том, что квантово-механическое описание свойств атомного объекта должно сочетаться с классическим описанием средств наблюдения (экспериментальной установки).

В своих работах, посвященных принципиальным вопросам квантовой механики, Н. Бор особенно подчеркивает необходимость рассматривать весь эксперимент в целом и доводить описание эксперимента до показаний приборов. Сама по себе эта мысль верна, в том смысле, что в принципе должно быть возможно довести описание до показаний приборов. Но излишнее подчеркивание роли приборов дает повод упрекнуть Бора в том, что он недооценивает необходимость абстракции и как бы забывает о том, что предметом изучения являются свойства микрообъекта, а не показания приборов. Свойства же атомных объектов такие, как заряд, масса, спин, вид оператора энергии и закона взаимодействия частиц с внешним полем, с одной стороны совершенно объективны и могут быть абстрагированы от средств наблюдения, а с другой стороны эти свойства требуют для своей формулировки новых, квантово-механических, понятий. В особенности это относится к формулировке задачи многих тел.

Поводом к недоразумениям является и применяемая Бором терминология. Так, он говорит о «неконтролируемом взаимодействии», хотя взаимодействие, рассматриваемое как физический процесс, всегда контролируемо. Бору приходится говорить о «неконтролируемости» только чтобы покрыть неувязку, возникающую при пользовании классическими понятиями вне их области применимости. Далее, можно указать на делаемое Бором противопоставление «принципа дополнительности» — «принципу причинности». При буквальном понимании этих терминов такое противопоставление, безусловно, неправильно. Но под «принципом дополнительности» Бор понимает не только соотношения Гейзенберга, но и вообще все характерные отличия квантовой механики от классической. Под принципом же причинности Бор понимает причинность в узком механическом смысле — в смысле детерминизма лапласовского типа. Таким образом, фактически Бор имеет в виду несовместность квантовой механики с детерминизмом лапласовского типа, но не с принципом причинности в более общем смысле. А тогда с ним можно согласиться.

Принцип причинности в общем смысле следует понимать как утверждение о существовании законов природы и, в частности, тех, которые

*) Для материальной точки в независимом от времени силовом поле можно взять в качестве такой характерной величины $\frac{mv^3}{w}$, где m — масса частицы, v — ее скорость и w — ускорение. Так как речь идет об оценке порядка величины, то вместо v и w можно взять их средние значения (в том или ином смысле). Если понимать под h постоянную Планка, деленную на 2π , то критерий применимости классической механики к движению материальной точки напишется $mv^3 \gg h w$ (см. В. Фок, Уч. зап. ЛГУ, сер. физ., т. 3, стр. 5—9, 1937).

связаны с общими свойствами пространства и времени (конечная скорость распространения действий, невозможность воздействовать на прошлое). При таком понимании квантовая механика не только не противоречит принципу причинности, но она дает ему новое выражение и расширяет его применение на вероятностные законы.

Как я имел возможность убедиться из личных бесед с Нильсом Бором, на самом деле его позиция гораздо ближе к материалистической, чем это может показаться из чтения его работ по принципиальным вопросам квантовой механики. Прежде всего, Бор считает, что надо брать природу такой, какова она есть. Он решительно выражает свое несогласие с позитивистской точкой зрения и полностью признает объективность свойств атомных объектов. Что касается терминологии, то Бор готов отказаться от применения термина «неконтролируемое взаимодействие», который он считает неудачным. Бор соглашается также с тем, что общий принцип причинности следует отличать от детерминизма лапласовского типа и что только такой детерминизм противоречит закономерностям атомной физики.

§ 3. ОТРИЦАНИЕ НОВЫХ ИДЕЙ КАК РЕАКЦИЯ НА ПОЗИТИВИСТСКОЕ ИХ ТОЛКОВАНИЕ

Новизна идей Бора и трудно понятное их изложение, использующее не всегда удачную терминологию, дали повод к многим недоразумениям и неправильным толкованиям их в духе позитивизма. (Следует заметить, что именно это позитивистское толкование новых идей и понимается обычно под термином «копенгагенская школа».) Наиболее крайнюю позитивистскую позицию занимает П. Иордан; другие, более серьезные, физики, как-то М. Борн, В. Гейзенберг и др., одно время сильно увлекались позитивистскими взглядами, но теперь постепенно от них отходят. Так, в одной из своих последних работ, напечатанной в сборнике, посвященном 70-летию Нильса Бора, В. Гейзенберг признает уже объективность понятия квантового состояния.

