

ФИЛОСОФИЯ НАУКИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА [1]

А.А. Печенкин

Цель настоящей статьи – охарактеризовать философию квантовой механики как типичную и в известном смысле парадигмальную составляющую философии науки (the philosophy of science). При этом внимание будет обращено на современные проблемы этой области: они рельефно показывают, как философия квантовой механики, а стало быть, и философия науки в целом, вносит свой вклад в научный дискурс. Автор стремится к неформальному интуитивному изложению философии квантовой механики, ставшей в настоящее время весьма математизированной областью знания.

1. Что такое философия науки?

Не поднимая этот вопрос в полном объеме, возразим против популярной трактовки этой области знания как методологии – учения о методе и, одновременно, компендиума методов. Такая трактовка бытовала в советской философской литературе. Она принята и в знаменитой «Логике научного открытия» К. Поппера. Между тем уже эволюция попперианской философии показала, что концепция методологических правил встречает большие трудности при попытке разработать ее достаточно детально. Мы имеем в виду методологию научно-исследовательских программ И. Лакатоса, выдвинутую в развитие идей Поппера. Поскольку «научно-исследовательская программа» – крупная «надтеоретическая» единица знания, постигаемая, вообще говоря, ретроспективно, центральной задачей философии науки стала «рациональная реконструкция истории науки». Философия науки, трактуемая как методология, оказалась на поверку методологией истории науки.

Но была ли найдена реальная методология истории науки? Оказывается,

что «методология научно-исследовательских программ» не вполне обеспечивает “рациональную реконструкцию истории науки”. Лакатос в поздних работах приходит к выводу, что перед лицом историко-научных фактов его методологические правила оказываются слишком жесткими. Он идет по пути их ограничения, выдвигая в качестве регулятивов этические принципы типа «упорство, как и скромность, обладает большим рациональным смыслом» [2]. Как отмечает П. Фейерабенд, стандарты Лакатоса «гораздо ближе к реальной науке, чем стандарты предшествующих подходов» [3]. Тем не менее, как пишет тот же Фейерабенд, «Лакатос не показал, что его стандарты являются стандартами науки, он не показал, что его стандарты ведут к существенным результатам» [4].

П. Фейерабенд, пришедший к принципу методологического анархизма, означающему, что в науке “все дозволено”, считает, что концепция Лакатоса отличается от его собственной концепции главным образом риторикой.

В настоящей статье предпочтение отдается другой концепции философии науки, изложенной Дж. Смартсом в плане развития идей В. Куайна [5]. Философия науки здесь предстает в виде сферы взаимодействия классических и современных философских идей и теоретического естествознания. Принцип Куайна «для первой философии нет места» не следует понимать как отрицание метафизики. Метафизика существует как исторический факт, но она не имеет особых преимуществ в мире знания. Метафизические идеи столь же уязвимы, сколь и конкретно-научные. Они оправдывают свое существование тем, что влияют на теоретические представления естественных наук и в конечном итоге на объяснения и предсказания фактов. Философия науки таким образом соединяет те идеи, которые обычно называют метафизикой, с опытом в самом широком смысле этого слова, включающем теоретизирование, эксперимент и наблюдение.

Философия науки, с одной стороны, является философией, с другой – конкретной наукой. Как философия она либо реализм, либо номинализм, либо эмпиризм, либо рационализм, либо материализм, либо идеализм. Словом, в фи-

лософии науки представлен широкий спектр философских контроверз и дискуссий. В качестве конкретной науки философия науки решает те или иные задачи, дает те или иные результаты. Слова «задачи» и «результаты» здесь надо понимать достаточно широко. Задачей для философии науки будет не решение какого-либо дифференциального уравнения и не проведение какого-либо эксперимента, а прояснение концептуального отношения, уточнение понятия, проведение демаркации и т.д. Соответственно результатом будет не только то, что обеспечивает прогресс в познании природы, но и то, что создает предпосылки для такого прогресса. В принципе могут быть выделены два пересекающихся круга проблем, которыми в первую очередь занимается философия науки, – это проблемы структуры и функции научного знания и проблемы смысла и значения фундаментальных научных понятий и, соответственно, два типа результатов – результаты, касающиеся знания, и результаты, касающиеся фундаментальных особенностей мироздания. К первым относятся не только положительные, но и отрицательные результаты, устанавливающие то, на что наука претендовать не может. В известном смысле эти результаты аналогичны ограничительным результатам метаматематики (теорема Гёделя о неполноте, теорема Тарского о невыразимости истины).

Итак, философия науки дислоцируется между философскими концепциями и научными результатами. Если в философии науки нет четко обозначенной философской концепции, она становится некритической, вырождается в поверхностное теоретизирование и даже в популярный пересказ «достижений» естественных наук. Если же философия науки теряет конкретно-научную результативность, она превращается в компилятивное изложение философских идей, выдвигавшихся в связи с развитием естествознания. В этой связи уместно вспомнить эпитет, возникший у нас в 70-е или 80-е годы: «философия науки за счет английского языка». Действительно, в эти годы появились многочисленные вариации на темы Поппера, Лакатоса и других западных философов науки, в которых не только не было какого-либо продвижения в этой области знания, но и терялась собственно научная составляющая идей этих философов. Англий-

ский, разумеется, надо знать. Но чтобы работать в философии науки, надо знать еще и науку.

