

А.А.Печенкин

Три классификации интерпретаций квантовой механики*

Название настоящей статьи — сколок названия известной брошюры М.А.Маркова¹. Мы лишь заменили слово «интерпретации» на словосочетание «классификации интерпретаций». Эта замена, однако, существенна: посредством нее учитывается современная ситуация в философии квантовой механики, ситуация, которая может быть названа постмодернистской². Копенгагенская интерпретация, выдвинутая Н.Бором, В.Гейзенбергом, В.Паули, поддержанная М.Борном, П.А.М.Дираком и многими другими крупными физиками, изложенная в авторитетнейших курсах — в томе «Теоретической физики» Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица и в двухтомнике А.Мессиа (ввиду этого ее также называют ортодоксальной), утратила свое монопольное положение. Эта интерпретация, ссылающаяся в стиле философского модернизма на субъекта (наблюдателя), производящего физические эксперименты и измерения, существует теперь в соседстве с множеством других интерпретаций, отчасти и до известных пределов возрождающих классический взгляд на мир. М.А.Марков в упоминавшейся брошюре аргументирует в конечном счете в пользу копенгагенской интерпретации. Настоящая статья исходит в оценке интерпретаций квантовой механики из принципа плюрализма.

* Статья представляет результаты исследования, поддержанного РФФИ. Проект № 99-06-80244.

Посвятив статью классификации интерпретаций квантовой механики, мы не претендуем на сколь-нибудь глубокий и тем более критический анализ тех интерпретаций, которые будут упомянуты ниже. Наша задача рассмотреть классификационные принципы, позволяющие систематизировать то многообразие интерпретаций, которое обозначено в физической и философской литературе. При этом будут заново изложены некоторые из идей и фактов, которые приводились в обзорных статьях и книгах³. Мы, однако, подчеркиваем не только множественность интерпретаций, но также множественность классификационных принципов, позволяющих упорядочить эти интерпретации. Мы показываем, что интерпретации квантовой механики не удастся построить «в линейку». Здесь перед нами более сложная «многомерная» картина.

Прежде чем приступить к построению классификаций интерпретаций, надо, однако, уточнить само понятие интерпретации. Во всяком случае в дальнейшем изложении будут упоминаться интерпретации двух уровней: инструменталистские интерпретации и интерпретации ради понимания. Первые интерпретации — это интерпретации математической схемы физической теории на множестве наблюдаемых фактов, т.е. результатов измерения. Инструменталистские интерпретации квантовой механики состоят из двух правил — алгоритма «квантизации», устанавливающего, каким образом вычисляются результаты измерения физической величины Q , и статистического алгоритма, устанавливающего, как вычислить вероятности этих результатов и их математическое ожидание (среднее).

Если инструменталистские интерпретации не идут дальше «бруто-фактов», то интерпретации ради понимания обозначают физические идеи, скрывающиеся за математическими формулами, показывают, как выглядит природа с точки зрения квантовой механики. Инструменталистские интерпретации могут быть названы интерпретациями «для пользователей»: их достаточно для решения стандартных задач. Когда же решаются нестандартные задачи, важно знать, в чем специфика квантово-механического взгляда на мир, какие модели допустимы в этой теории, каковы ее идеальные объекты, словом, требуется интерпретация ради понимания.

Различая инструменталистские интерпретации и интерпретации ради понимания, мы имеем в виду два уровня физического опыта — уровень наблюдаемых фактов (результатов измере-

ний и реальных экспериментов) и уровень мысленных экспериментов, которые хотя и не выдают численные значения физических величин, но позволяют понять, что происходит на «самом деле».

Проблема классификации интерпретаций квантовой механики встает прежде всего в отношении интерпретаций ради понимания, которые весьма разнообразны и представляют широкий спектр метафизических позиций. Вопрос об инструменталистской интерпретации квантовой механики не столь дискуссионен. Тем не менее было выдвинуто несколько таких интерпретаций, не слишком, впрочем, отличающихся друг от друга. Расхождения в отношении инструменталистской интерпретации носят, так сказать, вторичный характер. Они отражают различия в позициях, формулируемых на уровне интерпретаций ради понимания.

1. «СТАТИСТИЧЕСКИЕ» (АНСАМБЛЕВЫЕ) И «НЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ» ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Одна из основных классификаций делит интерпретации квантовой механики на два обширных класса: интерпретации, представляющие квантовую механику как в своей основе теорию одной индивидуальной физической системы (скажем, электрона), и интерпретации, при которых эта теория предстает как теория коллектива, ансамбля «приготовленных в некотором состоянии» физических систем (скажем, с помощью диафрагмы придается определенное направление электронам, испускаемым раскаленной нитью). Вторые интерпретации обычно называют «статистическими», или ансамблевыми (поскольку квантовая механика сама по себе статистическая теория, то используется также термин «чисто-статистические интерпретации»), первые, по контрасту, — «нестатистическими» (неансамблевыми).

Выше был использован термин «приготовление физических систем в некотором состоянии». Этот термин означает, что физические системы, над которыми проводятся какие-либо эксперименты и измерения, сперва помещаются в фиксированные макроусловия, позволяющие считать, что этим системам придано некоторое фиксированное состояние (представленное либо волновой функцией, либо матрицей плотности). Хотя понятие «приготовление состояния» было введено в 30-е гг. философами Генри Маргенау и Карлом Поппером, соответствующая идея

содержалась уже в «Чикагских лекциях» Вернера Гейзенберга (1928 г.), в том месте, где он рассмотрел разделенный на стадии «простейший мысленный эксперимент»⁴.