Толкование идей Бора в духе позитивизма, проводимое некоторыми его последователями, естественно, породило реакцию, отрицающую во имя материализма, новые идеи (де Бройль, Бом, Вигье и др.). Основным побуждением названных ученых, заставляющим их занимать позицию непризнания обычного вероятностного толкования квантовой механики, является ложное убеждение, будто бы вероятностное толкование означает отказ от объективности микромира и его законов, т. е. отказ от основного положения материализма. По мнению последователей школы де Бройля, только детерминизм классического типа совместим с материализмом. Свою точку зрения они называют поэтому детерминистической.

Узость, а потому и неправильность такого понимания материализма представляется нам несомненной. Навязывать природе именно детерминистскую форму закономерностей, отказываясь, наперекор очевидности, признать более общую вероятностную их форму,— значит исходить из каких-то догматов, а не из свойств самой природы. Такая позиция является философски неправильной. Поэтому не следует удивляться неудаче всех попыток «детерминистского» толкования квантовой механики — неудаче, формальные причины которой мы разбирали в § 1. Вместе с тем, упорное возобновление такого рода попыток и интерес, проявляемый к ним со стороны неспециалистов и обусловленный тем, что они предпринимаются во имя материализма,— все это делает настоятельно необходимым более глубокий анализ новых идей квантовой механики с точки зре-

ния материалистической философии. Такой анализ, несомненно, должен привести к выводу, что новые идеи значительно расширяют круг понятий, с которыми оперирует материалистическая философия, но несколько не противоречат ее духу.

§ 4. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ К СРЕДСТВАМ НАБЛЮДЕНИЯ

Попробуем указать основные особенности квантовой механики, отличающие ее от классической.

Свойства объектов всегда проявляются в их взаимодействии с другими объектами, в частности, со средствами наблюдения (приборами). Это справедливо как в классической, так и в квантовой физике. Но в классической физике можно было в гораздо большей степени отвлекаться от средств наблюдения, чем это возможно в квантовой физике. Это становится понятным, если вспомнить, что средства наблюдения — всегда «человеческого» масштаба, тогда как масштабы объектов, с которыми оперируют классическая физика, с одной стороны, и квантовая физика, с другой, совершенно различны: классические объекты, вообще говоря, не меньше средств наблюдения, а квантовые объекты — неизмеримо меньше.

В классической физике предполагается, что при достаточно остром пользовании средствами наблюдения они не могут заметным образом повлиять на изучаемый объект, а если и влияют, то на это влияние можно внести поправку. Поэтому там можно рассуждать так, как если бы средства наблюдения не играли никакой роли и говорить, например, о состоянии движения объекта безотносительно к средствам наблюдения, абсолютизируя тем самым понятие «состояние движения». Правда, элемент относительности остается и здесь, поскольку и в классической физике необходима ссылка на определенную систему отсчета; с развиваемой здесь точки зрения это можно толковать, как учет движения средств наблюдения. Но в квантовой физике необходимо учитывать не только движение средств наблюдения, но, в какой-то схематизированной форме, и их внутреннее устройство.

Таким образом, под классическим описанием можно разуметь описание, безотносительное к средствам наблюдения (если не считать учета их движения). Точность такого описания ограничена соотношениями неопределенности Гейзенберга. Такая точность достаточна для описания механических свойств более крупных предметов, но она становится недостаточной для описания объектов микромира. Не только точность в количественном смысле, но и формулировка качественно новых свойств микрообъектов требует новых методов описания, и прежде всего необходимо внести в их описание новый элемент относительности — относительность к средствам наблюдения.