В философии науки большое место принадлежит логике и математике, которые составляют связующее звено между философскими концепциями и конкретно-научными проблемами и представлениями. Логика и математика соединяют в себе общность, присущую философии, и точность, к которой стремятся конкретные науки [6]. Как отмечалось выше, одна из кардинальных задач философии науки состоит в прояснении структуры и функций научного знания. Естественно решать эту задачу, не теряя той точности, которой обладает само это знание. В противном случае «прояснение» не дает результата – уточнения какой-либо концепции, более содержательной формулировки какой-либо проблемы. Однако не следует забывать и о философских предпосылках логико-математических методов. На сегодняшний день логика состоит из ряда дисциплин и теорий, реализующих различные философские идеи.

Простой пример: отношение к неопозитивизму К. Поппера. Реализм и фаллибилизм (fallible – ошибочный (англ.), учение о принципиальной погрешимости знания) Поппера связаны с его антипатией к индуктивизму, в рамках которого работали неопозитивисты – Р. Карнап, Г. Рейхенбах и др. Философия науки К. Поппера строится на концептуальном аппарате дедуктивной логики.

В 1950 г. П. Суппес заявил, что «математика, а не метаматематика (речь идет о математической логике – А.П.) – основной инструмент философии науки» [7]. Это заявление, поддержанное рядом философов науки (см., например, ссылки в книге Б. ван Фраассена [8]), обозначило переориентацию философского исследования с проблем строения знания на экспликацию таких категорий, как причинность и детерминизм. Как известно, эти категории входят в концептуальную ткань фундаментальных физических законов. Неопозитивистски мыслящие философы уже много сделали в плане их логической экспликации. Однако насколько была продуктивна эта работа? Переводя категории причинности и детерминизма на язык логики, философ науки упускает из виду значительную часть того смысла, который эти категории приобретают в физике, и ба-

зируется главным образом на их обыденном содержании. В физике же причинность и детерминизм выражены на языке дифференциальных уравнений и абстрактных математических пространств. Чтобы эксплицировать эти понятия, надо “читать” математический аппарат физики. Отсюда не следует, что философия сводится к математике (как из работ, посвященных логической экспликации философских представлений, не следовало, что философия сводится к логике). Однако то, что в философии называется причинностью и детерминизмом, превращается в физике в целый спектр понятий. Математическая экспликация состоит как раз в “спектральном анализе” философской интуиции, осуществляемом при помощи математических понятий.

Так, например, понятие причинности работает в квантовой механике прежде всего как понятие локальности. В самом общем виде локальность – это отрицание дальнего действия, отрицание возможности мгновенной передачи воздействий из одной точки пространства в другую. В философии квантовой механики проблема локальности возникла при обсуждении мысленного эксперимента А. Эйнштейна, Б. Подольского и Н. Розена (далее: ЭПР эксперимента). Это эксперимент с парой частиц, «приготовленной» в определенном квантовом состоянии и разделившейся на две пространственно удаленных частицы. Пусть мы измеряем какую-либо динамическую переменную (координату, импульс, спин и т.д.) у одной из этих частиц. Согласно законам физики, мы сразу же определяем ту же динамическую переменную у второй частицы. Вопрос о локальности в данном случае – это вопрос о том, обладала ли эта вторая частица тем значением, которое мы определили, до акта измерения, или же она его получила в результате этого акта. Как известно, Эйнштейн, Подольский и Розен предполагали локальность: они считали, что измерение какой-либо динамической переменной у одной частицы не может создать определенное значение этой переменной у другой удаленной частицы. “Платой” за локальность была неполнота квантовой теории, о которой заявили эти авторы. Возражая Эйнштейну, Подольскому и Розену, Н. Бор по сути дела допустил нарушение понимаемой таким образом локальности. Вслед за Бором нарушение локальности по Эйн-

штейну, Подольскому и Розену предполагали другие классики копенгагенской (названной так в честь Бора, возглавлявшего Институт теоретической физики в Копенгагене) интерпретации – В. Гейзенберг, В. Паули и др.

В 1964 г. Дж Белл “операционализировал” ЭПР эксперимент. Он рассмотрел ситуацию, когда измерение какой-либо динамической переменной производится у каждой из удаленных друг от друга частиц. Постулировав локальность, Белл вывел неравенство (неравенство Белла), нарушаемое квантовой механикой при ее обычной интерпретации (словосочетание “обычная интерпретация” почти совпадает, во всяком случае не намного превосходит по объему словосочетание “копенгагенская интерпретация”). Локальность, постулируемая Беллом, отличалась от локальности в смысле Эйнштейна, Подольского и Розена. Белл, выводя свое неравенство, допустил, что значение динамической переменной, измеряемое у одной из частиц, не зависит от того, каким образом производится измерение этой же переменной у другой частицы (от того, как настроено соответствующее измерительное устройство) [9].