К интерпретациям, трактующим квантовую механику как в своей основе теорию одной физической системы, принадлежит копенгагенская (ортодоксальная) интерпретация. При этой интерпретации предполагается, что волновая функция дает в максимально возможной степени полное описание физической системы. Кроме копенгагенской интерпретации к этому классу интерпретаций относятся некоторые интерпретации, допускающие «скрытые переменные», например интерпретация Д.Бома. Как пишет сам Д.Бом, «эта... интерпретация позволяет рассматривать каждую индивидуальную систему как находящуюся в некотором точно определенном состоянии, изменение которого со временем задается точными законами, похожими на классические уравнения движения (но не идентичными с ними). Представление о квантово-механических вероятностях рассматривается как вызванное практической необходимостью... Физические результаты, к которым приводит предлагаемая нами интерпретация, точно совпадают с обычными, коль скоро сохраняется уравнение Шредингера в его современной общей форме»⁵.

Статистические (ансамблевые) интерпретации квантовой механики также распадаются на два класса. Следуя терминологии одного из недавних обзоров этих интерпретаций, назовем их классом минимальных интерпретаций и классом интерпретаций с презумпцией исходных значений физических величин, называемых в квантовой механике наблюдаемыми (например, координата, импульс, энергия) — *pre-assigned initial values interpretations*⁶. Минимальные ансамблевые интерпретации весьма близки к копенгагенской интерпретации. При этих интерпретациях (их проводили в своих работах Л.И.Мандельштам и Д.И.Блохинцев) элементам ансамбля не приписываются какие-либо «свои» свойства, ансамбль характеризуется лишь теми свойствами, которые наблюдаются при измерении, а именно — математическими ожиданиями (средними) физических величин и вероятностями того, что физическая величина примет то или иное значение. Значения физических величин, обнаруживаемые при измерении, относятся не к элементам ансамбля, а ко всему ансамблю в целом.

Ансамблевые интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин предполагают, что каждый из элементов ансамбля характеризуется своими присущими именно

ему значениями физических величин, а именно — теми значениями, которые обнаруживаются при измерении. При этом каждый из элементов характеризуется «своими» свойствами, независимо от того, проводится ли в данный момент соответствующее измерение или нет, во всяком случае он характеризуется этими свойствами в момент времени, непосредственно предшествующий измерению.

Ансамблевая интерпретация с презумпцией исходных значений физических величин была высказана в 1927 г. А.Эйнштейном в его выступлении на 5-й Сольвеевской конференции. Рассматривая мысленный эксперимент с электронами, вылетающими из небольшого отверстия в экране, вокруг которого расположена в виде полусферы фотоплёнка, А.Эйнштейн использовал две интерпретации волновой функции: согласно первой, «чисто статистической», волновая функция соответствует «не одному электрону, а облаку электронов, распределённых в пространстве», и «даёт информацию относительно бесконечного множества элементарных процессов», согласно же второй «квантовая теория претендует на полное описание отдельных процессов», однако каждая частица «не характеризуется положением и скоростью»⁷. А.Эйнштейн отдавал предпочтение первой интерпретации.

Последующие статьи Эйнштейна на эту тему уже не дают определённого ответа на вопрос, какой тип ансамблевого подхода он поддерживает. Поэтому классическим выразителем ансамблевой интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин справедливо считают упоминавшегося выше К.Поппера. Касаясь соотношений неопределённостей, истолковываемых копенгагенцами как соотношения неточностей, К.Поппер пишет: «Статистические законы теории, включая формулы (1) и (2) (речь идет о формулах соотношений неопределённостей для энергии и времени и соответственно для координаты и импульса. — А.П.), ...относятся к популяции частиц (если эксперименты проводятся с частицами), которые обладают координатой и импульсом (а также энергией и другими физическими свойствами, такими, как спин). Верно, что соотношения разброса говорят нам, что мы не можем приготовить опыты так, что можно было бы обойти при повторении опыта 1) рассеяние энергии, если мы устанавливаем узкий временной интервал, 2) рассеяние импульса, если мы устанавливаем узко ограниченную координату. Но это означает лишь, что имеются пределы статистической гомогенности наших экспериментальных резуль-

татов. Однако не только возможно измерять энергию и время или импульс и координату с большей точностью, чем, казалось бы, позволяют формулы (1) и (2), но такие измерения необходимы для проверки разброса, предсказываемого этими самими формулами»⁸.

Поясняя эту цитату, заметим, что для Поппера проверка теории предполагает возможность ее опровержения. Чтобы квантовая теория была опровергаемой, эксперимент должен допускать принципиальную возможность наблюдать более узкие распределения, нежели те, которые предписывают соотношения неопределенностей. Поппер согласен с Гейзенбергом в том, что соотношения неопределенностей «не относятся к прошлому, так как если сначала известна скорость электрона, а затем точно измерено положение, то возможно и для времени перед измерением положения точно вычислить его положение»². Он, однако, не согласен с Гейзенбергом в том, что «это знание прошлого носит чисто умозрительный характер». Поппер истолковывает это высказывание Гейзенберга следующим образом: при описании экспериментов мы можем в принципе приписать каждой микрочастице координату и импульс (если бы это было невозможно, квантовая механика была бы неопровергаемой теорией, т.е. чистой идеологией), соотношения же неопределенностей относятся не к отдельным частицам, а к популяциям частиц.