Совершенно ясно, что относительность не мешает объективности. Уже в классической физике даже такие простейшие понятия, как траектория материальной точки, будучи вполне объективными, являются в то же время относительными, так как получают определенный смысл только в определенной системе отсчета. Подобно этому, в квантовой физике относительность к средствам наблюдения только уточняет физические понятия и позволяет вводить новые, а отнюдь не лишает их объективности. Объекты микромира являются столь же реальными и их свойства столь же объективными, как и свойства объектов, изучаемых классической физикой.

§ 5. ПОНЯТИЕ ПРИБОРА

В предыдущем параграфе мы указали на некоторые общие выводы из того простого, но фундаментального факта, что изучение мира атомов возможно только через посредство более крупных предметов, которые

и служат средствами наблюдения (приборами). Так как понятие прибора играет большую роль в наших рассуждениях, нам необходимо его уточнить. Мы можем назвать «прибором» такое устройство, которое, с одной стороны, может взаимодействовать с микрообъектом и реагировать на его воздействия, а с другой стороны, допускает с точностью, достаточной для данной цели, классическое описание (и, следовательно, не нуждается в дальнейших «средствах наблюдения»). Следует сразу же заметить, что в этом определении прибора совершенно несущественно, сделан ли «прибор» человеческими руками или он представляет естественное, удобное для наблюдения, сочетание внешних условий, в которые помещен микрообъект. Важно лишь то, что эти условия, как и собственно средства наблюдения, должны описываться классически.

Понимая термин «прибор» в этом смысле, мы можем формулировать задачу квантово-механического описания микрообъекта следующим образом.

Все свойства микрообъекта, включая собственно квантовые, т. е. такие, для описания которых классическая механика недостаточна, должны характеризоваться способностью воздействия микрообъекта на приборы, допускающие классическое описание.

§ 6. СУЩНОСТЬ ДУАЛИЗМА ВОЛНА — ЧАСТИЦА

Для проявления разных свойств атомного объекта нужны разные внешние условия. Может оказаться, что разные типы внешних условий друг с другом несовместны. Рассмотрим, например, рассеяние электронов на кристалле. Регулярное расположение рассеивающих центров необходимо для получения отчетливой дифракционной картины, а тем самым и для выявления волновых свойств электрона. Но та же регулярность расположения является препятствием к точной пространственной локализации электрона, претерпевающего дифракцию: если не нарушать регулярности расположения центров, то невозможно установить, от которого из них отразился электрон. В литературе, особенно в работах Н. Бора и В. Гейзенберга, разобрано много других примеров, которые можно рассматривать как иллюстрацию несовместности внешних условий, необходимых для выявления волновых и корпускулярных свойств электрона.

Возможны и такие условия, когда волновые и корпускулярные свойства электрона проявляются одновременно, но тогда эти свойства выражаются не резко. Например, для электрона, связанного в атоме, волновая функция имеет характер стоячей волны с амплитудой, быстро убывающей при удалении от центра атома. Это как раз и значит, что электрон приблизительно локализован (корпускулярное свойство), но в то же время проявляет отчасти волновые свойства.

Таким образом, у атомных объектов в одних условиях выступают на первый план волновые свойства, а в других — корпускулярные свойства; возможны и такие условия, когда те и другие свойства выступают хотя и не резко, но одновременно. Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя в зависимости от внешних условий либо как волна, либо как частица, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, присущих атомному объекту, и состоит дуализм волна—частица. Всякое иное, более буквальное понимание этого дуализма в виде какой-нибудь модели—неправильно. В частности, предложенная де Бройлем и его школой модель частицы несомой волной или модель частицы, как особенной точки поля, абсолютно непригодны, как уже было указано в § 1.

Кроме того, необходимо помнить, что особенности квантовой механики (даже нерелятивистской) не исчерпываются дуализмом волна—частица. Такие свойства электронов, как спин и квантовая статистика (принцип Паули) не сводятся к этому дуализму, но и они могут быть сформулированы при помощи аппарата квантовой механики. Фундаментальный же характер этих свойств явствует хотя бы из того, что именно они определяют структуру электронных оболочек атомов, а тем самым и их оптические и химические свойства.