Можно ли, однако, используя пару частиц, рассмотренную Эйнштейном, Подольским и Розеном, а затем Беллом, мгновенно передавать информацию? Ведь та интерпретация квантовой механики, которая была только что достаточно расплывчато названа обычной, допускает нарушение локальности. Если допускается нарушение локальности по Беллу, то это означает, что настройка прибора, “работающего” с одной из частиц из пары, мгновенно сказывается на значении измеряемой величины у другой частицы. Нарушение локальности, по Беллу, создает таким образом мгновенный телеграф (“телеграф Белла”). Здесь, однако, в игру вступает еще одна разновидность локальности – статистическая локальность. В отличие от локальности по Беллу, эта локальность обладает следующей особенностью: ее нарушение наблюдаемо, т.е. может быть зафиксировано экспериментально. Под статистической локальностью понимают независимость статистики результатов измерения, производимого у одной из частиц, от результата измерения, производимого у другой частицы. Допуская нарушение белловской локальности, мы не предсказываем какого-либо наблюдаемого

мгновенного действия на расстоянии. Да, настройка удаленного прибора влияет на результат измерения. Но, чтобы зафиксировать это влияние, нам надо иметь классический канал связи, по которому сообщалось бы о той или иной настройке удаленного прибора. В свою очередь беспричинное изменение статистики было бы зафиксировано сразу. Но нелокальность, по Беллу, не ведет к статистической нелокальности. Более того, можно доказать, что статистическая локальность вообще не может быть нарушена в ЭПР эксперименте.

В 1957 г. С. Кохеном и Е. Спекром была указана еще одна концептуальная трудность квантовой теории: оказывается функциональное отношение между динамическими переменными (точнее, операторами, представляющими эти переменные) не обязательно соответствует функциональному отношению между значениями этих динамических переменных. В связи с этой трудностью было сформулировано еще одно понятие локальности – онтологическая локальность. Пусть у нас есть пара удаленных друг от друга частиц. Рассмотрим свойство одной из частиц этой пары. Можно ли расщепить это свойство на два свойства, полагая их функциями соответственно двух фундаментальных (онтологических) несовместных (представленных некоммутирующими операторами) свойств этой пары? Онтологическая локальность состоит в том, что это невозможно. Нарушение этой локальности означает контекстуальность: свойство одной из частиц оказывается по сути дела свойством пары.

Корректное формулирование онтологической локальности требует применения тензорного произведения гильбертовых пространств и операторов и различения «максимальных» и «немаксимальных» динамических переменных. Впрочем, и предшествующие формы локальности не могут быть адекватно изложены без математики [10].

Итак, мы перечислили ряд форм локальности (ряд форм отрицания дальнего действия), дебатированных в философии квантовой механики. Все они были выявлены и сформулированы при попытке провести реалистическую интерпретацию этой теории, противоположенную ее копенгагенской интерпретации. Выделение каждой из этих форм было очередной попыткой проникнуть в глу-

бины концептуальной структуры современной физики.

В следующем параграфе проблема интерпретации квантовой механики будет охарактеризована в целом. Мы увидим, что это типичная проблема философии науки, проблема реализации той или иной философской позиции и в то же время проблема последовательного и корректного формулирования физических понятий.

2. Проблема интерпретации квантовой механики

Одна из важнейших проблем философии квантовой механики – это проблема интерпретации этой теории. Дело в том, что первая значимая интерпретация этой теории, выдвинутая рядом её создателей – Н. Бором, В. Гейзенбергом, М. Борном, В. Паули (копенгагенская интерпретация), порывала с классической установкой на объективное описание физической реальности. «Копенгагенская интерпретация, – писал В. Гейзенберг, – далеко увела физиков от простых материалистических воззрений, господствовавших в естествознании XIX столетия, ...или, говоря на более общем философском языке, от онтологии материализма, т.е. от представления об объективном реальном мире, мельчайшие части которого существуют столь же объективно, что и камни и деревья» [11].

Высказанная в конце 20-х гг. копенгагенская интерпретация развивалась в двух направлениях. Во-первых, в плане физики: с копенгагенской точки зрения рассматривались различные мысленные эксперименты, существенные для понимания квантовой механики, анализировалась проблема измерения. Во-вторых, в плане философии: уточнялась философская позиция, которая в целом может быть охарактеризована как антиматериалистическая или во всяком случае нематериалистическая. При этом спектр философских квалификаций был достаточно широк: от феноменологии и неокантианства до позитивизма. Выяснение философских позиций позволяло более точно изложить всю интерпретацию в целом. Однако появился жанр «интерпретации интерпретации». Это философские работы, построенные на подведении высказываний крупных физи-

ков, интерпретировавших квантовую теорию, под ту или иную философскую концепцию, работы, не вникавшие в физическое содержание копенгагенской интерпретации.