Упоминая интерпретации, трактующие квантовую механику как теорию индивидуальной физической системы, мы отметили интерпретацию, настаивающую на полноте этой теории (копенгагенскую интерпретацию), и интерпретации со «скрытыми переменными». Сохраняя эту терминологию, мы можем назвать минимальные ансамблевые интерпретации интерпретациями, исходящими из полноты этой теории, а интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин интерпретациями, предполагающими возможность ее пополнения. Только под полнотой в данном случае надо понимать статистическую полноту теории, неполноту ее статистических утверждений (см. один из недавних обзоров этой проблемы³). При минимальной ансамблевой интерпретации квантовая механика трактуется в соответствии с теоремой Й.фон Неймана о невозможности «скрытых параметров» (1932 г.): чистые ансамбли (представимые волновыми функциями) обязательно считаются гомогенными. При интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин эта теорема (как, впрочем, и соот-

ношения неопределенностей) приобретает феноменологический характер. Пусть чисто умозрительно и философски, но эта интерпретация допускает продвижение к чистым бездисперсным ансамблям, запрещенным теоремой фон Неймана.

Как минимальные ансамблевые интерпретации (Л.И.Мандельштам, Д.И.Блохинцев и др.), так и интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин (К.Поппер и др.) подчеркивают статистический (вероятностный) характер квантовой механики: они реализуют принцип Р. фон Мизеса, утверждающий, что «сперва должен быть налицо коллектив, тогда только можно говорить о вероятностях»⁴. Статистические интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин вводят в квантовую механику, кроме того, дополнительную структурированность и тем самым позволяют обойти то, что с копенгагенской точки зрения считается неизбежным, а именно — ссылку на субъекта (наблюдателя). Однако эта структурированность имеет свою цену: как пишет Л.Баллентайн, один из активных сторонников такого рода интерпретаций, они «полностью открыты в отношении «скрытых переменных». Они не требуют их, но делают их поиск всецело осмысленным»⁵. Л.Баллентайн более осторожен в своих формулировках, чем Поппер: он, например, утверждает лишь то, что элементы ансамбля обнаруживают при измерении те значения физических величин, которыми они обладали непосредственно перед измерением. Его конфликт с теоремой фон Неймана проблематичен. Тем не менее и его версия ансамблевой интерпретации может быть истолкована так, что из нее следует статистическая неполнота квантовой механики.

Выше было отмечено, что дивергенция интерпретаций ради понимания отражается в разногласиях, касающихся инструменталистской интерпретации. Вернемся в этой связи к основному для настоящего параграфа делению интерпретаций на ансамблевые и неансамблевые. Как отмечалось выше, инструменталистские интерпретации включают статистический алгоритм и, стало быть, используют понятие вероятности. М.Джеммер в своей фундаментальной книге по истории интерпретаций квантовой механики выделяет две инструменталистские интерпретации: первая использует классическое (лапласовское) понятие вероятности, определяющее эту величину как отношение числа благоприятных исходов какого-либо опыта к числу равновозможных исходов этого опыта, вторая — частотное понятие вероятности (вероятность — предел последовательности относительных

частот рассматриваемого результата при бесконечном увеличении числа испытаний)⁶. Используя классическое понятие вероятности, мы можем приписывать вероятность какому-либо единичному событию (например, локализации электрона в какой-либо точке). Ведь «благоприятность» и «равновозможность» могут трактоваться как априорные характеристики рассматриваемого эксперимента и экспериментального устройства. Частотное же определение вероятности предполагает рассмотрение не одного события, а коллектива. Формулируя статистический алгоритм, мы в этом случае имеем в виду ансамбль экспериментов (например, определяющих координату электрона), причем экспериментов с подобными приготовленными стадиями (приготавливающими физические системы в одном и том же состоянии).

М.Джеммер связывает первую инструменталистскую интерпретацию с именем М.Борна, который в 1926 г. предложил вероятностное истолкование волновой функции, а вторую — с именем А.Эйнштейна, который в 1927 г. выступил с ансамблевой интерпретацией квантовой механики. Последнее не вполне удачно, поскольку Эйнштейн в явном виде не использовал частотное понятие вероятности. Мы будем называть вторую инструменталистскую интерпретацию фонмизесовской, имея в виду, что Р. фон Мизес выдвинул в 1919 г. частотное определение вероятности и впоследствии применил его к квантовой механике.

Исторически копенгагенская интерпретация квантовой механики была связана с борновской инструменталистской интерпретацией. Понятия о неконтролируемом взаимодействии измерительного прибора и физической системы и дополнительные были выдвинуты в развитие этой интерпретации или во всяком случае были развиты с ее учетом. Эти понятия призваны обосновать принципиальную неустранимость вероятности из инструменталистской интерпретации.

Можно указать, однако, изложения копенгагенской интерпретации, в которых она связывается с фонмизесовской инструменталистской интерпретацией⁷. При таких изложениях «неконтролируемое взаимодействие» и «дополнительность» несут добавочную нагрузку: они показывают, что квантовая механика, несмотря на ансамблевый характер проверяющих экспериментов, зафиксированный в инструменталистской интерпретации, остается в своей основе теорией единичной физической системы.