Аппарат квантовой механики, правильно отображающий ряд фундаментальных свойств атомных объектов, находит себе рациональное истолкование только на основе расширенной постановки задачи описания микрообъектов, а именно такой, в которой их поведение не отрывается от их взаимодействия со средствами наблюдения.

§ 7. ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТОМ И ПРИБОРОМ

Говоря о взаимодействии между микрообъектом и прибором, мы должны различать две стороны дела: во-первых, взаимодействие как физический процесс, и, во-вторых, взаимодействие как стык между частью системы, описываемой квантово-механически (микрообъект) и частью, описываемой классически. В первом случае слово «взаимодействие» употребляется в более буквальном смысле, а во втором случае — в более условном смысле. Нас интересует здесь, главным образом, вторая сторона дела, так как самое понятие квантово-механического описания должно быть основано на анализе взаимодействия в этом втором смысле.

Каковы же особенности взаимодействия атомного объекта с классическим прибором?

При ответе на этот вопрос следует помнить, что как внешние условия, в которых находится объект, так и результат взаимодействия его с прибором должны быть описаны на языке классической физики. Из этих классических данных и надлежит делать заключение о квантовых характеристиках атомного объекта.

Даже если атомный объект находится в фиксированных внешних условиях, результат его взаимодействия с прибором в общем случае не является однозначным. Этот результат не может быть предсказан с достоверностью на основании предшествовавших наблюдений, как бы ни были точны эти последние. Определенной является только вероятность данного результата. Наиболее полным выражением результатов серии измерений будет не точное значение измеряемой величины, а распределение вероятностей для нее.

Разумеется, может оказаться, что вероятность одного значения измеряемой величины (или одного узкого интервала значений) настолько преобладает над вероятностью остальных значений, что практически можно приписать этой величине именно данное значение. В этом случае возможно точное или почти точное предсказание результата измерения. Однако этот случай является всего лишь исключением или, вернее, частным случаем. Характерным для того положения вещей, какое имеет место в квантовой механике, является общий случай, когда измерения приводят к некоторому распределению вероятностей.

Тот факт, что в общем случае никакое уточнение предшествовавших наблюдений не приводит к однозначному предсказанию результата измерения, имеет большое принципиальное значение. Этот факт следует рассматривать как выражение некоторого закона природы, связанного со свойствами атомных объектов, в частности, с присущим им корпускулярно-волновым дуализмом. Признание этого факта означает отказ от клас-

сического детерминизма и требует новых форм выражения принципа причинности.

Само по себе выражение результатов серии измерений в виде распределения вероятностей не чуждо и классической физике. Но там вероятности рассматривались как «посторонний элемент», как результат неучета некоторых неизвестных обстоятельств и усреднения по неизвестным данным. В классической физике всегда предполагалась принципиальная возможность заранее отсортировать наблюдаемые объекты так, чтобы затем в результате наблюдения получалось, для измеряемой величины, уже только одно значение, а не целое распределение вероятностей. Напротив того, в квантовой физике подобная отсортировка атомных объектов невозможна, так как по самому свойству атомных объектов измеряемые величины могут, в данных условиях, не иметь определенных значений. В квантовой физике понятие вероятности есть понятие первичное, и оно играет там фундаментальную роль. С ним связано и квантово-механическое понятие состояния объекта.

§ 8. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Для изучения свойств атомных объектов наиболее важной является такая постановка опыта, при которой можно различить в нем три стадии: приготовление объекта, поведение объекта в фиксированных внешних условиях и собственно измерение. Сообразно этому в приборе можно различить приготовляющую часть, рабочую часть и регистрирующую часть. Например, при наблюдении диффракции электронов на кристалле приготовляющей частью является источник монохроматического пучка электронов, а также диафрагмы и другие устройства, поставленные перед кристаллом, рабочей частью является самый кристалл, а регистрирующей частью — фотопластинка или счетчик.

При такой постановке опыта можно варьировать заключительную стадию (измерение), оставляя неизменными первые две стадии. Физическое толкование аппарата квантовой механики удобнее всего проследить именно на такой постановке опыта.