Этим вырождением философии квантовой механики в «интерпретацию интерпретации» отмечен ряд отечественных работ. История здесь вкратце такова. В конце 40-х и в начале 50-х годов копенгагенская интерпретация подверглась нападкам, носящим политический характер. Однако в конце 60-х годов она не только становится вполне правомерной интерпретацией квантовой механики, но и «единственно правильной». Этому способствовала позиция ряда крупных академических физиков (Л.Д. Ландау, И.Е. Тамм и др.), всегда поддерживавших копенгагенскую интерпретацию, а также изменение идеологической обстановки в стране. Марксизм-ленинизм становится более прагматическим и, так сказать, более служебным. Позиция же академических физиков в условиях милитаризированной науки становится весьма весомой.

Перед советской философией науки (её обычно называли философскими вопросами естествознания) возникает задача адаптировать копенгагенскую интерпретацию. Целый ряд философов и физиков стал решать эту задачу. В работах П.С. Дышлевого, В.М. Свириденко [12] и И.С. Алексева [13] была точно воспроизведена копенгагенская интерпретация в версии Бора (эта задача была актуальна, поскольку В.А. Фок выступил со своей версией копенгагенской интерпретации, ставшей весьма авторитетной в советской литературе [14; 15; 16]). При этом П.С. Дышлевый, различая «объективную реальность» и «физическую реальность», рассматриваемую в квантовой механике, определил эту последнюю как результат взаимодействия «объекта, субъекта и условий познания» [17]. И.С. Алексеев, следуя статье М.А. Маркова, опубликованной в 1947 г. [18], интерпретировал копенгагенскую интерпретацию как «мышление о мире в формах деятельности» [19].

Хотя П.С. Дышлевый, В.М. Свириденко и И.С. Алексеев выступали от имени диалектического материализма, они не следовали канонической онтологии материализма. В нашей философской литературе, однако, появились статьи

и книги, нацеленные на то, чтобы «наполнить молодым вином старые мехи», т.е. интерпретировать копенгагенскую интерпретацию с позиций философского материализма. При такой «интерпретации интерпретации» искажались физические идеи, высказанные копенгагенской школой. Так, например, провозглашалось, что квантовая механика выражает «внутренне присущую процессам микромира объективную специфику», которая проявляется «во всех квантовых процессах, независимо от их наблюдения и независимо от их макроскопического проявления» [20]. Между тем с копенгагенской точки зрения «шаг в сторону более существенного включения наблюдателя и условий опыта в физическое описание природы, сделанный в квантовой механике, является окончательным» [21]. Это шаг в сторону легитимации индетерминизма, свойственного квантовой механике: вмешательство наблюдателя (акт наблюдения) прерывает причинные связи. Н. Бор, правда, говорил о «рациональном обобщении» классического принципа причинности в его концепции дополнительности [22]. Но он же говорил и об «окончательном отказе от классического идеала причинности» [23]. Согласно Н. Бору, при описании квантовых явлений мы не можем отвлечься от «влияния условий опыта на поведение системы». Ведь существенна «свобода выбора» как ставить опыт: «наблюдатель» останавливается на одной из двух дополнительных «экспериментальных манипуляций». Он, например, ставит эксперимент либо с целью определить координату частицы, либо – с целью определить её импульс.

Стрижка копенгагенской интерпретации под материализм, предпринятая рядом советских авторов, делает непонятной ту идейную борьбу, которая развернулась вокруг этой интерпретации. Уже в 1927 г. с критикой той линии в интерпретации квантовой механики, которая затем была названа копенгагенской, выступил А. Эйнштейн, продолживший эти выступления и впоследствии. Эйнштейн выступал с позиции философского реализма. Копенгагенские представления также решительно критиковал один из создателей квантовой механики Э. Шрёдингер, предлагавший свои альтернативные интерпретации. Пример Эйнштейна и Шрёдингера вдохновил ряд других физиков. Нельзя не отметить и

позицию профессиональных философов, среди которых находились как сторонники копенгагенской интерпретации, так и ее противники (например, К. Поппер). Причем полемика между ними порой носила весьма острый характер. Так, например, К. Поппер писал: «Большинство лидеров квантовой теории, кроме Эйнштейна и Шрёдингера, заняли позицию епископа и кардинала (речь идет о кардинале Беллармино, обвинявшем Галилея на суде инквизиции, и епископе Беркли. – А.П.), а не Галилея, Кеплера и Ньютона» [24].

Реализм, как он выражен Эйнштейном и Шрёдингером, это не просто философская позиция. Это способ понимания квантовой механики. В заметке 1927 г., адресованной пятой Сольвеевской конференции, Эйнштейн выдвинул то, что впоследствии было названо «скрытыми переменными». В противовес Н. Бору, В. Гейзенбергу и их сторонникам, считавшим, что волновая функция представляет состояние одной частицы, он предложил статистический (ансамблевый) подход: волновая функция представляет состояние множества («облака») частиц, каждая из которых имеет определенную координату. Эта координата остается, однако, «скрытой», т.е. вообще говоря неизвестной. Как и в классической статистической механике, измерение дает нам те значения динамических переменных (координата, импульс, энергия и т.д.), которые характеризуют весь ансамбль, а не каждую отдельную частицу. В отличие от классики, однако, «скрытость» здесь является принципиальной: в классической статистической физике мы все же можем найти средства, фиксирующие характеристики отдельных частиц, в квантовой же механике этому препятствуют соотношения неопределенностей.