Статистические (ансамблевые) интерпретации в отличие от копенгагенской интерпретации исторически и логически связаны с фонмизесовской инструменталистской интерпретацией. Здесь

важно подчеркнуть следующее: это интерпретации ради понимания, вместе с ними мы покидаем «бруто-факты», учитываемые в инструменталистской интерпретации, и вступаем в область мысленных экспериментов, показывающих, что представляет собой физическая реальность. Это особенно важно подчеркнуть в отношении минимальной ансамблевой интерпретации, при которой принимаются во внимание только те свойства ансамбля, которые «работают» в инструменталистской интерпретации. Минимальная ансамблевая интерпретация — это тоже интерпретация ради понимания: она позволяет не только рассчитывать результаты экспериментов, но и теоретически моделировать различные экспериментальные ситуации, вводя образы чистого и смешанного ансамбля, «дополнительных» квантовых ансамблей, расщепления ансамбля на подансамбли.

Итак, мы рассмотрели классификацию интерпретаций квантовой механики, действующую не только на уровне интерпретаций ради понимания, но и на инструменталистском уровне. Это деление на интерпретации «нестатистические» и «статистические» (ансамблевые). Более дробная классификация, однако, касается только интерпретаций ради понимания. Это подразделение на интерпретации, предполагающие полноту квантовой теории и предполагающие, наоборот, ее пополнение.

2. ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ, ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ И «СКРЫТЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ»

Разобранная в предыдущем параграфе классификация учитывает далеко не все интерпретации квантовой механики. Так, например, она не учитывает пропенсивную интерпретацию (от английского слова — *propensity* — предрасположенность, тенденция), развитую в 50-е годы К.Поппером (проводившем ранее тот статистический (ансамблевый) подход, о котором речь шла в предыдущем параграфе). Кроме того, в рамках вышеизложенной классификации остаются вопросы по поводу копенгагенской интерпретации и интерпретаций со «скрытыми переменными». Мы сказали, что при копенгагенской интерпретации квантово-механическое описание при помощи волновой функции считается в максимально возможной степени полным, а при интерпретациях со «скрытыми переменными» предполагается, что его можно пополнить. Однако что стоит здесь за словом «полнота»?

Чтобы ответить на этот вопрос, поставим другой, а именно: «Пусть система X не находится в собственном состоянии оператора Q , представляющего физическую величину Q . Что можно сказать о значении Q для данной системы?»⁸.

В зависимости от ответа на этот вопрос мы получаем одну из трех интерпретаций квантовой механики — копенгагенскую, пропенситивную и интерпретацию со «скрытыми переменными». Копенгагенская интерпретация предполагает следующий ответ: «Ничего нельзя сказать о значении этой физической величины». Иными словами, сам вопрос признается неосмысленным. Только тогда, когда система находится в собственном состоянии оператора, представляющего некоторую физическую величину, мы можем утверждать, что рассматриваемая система обладает определенным значением данной величины. Это значение и будет собственным значением соответствующего оператора.

На языке физики сказанное означает, что определенность значения физической величины связана с ее измеримостью. Только в том случае, когда система находится в собственном состоянии какого-либо оператора, мы можем утверждать, что при измерении соответствующей физической величины будет с неизбежностью получено определенное значение этой величины — собственное значение соответствующего оператора. В курсе Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица такие измерения названы «предсказуемыми». «Определяемые предсказуемыми измерениями количественные характеристики состояния суть то, что в квантовой механике называют физическими величинами»⁹. Физическая величина, стало быть, является в квантовой механике в обличи своих «собственных значений». «Физически первичным оказывается не понятие самого оператора, а скорее понятие совокупности его собственных векторов с принадлежащими им собственными значениями»¹⁰.

Здесь в игру вступает важное для копенгагенцев понятие дополнителности. В квантовой механике далеко не все физические величины могут быть одновременно измерены у данной физической системы. Следовательно, эта система не может быть столь же полно описана, сколь она описывается в классической физике. Однако она может быть охарактеризована классическим набором физических величин с учетом «дополнительности». В каждой конкретной ситуации мы можем выделить совокупности дополнительных (взаимоисключающих и предполагающих друг друга) «предсказуемых измерений» и, стало быть, физических величин, характеризующих физическую систему.

Вернемся к нашему вопросу: «Что мы можем сказать о значении физической величины Q , если система не находится в собственном состоянии соответствующего оператора?». Интерпретации со «скрытыми переменными» утверждают, что физическая величина и в этом случае имеет вполне определенное значение, но это значение остается нам неизвестным. Тем самым эти интерпретации предполагают пополнение концептуального аппарата квантовой механики: при стандартном изложении в аппарате квантовой механики нет концептуальных средств, способных выразить «определенные значения» физической величины у системы, не находящейся в собственном состоянии соответствующего оператора. При копенгагенской же интерпретации концептуальный аппарат стандартной квантовой механики предполагается полным.

Понятие «скрытой переменной» генетически восходит к известной теореме И. фон Неймана, устанавливающей полноту квантовой механики (см. выше). Однако эта теорема, в которой полнота теории связывается с невозможностью чистых бездисперсных состояний, «не ловит» большинство реально действующих концепций «скрытых переменных». Более жестким регулятивом, отсеивающим интерпретации со «скрытыми переменными», служит неравенство Дж. Белла (1964 г.). Это неравенство выведено при минимальных требованиях к «скрытым переменным», которые, однако, укладываются в рамки приведенного выше определения. Дж. Белл предположил, что все физические величины во всех состояниях физических систем имеют вполне определенные значения. Кроме того, он предположил, что эти значения локальны. Это означает, что они не могут измениться под влиянием удаленных экспериментов. Белл показал, что выведенное при указанных предпосылках неравенство нарушается квантовой механикой. Последующие исследования показали, что неравенство Белла скорее всего нарушается также и экспериментом.