Варьируя заключительную стадию опыта, можно производить измерения различных величин (например, энергии частицы, или ее скорости, или положения в пространстве), исходя из одного и того же начального состояния объекта. Каждой величине соответствует своя серия измерений, результаты которой выражаются в виде распределения вероятностей для этой величины.

Все указанные распределения вероятностей могут быть выражены параметрически через одну и ту же волновую функцию, которая не зависит от заключительной стадии опыта и тем самым является объективной характеристикой состояния объекта непосредственно перед заключительной стадией.

Описываемое волновой функцией состояние объекта является объективным в том смысле, что оно представляет объективную (независящую от наблюдателя) характеристику потенциальных возможностей того или иного результата взаимодействия атомного объекта с прибором. В этом же смысле оно относится именно к данному, единичному, объекту. Но это объективное состояние не является еще действительным, в том смысле, что для объекта в данном состоянии указанные потенциальные возможности еще не осуществились. Переход от потенциально возможного к осуществившемуся, к действительному, происходит в заключительной стадии опыта. Для статистической характеристики этого перехода, т. е. для экспериментального получения соответствующего распределения вероятностей, необходима уже серия измерений, распределение вероятностей полу-

чается после статистической обработки этой серии измерений. Это экспериментальное распределение вероятностей может быть затем сравнено с теоретическим, получаемым из волновой функции.

Следует заметить, что, хотя непосредственный результат заключительной стадии опыта формулируется классически, из него можно вывести, на основе теории, также и значение тех величин, которые являются специфически квантовыми, как-то: спина частицы, уровня энергии атомной системы и т. п. Таким образом, из статистической обработки серия измерений могут быть получены распределения вероятностей не только для величин, аналогичных классическим, но и для специфически квантовых величин.

§ 9. ПОНЯТИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО И ОСУЩЕСТВИВШЕГОСЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ

В классической детерминистической физике вопрос о переходе от потенциально возможного к осуществившемуся не возникает вовсе, поскольку там постулируется однозначная предопределенность хода событий, в силу которой все потенциально возможное и осуществляется, так что нет необходимости отличать одно от другого. Практическая же невозможность предсказывать все события относится там за счет неполноты начальных данных.

Такая детерминистическая точка зрения отнюдь не представляет логической необходимости, а обусловлена историческими причинами, прежде всего успехами небесной механики в XVIII и XIX веках. Достигнутая астрономами высокая точность в предсказании движения небесных тел породила увлечение механистическим детерминизмом (лапласовский детерминизм). В результате этого увлечения детерминистическое мировоззрение распространилось на всю физику (за исключением, быть может, термодинамики) и стало претендовать на то, чтобы называться единственно научным. Успехи электромагнитной теории света, выдвинувшей понятие поля как физической реальности, хотя и показали ограниченность механистической точки зрения, но не подорвали веры в детерминизм.

Правда, опыт повседневной жизни, в которой приходится строго отличать возможность от ее осуществления, говорил против него; но этот опыт отвергался как «ненаучный». В области физики «ненадежной» в смысле детерминизма оставалась термодинамика, которую так и не удалось с ним согласовать. Но настоящее крушение детерминизма произошло вместе с развитием квантовой механики, начиная с работы А. Эйнштейна по теории излучения (1916 г.), где он впервые ввел в физику априорные вероятности *). Правильная интерпретация квантово-механического описания свойств атомных объектов совершенно исключает детерминистическую точку зрения. Квантовая механика восстанавливает в правах диктуемое жизненным опытом отличие потенциальной возможности от ее осуществления.

§ 10. ВЕРОЯТНОСТЬ И СТАТИСТИКА В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

Вероятностный характер квантовой механики не подлежит сомнению, да он никем почти и не оспаривается. Но вопросы о том, к чему именно относятся эти вероятности, в каком статистическом коллективе они берутся и представляет ли квантовая механика теорию отдельных

*) Любопытно, что Эйнштейн, который много сделал для теории квантов в начальный период ее развития и первый ввел в физику априорные вероятности, стал впоследствии противником квантовой механики и сторонником детерминизма; он не раз полусерьезно говорил, что никак не может поверить, чтобы господь бог играл в кости (dass der liebe Gott würfelt).