Впоследствии, правда, А. Эйнштейн дистанцировался от «скрытых переменных». В 1935 г. он совместно с Б. Подольским и Н. Розеном опубликовал вышеупомянутую статью, обсуждение которой привело его к тому, что получило название дилеммы Эйнштейна: «квантовая механика либо неполна, либо нелокальна». Неполнота означает то, что квантовая механика не способна адекватно выразить физическую реальность, относящуюся к её сфере приложения. Иными словами, квантовая механика не имеет статуса фундаментальной тео-

рии: она лишь приближение к более точной и глубокой теории, которая еще не сформулирована. Естественным развитием этой точки зрения была концепция «скрытых переменных»: предположение об еще недоступных измерению и наблюдению параметрах частиц, доопределяющих состояния этих частиц. Сами же эти переменные должны быть распределены по такому статистическому закону, который обеспечивал бы тот вероятностный характер, который свойственен квантово-механическим предсказаниям.

Хотя сам Эйнштейн, как отмечалось, воздерживался от спекуляций на тему «скрытых переменных», некоторые его последователи, например, упоминавшийся выше К. Поппер, прибегли к ним. Но ведь была вторая альтернатива «дилеммы Эйнштейна»: нелокальность. Эта альтернатива означает, что имеется некоторая разновидность дальнего действия: измерение, произведенное над одной из двух частиц, находившихся во взаимодействии, но удалившихся друг от друга на значительное расстояние, оказывается чувствительным для второй из этих частиц. Эйнштейн резко выступал против нелокальности. Он считал, что допущение нелокальности, как бы оно ни соотносилось с принципами теории относительности, подрывает саму идею физического эксперимента и оказывается чем-то родственным телепатии. Однако развитие идей в области интерпретации квантовой механики пошло по линии признания нелокальности. Более того, идея нелокальности была соединена с идеей «скрытых переменных».

Такой фундаментальной инновации способствовали размышления другого критика копенгагенской интерпретации – Э. Шрёдингера. Начав с волновой интерпретации, не выдержавшей критики, он пришел к истолкованию квантовой механики в терминах «возможность» и «виртуальность». Восходящую к Аристотелю идею потенциальной возможности использовали при интерпретации волновой функции и В. Гейзенберг, примыкавший к копенгагенской интерпретации, и В.А. Фок, близкий к ней. Однако у них эта возможность обуславливалась (частичным) переходом в действительность. Переход от возможного к действительному, вызванный актом наблюдения, объяснял явление, обозначенное Гейзенбергом как «редукция волнового пакета»: при измерении волновая

функция, представляющая состояние рассматриваемой системы, «редуцируется» в одно из собственных состояний измеряемой величины, тем самым реализуется одна из возможностей, соответствующих этой волновой функции. У Шрёдингера же возможность очерчивает границу «квантового мира». Шрёдингер отвергал «редукцию волнового пакета» и считал переход возможного в действительное, привлекаемый для объяснения этой «редукции», противоречащим динамике квантовой теории.

При вариационном подходе к классической механике применяют образ бесконечного множества возможных траекторий, из которых одна оказывается реальной. Шрёдингер сохраняет этот образ и в квантовой механике, но подчеркивает, что это будут уже «фиктивные» траектории, «ни одна из которых не имеет преимущества быть осуществленной в каком-либо конкретном случае» [25]. То, что дается нам в наблюдении, объясняется всей совокупностью «траекторий», а не превращением одной из них в «действительную». Фиктивность усугубляется еще и тем обстоятельством, что множество траекторий – один из возможных вспомогательных образов.

Этот «виртуализм» делал естественной холистскую точку зрения, строящуюся на отрицании того, что в предыдущем параграфе было названо «локальностью» (типы холизма могут классифицироваться в соответствии с типами нелокальности). При этом нелокальность, наличествующая в индетерминистическом мире, отличается от той нелокальности, которую постулировали Н. Бор и другие представители копенгагенской школы. Шрёдингер с достаточной ясностью подчеркивал, что частицы в составе ЭПР пары находятся в «спутанном» состоянии, причем это состояние не уничтожается измерением, как то предполагается теми, кто придерживается концепции «редукции волнового пакета». Согласно Бору, импульс у частицы I (речь идет о точном, определенном значении импульса) мгновенно возникает при измерении импульса у удаленной частицы II. Согласно Шрёдингеру, эти частицы изначально обладают коррелированными импульсами, которые проявляются при измерении.

Разумеется, эта картина нуждалась в разработке, которая и была пред-

принята в дальнейшем. Отметим здесь только то, что нелокальность, звучащая диссонансом при детерминистическом взгляде на мир, оказывается не такой уж противоестественной в мире возможностей, предполагаемом Шрёдингером. Воспользуемся примером М. Редхеда [26]. Если я поднял руку и где-то вдалеке пробили часы, то было бы мистицизмом утверждать, что между этими событиями существует связь. Однако если поднятие руки предшествует такому случайному событию, как распад атома радия, то связь уже не столь мистическая. Во всяком случае она менее мистическая, чем та, которую имеет ввиду игрок, поставивший на номер 16 рулетки и проигравший, поскольку выиграл номер 15. Разочарованный игрок думает, что если бы он поставил на 15, то выиграл бы. Истинно индетерминистический мир уникален в каждом из своих состояний, и даже такие ничтожные события, как поднятие руки и ставка в игре в рулетку, создают в нем новую ситуацию.