Требование локальности, однако, является само по себе избыточным по отношению к концепции «скрытой переменной». В § 1 упоминалась концепция Боба, в которой вводится такое понятие «скрытых переменных», которое «не ловит» не только теорема фон Неймана, но и результат Белла. Эти «скрытые переменные» не являются локальными: волновая функция, представляющая состояние системы, оказывается у Боба также и объективно существующим u -полем, мгновенно реагирующим на измерения. Если волновая функция представляет состояние

пары удаленных друг от друга частиц (как в эксперименте Эйнштейна-Подольского-Розена), то измерение, выполненное над одной из них, сразу же затрагивает физические свойства другой.

Третий ответ на поставленный выше классифицирующий вопрос следующий: система, не находящаяся в собственном состоянии оператора, представляющего физическую величину, обладает нечетким, расплывчатым значением этой величины. Мы можем лишь утверждать предрасположенность (propensity) системы иметь то или иное количественное значение физической величины. Численной мерой этой предрасположенности служит вероятность, входящая в «статистический алгоритм».

Как отмечалось выше, пропенситивная интерпретация была выработана в 50-е годы К.Поппером, который ранее придерживался статистического (ансамблевого) подхода¹¹. Поппер сам отмечает, что он следовал В.Гейзенбергу, интерпретировавшему в некоторых своих поздних работах волновую функцию как потенциальную возможность в стиле аристотелевской философии. Ему следовало бы упомянуть также В.А.Фока, который в своих послевоенных статьях рассматривал «совокупность потенциальных возможностей», вытекающих из «приготовительного опыта», как характеристику квантово-механического состояния, в которое этот опыт приводит физическую систему¹².

Поскольку предрасположенность характеризует не саму по себе физическую систему, а ее состояние, задаваемое экспериментальной установкой, возникает вопрос об отличии пропенситивной интерпретации от копенгагенской, в которой, как мы видели, понятие физической величины носит подчеркнуто операционалистский характер: физическая величина — это то, что фиксируется в «предсказуемом измерении». При пропенситивной интерпретации, однако, связь с измеримостью оказывается не столь жесткой. Хотя предрасположенность характеризует физическую систему вместе с ее экспериментальным окружением, она в силу своей «нечеткости» реализуется не только в «предсказуемых измерениях». В отличие от копенгагенцев Поппер ассоциирует физическую величину с соответствующим оператором, а не с его собственными значениями.

Возникает также вопрос: а не сводится ли пропенситивная интерпретация к инструменталистской? Ведь количественной мерой предрасположенности служит вероятность, входящая в статистический алгоритм. Однако предрасположенность — качественная характеристика состояния физической системы и как

таковая выходит за пределы «бруто-фактов» (показания измерительных приборов), которыми ограничена инструменталистская интерпретация. Ее статус в этом отношении похож на статус минимальной ансамблевой интерпретации: мы можем мысленно экспериментировать с предрасположенностями, как и с ансамблями, поясняя, какая реальность стоит за квантово-механическими расчетами и измерениями.

Итак, в дополнение к классификации, выделяющей статистические (ансамблевые) и нестатистические интерпретации, мы рассмотрели классификацию, построенную по принципу, как трактуется понятие физической величины. Эта классификация пересекается с первой: копенгагенская интерпретация и интерпретации со «скрытыми переменными» в ней уже упоминались. Вместе с тем она обогащает картину концептуальных ресурсов интерпретаций квантовой механики, четко определяя «скрытые переменные» и вводя понятие предрасположенности.

3. ДУАЛИСТИЧЕСКИЕ И МОНИСТИЧЕСКИЕ («АНТИКОЛЛАПСОВСКИЕ») ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Классификационным принципом интерпретаций квантовой механики может служить отношение к «редукции волнового пакета», одной из самых острых интерпретационных проблем этой теории.

Идея редукции волнового пакета была высказана В.Гейзенбергом в 1927 г. при обсуждении измерения координаты электрона¹³. Эта идея была затем развита им же, а также П.А.М.Дираком и И. фон Нейманом в понятие некаузального изменения состояния системы при осуществлении измерения. В простейшем случае «идеального измерения», когда измерительный прибор действует как «идеальный фильтр», редукцией волнового пакета оказывается переход суперпозиции $\Psi = \sum_n \varphi_n$, где φ_n — собственные состояния измеряемой величины, в одно из этих собственных состояний φ_n . Гейзенберг, Дирак и фон Нейман таким образом выделяют, наряду со стандартным каузальным изменением состояния системы в соответствии с уравнением Шредингера, «некаузальный прыжок» этого состояния, приходящийся на акт измерения.