атомных объектов или же только теорию собраний таких объектов — эти вопросы продолжают дискутироваться, хотя в настоящее время на них можно дать вполне однозначный ответ.

В первые годы развития квантовой механики, в ранних попытках ее статистического толкования, физики еще не отрешились от представления об электроны, как о классической материальной точке. Об электроны говорилось так, как если бы это была частица с определенными значениями координаты и скорости, но неизвестно, какими именно. Соотношения Гейзенберга толковались, как соотношения неточностей, а не соотношения неопределенностей. Квадрат модуля волновой функции толковался как плотность вероятности частице иметь данные координаты (как если бы координаты всегда были определенными). Аналогично толковался квадрат модуля волновой функции в пространстве импульсов, причем обе вероятности (в пространстве координат и в пространстве импульсов) рассматривались одновременно, как если бы значения координат и импульсов были совместными. Выражаемая соотношениями Гейзенберга фактическая невозможность их совместно измерить представлялась, при таком рассмотрении, как какой-то парадокс или каприз природы, в силу которого, будто бы, не все существующее познаваемо.

Все эти затруднения отпадают, если полностью признать двойственную корпускулярно-волновую природу электрона, выяснить сущность этого дуализма и понять, к чему относятся рассматриваемые в квантовой механике вероятности. Чтобы не повторять того, что было уже разъяснено выше, напомним только, что получаемые из волновой функции вероятности для разных величин относятся к разным постановкам опыта и что они характеризуют не поведение частицы «самой по себе», а ее воздействие на прибор определенного типа.

Вопрос о том, в каком статистическом коллективе берутся вероятности, также был предметом дискуссии. Одним из первых поставил этот вопрос акад. Л. И. Мандельштам (соч., т. 5, стр. 356), но он дал на него неправильный ответ. Мандельштам говорит о «микромеханическом коллективе, к которому относится волновая функция», и называет его также «электронным коллективом», подчеркивая тем самым, что он имеет в виду собрание определенным образом приготовленных микрообъектов. В этих исходных положениях Мандельштама имеются неточности, которые связаны с недостаточно четким определением статистического коллектива. Попытаемся их исправить и дать более четкое определение понятию коллектива.

Представим себе неограниченную серию элементов, обладающих различными признаками, по которым можно сортировать эти элементы и наблюдать частоту появления элемента с данным признаком. Если для появления элемента с каждым данным признаком существует определенная вероятность *), то рассматриваемая серия элементов представляет статистический коллектив.

Какой же статистический коллектив можно рассматривать в квантовой механике? Очевидно, только коллектив из элементов, описываемых классически, так как только таким элементам можно всегда присписать определенные значения параметров, по которым производится сортировка. По этой причине квантовый объект не может быть элементом статистического коллектива, даже если он находится в таких условиях, что

*) Существование определенной вероятности представляет гипотезу, которая вводится либо априори (например, из соображений симметрии), либо на основании постоянства тех внешних условий, при которых происходит физическая реализация рассматриваемой серии элементов. Гипотеза о существовании вероятности равносильна гипотезе о том, что данная серия элементов представляет статистический коллектив.

ему можно сопоставить волновую функцию. Таким образом, о «микромеханическом» и «электронном» коллективе в смысле Мандельштама говорить нельзя.

Элементами статистических коллективов, рассматриваемых в квантовой механике, являются не самые микрообъекты, а результаты опытов над ними, причем определенная постановка опыта соответствует одному определенному коллективу. Поскольку же получаемые из волновой функции распределения вероятностей для разных величин относятся к разным постановкам опыта, они относятся и к разным коллективам. Таким образом, волновая функция ни к какому определенному статистическому коллективу относиться не может.