Высказанные Шрёдингером виртуалистские идеи воплотились в двух современных интерпретациях квантовой механики – интерпретации относительных состояний Х. Эверетта – Б.С. Де Витта и модальной интерпретации (Б. ван Фраассен, Д. Буб, С.А. Кохен и др), которым будет посвящен следующий параграф.

3. Современные тенденции

Копенгагенский подход господствовал почти безраздельно вплоть до конца 60-х годов. Альтернативные интерпретации (волновая интерпретация Шрёдингера, статистическая интерпретация Поппера, выполненная в духе ранних идей Эйнштейна) не были влиятельными. Что же произошло в 60-е годы? Произошел ряд событий, из которых в первую очередь должны быть упомянуты работы Дж. Белла, изменившие сам стиль философии квантовой теории и повысившие интерес к проблеме «скрытых переменных». В 1964 г. Дж. Белл вывел неравенство (неравенство Белла), показавшее, что философские проблемы физики можно решать, полагаясь на математический аппарат и эксперимент. Отсюда не следует, что эти проблемы исчезают. Они становятся тоньше и

дифференцированное, а философские утверждения становятся точно сформулированными посылками, используемыми при доказательствах теорем.

Как отмечалось выше, копенгагенская интерпретация противостояла интерпретациям, допускающим «скрытые переменные». Копенгагенские авторы при этом ссылались на теорему И. фон Неймана о полноте квантовой механики, запрещающей такие «переменные» (1932 г.). Эта теорема, однако, оказалась уязвимым звеном в копенгагенской аргументации. Дж. Белл и некоторые авторы до него подчеркивали, что эта теорема запрещает самые поверхностные и грубые «скрытые переменные», она существенна лишь для тех концепций «скрытых переменных», которые конфликтуют с соотношениями неопределенностей. Дж. Белл однажды назвал их «глупыми» [27]. Более существенной преградой на пути «скрытых переменных» оказывается неравенство Белла, но и оно блокирует лишь класс «локальных скрытых переменных». Еще в 50-е годы Д. Бом развил концепцию «скрытых переменных», для которых неравенство Белла не стало преградой. Согласно Бому, квантовый мир состоит из частиц, которые всегда обладают точными пространственными координатами, и волновой функции, представляемой в виде «ведущего поля», распространяющегося в конфигурационном пространстве в соответствии с уравнением Шрёдингера. Соотношения неопределенностей, однако, выполняются, поскольку взаимодействие с прибором «неконтролируемым образом» изменяет значения физических величин, характеризующих систему. Более того, такое изменение имеет место и при проведении косвенного измерения, описанного А. Эйнштейном, Б. Подольским и Н. Розаном, т.е. в том случае, когда система состоит из двух пространственно разделенных подсистем и прямому измерению подвергается одна из этих подсистем. «Ведущее поле» заставляет удаленную систему мгновенно реагировать на это измерение.

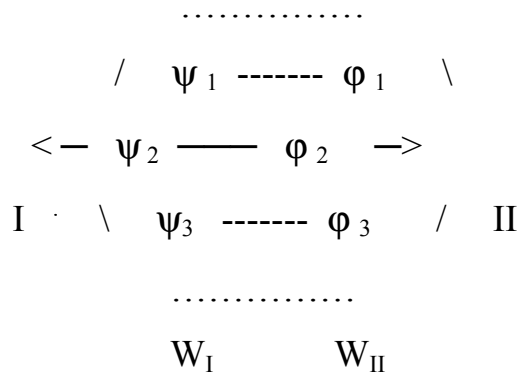
Подытоживая неудачную борьбу копенгагенской интерпретации против «скрытых переменных», ван Фраассен, один из упоминавшихся выше создателей модальной интерпретации, заявил, что всякая интерпретация является интерпретацией со «скрытыми переменными». Ведь всякая интерпретация вносит

нечто дополнительное в теорию, не меняя её эмпирическое содержание. С точки зрения ван Фраассена и копенгагенская интерпретация грешит подключением «скрытой переменной», только этой «скрытой переменной» оказывается «наблюдатель» [28].

С другой стороны, “скрытые переменные”, введенные Бомом, были (в плане их философских коннотаций) шагом назад к классике. Более перспективной философией оказался индетерминистический реализм К. Поппера, представление об объективной реальности случайного мира. Эта философия была изложена в «Постскриптуме к Логике научного исследования», написанном во второй половине 50-х гг. и изданном в 1982 г., а также в ряде статей. Но впрямую философия Поппера не оказала воздействия на интерпретацию квантовой механики. Важными вехами здесь оказались упомянутые в конце предыдущего параграфа многомировая интерпретация (1957 г.) и модальная интерпретация, получившая популярность в 90-е гг. В этих интерпретациях по-новому прозвучало центральное понятие квантовой механики – понятие состояния физической системы. В многомировой интерпретации, наряду с обычным квантовым состоянием, вводится «относительное состояние». Как явствует из самого названия, это понятие характеризует состояние одного из компонентов физической системы в отношении состояния другого компонента. «Вообще говоря, – пишет Хью Эверетт, – не для одной подсистемы сложной системы не существует чего-то подобного индивидуальному состоянию. Подсистемы не имеют состояний, которые были бы независимы от состояний оставшейся части системы, так что состояния систем вообще говоря коррелируют друг с другом. Однако можно произвольно выбрать одно из состояний подсистемы и таким образом получить относительное состояние оставшейся части системы» [29].