Хотя в связи с понятием редукции волнового пакета среди сторонников копенгагенской интерпретации возникли разногласия, нельзя не признать, что это понятие достаточно органично

вписывается в аппарат этой интерпретации (кстати, о принципиальном характере этих разногласий писал И.С.Алексеев¹⁴). Точнее, оно почти принудительно возникает, если копенгагенская точка зрения соединяется с точкой зрения на прибор как на квантово-механическую систему. Вспомним еще раз, что в рамках копенгагенской интерпретации физическая величина имеет определенное значение в том и только в том случае, когда система находится в собственном состоянии соответствующего оператора. Если мы в качестве физической величины рассматриваем «показание прибора», то, оставаясь на копенгагенских позициях, мы вынуждены связывать определенность этих показаний с переходом прибора в одно из собственных состояний оператора, представляющего эту «величину». Приведем основные формулы. Пусть физическая система I , у которой мы измеряем некоторую величину Q , первоначально находилась в состоянии $|I, \psi\rangle$, представимом в виде суперпозиции собственных состояний соответствующего оператора, т.е. в виде $\sum c_n |I, q_n\rangle$. Пусть прибор II первоначально находился в состоянии $|II, 0\rangle$. В соответствии с законами квантовой механики измерение описывает следующая формула:

$$U |I, \psi\rangle |II, 0\rangle = \sum c_n |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle, \quad (1)$$

где U — оператор взаимодействия микросистемы с измерительным прибором, α_n — показания прибора (непосредственные результаты измерения). Формула (1), однако, не описывает всего процесса измерения. Всякий раз с прибора снимают какое-либо одно показание α_n и по нему определяют значение измеряемой физической величины q_n . Чтобы осмыслить эту последнюю стадию, Гейзенберг, Дирак, фон Нейман, В.Паули и др. используют понятие редукции волнового пакета. Они постулируют переход суперпозиции, стоящей в правой части равенства (1) в один из ее членов, содержащий то значение α_n , которое действительно наблюдалось. Иными словами, они постулируют следующее:

$$\sum c_n |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle \Rightarrow |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle \quad (2)$$

В отличие от формулы (1) формула (2) выражает некаузальный скачок, про который мы можем лишь сказать, что его вероятность равна $|c_n|^2$.

«Редукция волнового пакета» сразу же встретила оппозицию. Именно против этого понятия выступил А.Эйнштейн на 5-ой Сольвеевской конференции, предложив статистическую интерпретацию волновой функции (см. первый параграф). «Скач-

ком теории» иронически называл «редукцию» Э.Шредингер. Он также предложил интерпретацию, исключаящую понятие редукции из концептуального аппарата квантовой механики¹⁵. На волне этой критики возникли и другие «антиколлапсовские» интерпретации. Вместе с тем возникли интерпретации, сохраняющие введенный Гейзенбергом, Дираком и фон Нейманом дуализм, но придающие ему «рациональные» формы.

Остановимся в первую очередь на этих последних. В соединении с копенгагенской интерпретацией «редукция волнового пакета» окрашивается в тона крайнего субъективизма. Эта «редукция» происходит при единичном акте наблюдения: квантово-механическое состояние физической системы изменяет фиксация исследователем показаний прибора.

Хотя статистическая (ансамблевая) интерпретация в ее минималистской версии не позволяет как-то обойти понятие редукции волнового пакета, она делает это понятие менее субъективным, менее мистическим. Поскольку в рамках этой интерпретации физической осмысленным является лишь ансамбль микросистем и, стало быть, ансамбль измерений, то «редукция» оборачивается селекцией (отбором) подансамблей, целенаправленно осуществляемой исследователем (исследователями).

Возьмем случай идеального измерения (см. начало настоящего параграфа). Пусть зафиксировано N_1 показаний, лежащих в окрестности q_1 (собственное значение, соответствующее собственному состоянию ϕ_1), N_2 показаний, лежащих в окрестности q_2 (собственное значение, соответствующее собственному состоянию ϕ_2) и т.д.¹⁶. Тем самым уже осуществлена «редукция волнового пакета»: ансамбль результатов измерения и соответственно физических систем разбит на подансамбли. Вместо суперпозиции собственных состояний мы имеем смесь этих состояний (если заданы вероятности каждого из чистых (в частности, собственных) состояний, то такой ансамбль называется смешанным или просто смесью).

При пропенситивной интерпретации, развитой в послевоенные годы Поппером (см. предыдущий параграф), «редукция» предстает как переход потенциальной возможности в действительность, которая в свою очередь определяет новые возможности. Вспомним, что состояние микросистемы интерпретируется Поппером как предрасположенность этой системы вести себя в тех или иных обстоятельствах тем или иным образом, иными словами, состояние системы определяется не только этой сис-

темой, но и тем экспериментальным процессом, который «приготовил» эту систему. Производя измерение, мы изменяем экспериментальную ситуацию, т.е. заново «готовим» эту систему для будущих опытов.

Поппер приводит здесь свой излюбленный пример: детский бильярд (установленная иголками доска, по которой сверху скачивается металлический шарик, символизирующий физическую систему, — сам бильярд символизирует экспериментальное устройство). Когда шарик наверху бильярда, мы имеем одну диспозицию, одну predisposedness достичь какой-либо точки внизу доски. Если же мы зафиксировали шарик где-то в середине доски, мы изменили спецификацию эксперимента и получили новую predisposedness. Квантово-механический индетерминизм сохраняется здесь в полном объеме: Поппер оговаривает, что бильярд не представляет собой механическую систему. Мы лишены возможности проследить траекторию шарика. Но «редукция волнового пакета» — это не акт субъективного наблюдения, это сознательное переопределение экспериментальной ситуации, сужение условий опыта.