Сказанное можно иллюстрировать следующей схемой

	E	p	x	...
ψ_1				
ψ_2				
ψ_3				
$\vdots$				

Каждой клетке этой схемы соответствует определенный статистический коллектив со своим распределением вероятностей. В одной строке помещены коллективы, получаемые при измерении разных величин E , p , x , исходя из одного и того же начального состояния. В одном столбце помещены коллективы, получаемые при измерении данной величины, исходя из разных состояний ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 ...

Более глубокая причина того, что волновой функции нельзя сопоставить никакого статистического коллектива, состоит в том, что понятие волновой функции относится к потенциально возможному (к не произведенным еще опытам), тогда как понятие статистического коллектива относится к осуществившемуся (к результатам уже произведенных опытов).

Попытки отнести волновую функцию к собранию микрообъектов предпринимались разными авторами, причем высказывалось мнение, что и вся квантовая механика есть теория таких собраний микрообъектов (ансамблей), тогда как теории отдельных, индивидуальных микрообъектов, будто бы еще не существует. Такое мнение основано прежде всего на непонимании того, что такое вероятность. Вероятность того или иного поведения объекта в данных внешних условиях определяется внутренними свойствами данного индивидуального объекта и этими внешними условиями; это есть численная оценка потенциальных возможностей того или иного поведения объекта. Проявляется же эта вероятность в относительном числе осуществившихся случаев данного поведения объекта; это число и является ее мерой. Таким образом, вероятность относится к отдельному объекту и характеризует его потенциальные возможности; вместе с тем, для экспериментального определения ее численного значения необходима статистика осуществления этих возможностей, т. е. многократное повторение опыта. Отсюда ясно, что вероятностный характер теории не исключает того, что она относится к отдельному объекту. Это справедливо и для квантовой механики.

§ 11. ФОРМЫ ВЫРАЖЕНИЯ ПРИНЦИПА ПРИЧИННОСТИ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

Квантово-механическое понятие состояния позволяет формулировать принцип причинности применительно к атомным явлениям. Согласно квантовой механике, волновая функция атомной системы удовлетворяет волновому уравнению, которое однозначно определяет ее по ее начальному значению (уравнение Шредингера). Тем самым определяется и закон изменения вероятностей, выражаемых через волновую функцию. Волновое уравнение позволяет решать нестационарные задачи квантовой механики, соответствующие опытам, различные стадии которых разделены во времени. Типичным примером таких задач является задача о распаде почти стационарного состояния атомной системы, в частности задача об ионизации атома электрическим полем; в принципе сюда относятся и задача о радиоактивном распаде атомного ядра.

В современной физике принцип причинности связывается не только с невозможностью воздействия на прошлое, но и с существованием предельной скорости распространения действий, равной скорости света в свободном пространстве. Оба эти требования соблюдены и в квантовой механике. Правда, в нерелятивистской ее форме (в теории Шредингера) существование предельной скорости учитывается лишь косвенно, в форме дополнительного требования, чтобы рассматриваемые скорости были малы по сравнению с предельной. Но во всех релятивистских обобщениях квантовой механики существование предельной скорости учитывается автоматически. Вытекающие из принципа причинности соотношения, в частности соотношения для амплитуд рассеяния, играют большую роль в квантовой теории поля.

В связи с существованием предельной скорости распространения действий следует рассмотреть вопрос о так называемой «редукции волнового пакета». Под этим разумеется следующее. Если предположить, что заключительная стадия одного опыта является в то же время начальной стадией другого, то волновая функция, дававшая распределение вероятностей результатов этого опыта, должна быть заменена другой, соответствующей фактически полученному результату. Такая замена происходит внезапно; изменение волновой функции происходит не по уравнению Шредингера. Может показаться (и этот вопрос действительно дебатировался), что внезапное изменение волновой функции находится в противоречии с конечной скоростью распространения действий. Но легко видеть, что здесь мы имеем дело не с распространением какого-либо действия, а с изменением постановки вопроса о вероятностях. В произведенном опыте осуществился один из потенциально возможных результатов, предусмотренных первоначальной волновой функцией. Изменение постановки вопроса о вероятностях и состоит в учете осуществившегося результата, т. е. в учете новых данных. А новым данным соответствует и новая волновая функция.