Чтобы пояснить сказанное, представим себе простой случай, когда две подсистемы I и II находятся, так сказать, в состоянии взаимно-однозначного соответствия друг с другом. Этот случай реализуется, например, тогда, когда I – система, над которой производится измерение, а II – измерительный прибор, и спектр измеряемой величины только дискретный и невырожденный и измере-

ние воспроизводимо. Схематично ситуацию можно представить себе следующим образом:



Здесь система I + II находится в состоянии $\sum c_n |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle$, а смешанное же состояние подсистемы I (состояние W_I) состоит из чистых состояний $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$, смешанное же состояние системы II (состояние W_{II}) состоит из чистых состояний $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$. Зафиксировав тогда какое-либо из «состояний» подсистемы I, мы получаем «относительное состояние» подсистемы II. Например, для состояния ψ_3 мы получаем состояние ϕ_3 .

С точки зрения Эверетта и его последователей, приведенная схема свидетельствует о том, что наша составная система I+II существует сразу же во множестве миров, причем в каждом из них подсистемы I и II имеют свои особые состояния – «относительные состояния». Соответственно в каждом из этих миров измеряемая физическая величина имеет свое вполне определенное точное значение. «Все элементы суперпозиции (имеется в виду $\sum c_n |I, q_n\rangle |II, \alpha_n\rangle$), – пишет Эверетт, – равно реальны» [30].

Модальная интерпретация названа одним из ее сторонников (Р.А. Хилем) одномировой версией интерпретации относительных состояний Эверетта. В этой интерпретации используются два понятия состояния [31; 32; 33; 34, 35; 36]. Первое – обычное квантовое состояние, выражаемое волновой функцией или матрицей плотности. Если задано это состояние, то определена дальнейшая эволюция системы. Второе – «состояние-свойство (property state)». Это – совокупность величин, дающих максимально возможную информацию о системе. В

терминах модальной интерпретации состояния $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$ и $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$, позволяя приписывать подсистемам I и II те или иные значения рассматриваемой физической величины, характеризуют «состояния-свойства». Существует только один мир, но этот мир индетерминистический. Квантовые состояния W_I и W_{II} определяют поведение систем P и соответственно Q. Они также задают веер «состояний-свойств» $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$ и соответственно $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$, каждое из которых, вообще говоря, случайно (мы можем лишь подсчитать вероятность, с которой каждое из них реализуется). «Многомировая интерпретация Эверетта: индетерминизм – иллюзия, он исчезает, если мы описываем все миры, сосуществующие с нашим миром, – пишет ван Фраассен. – Модальная интерпретация... не отрицает ни детерминизм в эволюции всей системы, ни индетерминизм в исходах опытов. Это два аспекта одной ситуации» [37].

Однако, иллюзорен ли индетерминизм при многомировой интерпретации? Ван Фраассен прав в том отношении, что в каждом из «миров» протекает свой детерминистический процесс, который может быть прослежен вплоть до изменений в «сознании наблюдателя», относящегося к данному «миру». Однако «миры» согласованы лишь статистически и то, что происходит в «нашем мире», не вытекает из того, что имеет место в совокупности «миров», и в этом смысле, случайно.

Выше отмечалась версия копенгагенской интерпретации, трактующая волновые функции как «потенциальные возможности». Эта версия, однако, лишь внешне подобна модальной интерпретации, поскольку использует переход потенциальных возможностей в действительность при описании акта измерения. Модальная интерпретация более близка представлениям Шредингера, ограничивающим «мир» квантовой механики возможным или виртуальным. При модальной интерпретации (как, впрочем, и при многомировой) измерение не связано с переходом состояния системы в собственное состояние измеряемой величины. Измерение не создает то значение величины, которое является результатом измерения. Модальная интерпретация трактует измерение как об-

наружение одного из возможных значений измеряемой величины, или, что тоже самое, одного из состояний-свойств рассматриваемой системы. Эти значения (свойства) существуют до измерения, но существуют как возможности. Квантовое состояние, выражаемое волновой функцией, никак не реагирует на акт измерения, оно лишь определяет (в логическом смысле слова) спектр возможных значений измеряемой величины.

Обычно в физике под состоянием системы понимают такую совокупность ее параметров, которая определяет поведение этой системы. Например, пространственная координата и импульс задают состояние материальной точки, поскольку определяют поведение этой точки при условии отсутствия полей, действующих на нее. Это понятие состояния сохранено в модальной интерпретации в виде понятия квантового состояния. Но в физике присутствует и другое понятие состояния – понятие максимально информативного описания системы, скажем, описание газа с упоминанием его температуры, давления, электропроводности и т.д. Такое понятие состояния использовано в модальной интерпретации под именем состояния-свойства.