Перейдем теперь к «антиколлапсовским» (монистическим) интерпретациям. Здесь особое место занимает многомировая интерпретация, выдвинутая в 1957 г. Г.Эвереттом (сам Эверетт называл эту интерпретацию интерпретацией относительных состояний)¹⁷. Чтобы понять эту интерпретацию, нам понадобится вышеприведенная формула (1) (формула (2), выражающая «редукцию волнового пакета», не находит в ней применения). Как отмечалось выше, формула (1) выражает то изменение, которое претерпевает при измерении комбинация физической системы, над которой производится измерение, и измерительного прибора, т.е. комбинация I и II.

Если предполагается «редукция волнового пакета», то предполагается и «факторизация» этой комбинации, превращение ее в совокупность произведений состояний системы, над которой производится измерение, и измерительного прибора. Иными словами, зафиксировав результаты измерений, мы имеем возможность отнести их непосредственно к системе, над которой проводилось измерение. При многомировой же интерпретации мы считаем осмысленным лишь относительное состояние этой системы, ее состояние, отнесенное к состоянию измерительного прибора. Если состояние комбинации I и II после измерения есть $\sum c_n |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle$, то относительное состояние I есть ее смешанное состояние (состояние смеси, выражаемое матрицей плотности, а не волновой функцией!), коррелированное с показанием α_n измерительного прибора.

Кроме того, при многомировой интерпретации предполагается, что каждый элемент вышеприведенной суперпозиции (и каждое относительное состояние) приходится на свой мир, снабженный своим наблюдателем. Все эти элементы одинаково реальны, поскольку одинаково реальны все возможные результаты измерения. Квантовая механика таким образом трактуется как теория, не помещающаяся в один мир. Она описывает реальность, состоящую из множества сосуществующих миров.

Коэффициенты c_n могут быть поняты в связи с вероятностными весами возможных миров. Если же наблюдатель в каждом из возможных миров одарен памятью, он может подсчитывать $|c_n|^2$ как относительные частоты появлений показаний прибора α_n в своем мире.

Выше статистическая (ансамблевая) интерпретация в ее минималистской версии была охарактеризована как дуалистическая интерпретация, придающая, однако, «редукции волнового пакета» более рациональную окраску. Статистическая же интерпретация с презумпцией исходных значений физических величин относится к «антиколлапсовским» интерпретациям. С точки зрения этой интерпретации, то явление, которое названо «редукцией волнового пакета», представляет собой особый стохастический процесс селекции («фильтрации») физических систем, выделяющий подансамбль в исходном ансамбле. Обратившись к формуле (2), мы, следуя этой точке зрения, констатируем, что правая часть «представляет подансамбль, чье определение включает дополнительную спецификацию, состоящую в том, что результат измерения (показание прибора) есть α_n »¹⁸. Сказанное можно выразить, используя понятие «приготовление физических систем в некотором состоянии» (см. параграф 1). Пусть мы экспериментируем с пучком атомов, приготовленных в состоянии, где их спин равен единице¹⁹. Этот пучок посредством прибора Штерна-Герлаха может быть разложен на три пучка с состояниями $+$, 0 и $-$. Если мы перекрываем два нижних пучка, то производим то, что называется «редукцией»: измерение и одновременно новое дополнительное приготовление состояния $+$.

Здесь важно отметить следующее. Объясняя «редукцию волнового пакета», к представлению о селективном измерении прибегают и сторонники минимальной ансамблевой интерпретации. Однако, поскольку элементы ансамбля для них так сказать, безлики (каждый атом до селекции находится в суперпозиционном состоянии $+$, 0 , $-$), «редукция» так и остается «некаузальным

скачком». В случае же ансамблевой интерпретации с презумпцией исходных значений физических величин это объяснение более перспективно: отбор становится предметным, так как элементы ансамбля, пусть очень условно, как у Баллентайна, но характеризуются «своими» значениями физических величин.

К антиколлапсовским интерпретациям относятся модальные интерпретации, получившие популярность в самые последние годы. Мы очертим только одну из них — интерпретацию Б. ван Фраассена.

Модальная интерпретация ван Фраассена исходит из того, что состояние физической системы изменяется только каузально, т.е. в соответствии с уравнением Шредингера, однако это состояние не детерминирует однозначно значения физических величин, обнаруживаемые при измерении²⁰. При кажущейся тривиальности этого утверждения оно с точностью до наоборот воспроизводит тот «механизм» процесса измерения, который имеется в виду, когда «работает» понятие редукции волнового пакета, а именно — в этом случае предполагается, что состояние системы некаузально переходит в одно из собственных состояний измеряемой величины, а то в свою очередь уже однозначно детерминирует то значение физической величины, которое обнаруживается при измерении.

Ван Фраассен различает атрибуцию состояния физической системе и атрибуцию значений физических величин ей. «Состояние системы описывает то, что может случиться со значениями физических величин, то же, что реально происходит с ними, лишь возможно по отношению к состоянию физической системы и не может быть дедуцировано из этого состояния»²¹. «Состояние, подчиняющееся законам квантовой механики, дает только вероятности экспериментальных событий, которые выпадают из сферы действия этих законов»²².

Если принимается «редукция волнового пакета», то, согласно ван Фраассену, используется следующее правило (см. формулу 1): «величина α , принадлежащая системе Π , имеет величину α_n тогда и только тогда, когда Π находится в собственном состоянии этой величины». Ван Фраассен заменяет это правило на следующее «модальное», связывающее квантово-механическое состояние и атрибуцию значения физической величины: «для некоторого n величина α имеет значение α_n , причем вероятность того, что $\alpha = \alpha_n$ равна $|c_n|^2$. Принимая «модальное» правило, мы уже не обязаны считать, что в результате акта наблюдения происходит физическое явление, что система Π оказывается в собственном состоянии измеряемой величины.