Эти рассуждения показывают, насколько важно, при толковании квантовой механики, отличать потенциально возможное от осуществившегося. Они показывают также с полной ясностью, что волновая функция не есть какое-либо действительное поле и что внезапное ее изменение не представляет собою какого-либо физического процесса, подобного изменению поля. С производством опыта действительно связан физический процесс, но он отражается на волновой функции не прямо, а в силу вызываемой им необходимости переформулировать задачу о вероятностях.

Квантово-механическое понимание причинности значительно отличается от классического, хотя и представляет естественное его обобщение.

ние. Классический (лапласовский) детерминизм, о котором мы говорили уже в § 9, можно определить как точку зрения, согласно которой усовершенствование методов наблюдения, вместе с уточнением формулировки законов природы и их математической обработки, может, в принципе, позволить однозначное предсказание всего последующего хода событий. Изучение атомного мира показывает, что классический детерминизм не только не соответствует законам природы, но даже не позволяет их с достаточной точностью формулировать. Это несоответствие имеет место даже в случае простейших элементарных процессов (квантовых переходов), так что дело тут совсем не в сложности явления, а в непригодности старых методов его описания. Существенные черты новых методов состоят, как мы видели, в вероятностном характере описания, в силу которого необходимо отличать потенциально возможное от осуществившегося, в учете относительности к средствам наблюдения и, наконец, в новом понимании принципа причинности, согласно которому этот принцип непосредственно относится к вероятностям, т. е. к потенциально возможному, а не к действительно осуществляющимся событиям.

§ 12. ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ, ПОСТАВЛЕННЫЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКОЙ

Развитие новых идей, внесенных атомной физикой, требует разработки ряда философских вопросов, в особенности вопросов, связанных с анализом акта познания. Вопросы эти возникают в связи с отмеченной выше невозможностью отвлечься при изучении атомных объектов от средств наблюдения, а также в связи с необходимостью рассматривать вероятность как фундаментальное понятие и отличать потенциально возможное от осуществившегося, с чем в свою очередь связана новая формулировка принципа причинности. Здесь нельзя обойтись изучением классического наследия и подбором цитат из классиков, а необходимо подходить к решению философских вопросов естествознания творчески. Необходимо творчески развивать диалектический материализм. При этом необходимо помнить, что идеи атомной физики действительно радикально новые и что отмахнуться от них, пытаясь свести дело к тем идеям, о которых мы имеем готовые суждения классиков, никак нельзя.

Нельзя также ссылаться на то, что понятия обычной квантовой механики не являются последним словом науки, или на то, что удовлетворительная квантовая теория поля еще не построена. Всякая теория, в том числе и квантовая механика, представляет лишь относительную истину, но это не дает основания для непризнания внесенных ею новых идей и понятий.

Физические понятия, несомненно, будут развиваться, но уже сейчас ясно, что это развитие пойдет в сторону дальнейшего отхода от классических представлений, а никак не в сторону возврата к ним. В частности, не имеют под собой никакой почвы высказываемые некоторыми физиками школы де Бройля надежды на возврат в какой-нибудь новой форме к классическому детерминизму. Тот, кто пытается во имя материализма отрицать новые идеи и реставрировать старые, оказывает материализму плохую услугу.

Философское обобщение новых идей, впервые возникших в атомной физике, может оказаться полезным также и для развития других областей науки, в которых могут возникнуть вопросы, аналогичные уже решенным в квантовой механике.

Достигнутое в квантовой механике разрешение противоречий между волновой и корпускулярной природой электрона, между вероятностью и причинностью, между квантовым описанием атомного объекта и классическим описанием прибора, наконец, между свойствами индивидуального объекта и их статистическими проявлениями, дает ряд ярких примеров практического применения диалектики к вопросам естествознания. Это остается фактом независимо от того, применялся ли диалектический метод сознательно или нет. Достижения квантовой механики должны явиться мощным стимулом для развития диалектического материализма. Включение новых идей в свою сокровищницу является первоочередной задачей материалистической философии.