Как было сказано в начале, настоящая статья не претендует на глубокий и тем более критический анализ интерпретаций квантовой механики. Она предназначена скорее служить своеобразным путеводителем в лабиринте множества интерпретаций, наполняющих физическую и философскую литературу. Этот «путеводитель», правда, не полон: в нем не представлены, например, стохастические интерпретации, получившие в последние годы популярность. Приведенные нами классификации могли бы быть и более дробными, в них, например, можно было бы более детально описать многообразие интерпретаций со «скрытыми переменными». Мы, однако, преследовали и философскую сверхзадачу — представить плюралистическую точку зрения на интерпретации, причем плюралистическую не только в смысле акцента на множественность, но и в смысле акцента на многомерность.

Примечания

- ¹ Марков М.А. О трех интерпретациях квантовой механики. М.: Наука, 1991.
- ² По поводу постмодернизма в философии квантовой механики см.: *Bitbol M.* Schrodinger's Philosophy of Quantum Mechanics // Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. 188. Dordrecht, etc.: Kluwer Academic, 1996.
- ³ Барвинский А.О., Каменщик А.Ю., Пономарев В.Н. Фундаментальные проблемы интерпретации квантовой механики. Современный подход. М., 1988; Садбери А. Квантовая механика и физика элементарных частиц. М., 1989.
- ⁴ Гейзенберг В. Физические принципы квантовой теории /Пер. под ред. Д.Д.Иваненко. М.; Л., 1932. С. 48-51.
- ⁵ Бом Д. О возможности интерпретации квантовой теории на основе представления о «скрытых» переменных. Ст. 1 // Вопросы причинности в квантовой механике. М., 1955. С. 35.
- ⁶ Home D., Whitaker M.A.B. Ensemble Interpretations of Quantum Mechanics: A Modern Perspective // Physics Reports. Vol. 210. № 4. 1992. P. 223-317; Печенкин А.А. Статистическая интерпретация квантовой механики: достигнут ли прогрессивный сдвиг проблемы? // Вестник МГУ. Сер. 7. Философия. 1997. № 5. С. 26-41.
- ⁷ Эйнштейн А. Собр. науч. тр.: В 5 т. Т. 3. М., 1966. С. 528-529.
- ⁸ Popper K.R. Quantum Theory and the Schism in Physics. L.; N. Y., 1982. P. 54-55; Поннер К. Квантовая механика и раскол в физике /Пер., комментарии и послесловие А.А.Печенкина. М.: Логос, 1998.
- ² Гейзенберг В. Цит. соч. С. 21.
- ³ Elby A., Brown H.R., Foster S. What Makes a Theory Physically «Complete»? // Foundations of Physics. 1993. Vol. 23, № 23, 1993. P. 971-985.

-
- ⁴ *Мизес Р.* Вероятность и статистика. М.; Л., 1930. С. 16.
- ⁵ *Ballentine L.E.* The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics // *Reviews of Modern Physics*. Vol. 42. № 4. 1970. P. 372.
- ⁶ *Jammer M.* The Philosophy of Quantum Mechanics. N. Y., 1974. P. 144.
- ⁷ *Вейль Г.* Теория групп и квантовая механика /Пер. Б.И.Галаева. М.: Наука, 1986.
- ⁸ *Redhead M.* Incompleteness, Nonlocality, and Realism. Oxford: Clarendon, 1989.
- ⁹ *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая механика. Ч. 1. М.; Л., 1948. С. 15.
- ¹⁰ *Медведев Б.В.* Начала теоретической физики. М., 1977. С. 345-346.
- ¹¹ *Поппер К.* Квантовая механика и раскол в физике.
- ¹² *Фок В.А.* Квантовая физика и строение материи // Структура и формы материи. М., 1967. С. 174.
- ¹³ *Геізенберг В.* О наглядном содержании квантовотеоретической кинематики и механики // *Успехи физ. наук*. Т. 122. Вып. 4. 1977. С. 622.
- ¹⁴ *Алексеев И.С.* Концепция дополнительности. Историко-методол. анализ. М., 1978. С. 150-161.
- ¹⁵ См.: *Bitbol M.* Op. cit.
- ¹⁶ См.: *Блохинцев Д.И.* Основы квантовой механики. М., 1978. С. 80.
- ¹⁷ *Everett H.* «Relative State» Formulation of Quantum Mechanics // *Reviews of Modern Physics*. Vol. 29, 1957. P. 452-464; *Everett H.* The theory of the Universal Wave Function // *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton Univ. Press, 1973.
- ¹⁸ *Ballentine L.E.* The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics // *Reviews of Modern Physics*. Vol. 42. № 4. 1970. P. 370.
- ¹⁹ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 8. М., 1966. С. 57-64.
- ²⁰ *Van Fraassen B.C.* Quantum Mechanics. An Empiricist View. Oxford: Clarendon Press, 1995.
- ²¹ *Van Fraassen B.C.* The Labyrinth of Quantum Logic // *Logical and Epistemological Studies in Contemporary Physics / Boston Studies in the Philosophy of Science*. Vol. 13. Dordrecht, Holland: Reidel, 1974. P. 300-301.
- ²² *Van Fraassen B.C.* Quantum Mechanics. An Empiricist View. P. 279.