Каким образом квантовое состояние системы определяет ее состояния-свойства? Хотя у сторонников модальной интерпретации нет единого ответа на этот вопрос, они, по-видимому, согласились бы, что для двухкомпонентных систем, типа вышеупомянутой системы I+II, таким определителем служит биортогональное разложение волновой функции этой системы, разложение, отвечающее теореме Шмидта. Чтобы записать это разложение для системы I+II, надо следующим образом уточнить предыдущую запись:

$$\Psi = \sum c_n |I, q_n\rangle \otimes |II, \alpha_n\rangle, \quad (*)$$

где Ψ – волновая функция системы, $|I, q_n\rangle$ и $|II, \alpha_n\rangle$ ортогональные системы векторов в гильбертовых пространствах I и соответственно II, \otimes – тензорное произведение. q_n и α_n – состояния-свойства систем I и соответственно II, отвечающие квантовым их состояниям, представляемым матрицами плотности W_I и W_{II} .

В первом параграфе отмечалось, что настоящая, интересная философия науки исходит из философской традиции и приходит к конкретно-научным результатам. В плане философской традиции модальная интерпретация – это observer free интерпретация, т.е. интерпретация, не прибегающая к представлению о наблюдателе. Она возникла в русле тенденции к реалистическому истолкованию квантовой механики [38]. Кроме того, модальная интерпретация исходит из индетерминистического реализма – случай не привносится в природу «наблюдателем», он объективно присущ ей. Каковы же конкретно-научные результаты, принесенные модальной интерпретацией? Первый результат был уже отмечен: модальная интерпретация является «анти-коллапсовской» интерпретацией, она излагает квантовую механику, не прибегая к представлению о «редукции волнового пакета». При этой интерпретации преодолевается дуализм, свойственный представлениям Гейзенберга, Паули, Дирака и фон Неймана, дуализм причинных процессов, описываемых уравнением Шрёдингера, и «редукции волнового пакета», являющей случайность.

Второй результат также очевиден из вышеизложенного – при модальной интерпретации появляются концептуальные средства, позволяющие трактовать состояния составных частей сложной системы. При обычных построениях квантовой механики эти концептуальные средства доставляются приближенными методами. Мы, например, вводим представление о состоянии электрона в многоэлектронном атоме, когда используем одноэлектронное приближение. Модальная интерпретация использует точную терминологию в отношении состояний составных частей системы, терминологию, развивающую и дополняющую математический аппарат квантовой теории.

В некоторых версиях модальной интерпретации возникает идея особой стохастической динамики, дополняющей причинную динамику, выраженную уравнением Шрёдингера. Вернемся к биортогональному разложению волновой функции, представляющей двухкомпонентную систему (*). Запишем его для нестационарного состояния этой системы:

$$\Psi(t) = \sum c_n(t) |I, q_n\rangle \otimes |II, \alpha_n\rangle.$$

В этом случае состояниям-свойствам q_n и α_n приданы вероятности, зависящие от времени.

Стохастическая динамика состояний-свойств – третий результат модальной интерпретации.

Итак, модальная точка зрения – это не «интерпретация интерпретации», а самостоятельная философская позиция, развивающая и обогащающая понятийный аппарат квантовой механики. Она соответствует той характеристике философии науки, которая была дана в начале настоящей статьи, и свидетельствует о дальнейшем развитии этой области знания.

4. Подробнее о модальной интерпретации: сопоставление с ортодоксальной и статистической (ансамблевой) точками зрения

Чтобы сблизить модальную интерпретацию с терминологией «работающего физика», воспользуемся тем подробным анализом проблемы измерения координаты частицы, который провел Л.И. Мандельштам в своих «Лекциях по основам квантовой механики», прочитанных в 1939 г. [39]. Мандельштам исходил в них из статистической (ансамблевой) интерпретации, упоминавшейся выше как интерпретация Поппера, восходящая к идеям Эйнштейна. Мандельштам, правда, не следовал Попперу (вряд ли он даже знал о его работах) и разрабатывал свою версию ансамблевого подхода. В его «Лекциях» присутствовали также элементы ортодоксальной (копенгагенской) точки зрения. В них также можно усмотреть элементы модальной интерпретации (именно элементы, так как модальная интерпретация была сформулирована 40 лет спустя).

Мандельштам следующим образом определяет измерение физической величины R с собственными значениями λ . Мы приводим систему, которая характеризуется величиной R (система I), во взаимодействие с другой системой (система II), у которой мы можем непосредственно измерить величину S , обладающую собственными значениями μ_k . Пусть до взаимодействия системы 1 и 2 находятся в состоянии:

$$\Psi_0(x,y) = \psi_0(x) \varphi_0(y),$$

где переменная x относится к системе I, а переменная y – к системе II. После взаимодействия мы можем представить Ψ в виде разложения по собственным функциям оператора S :

$$\Psi(x,y) = \sum c_i \psi_i(x) \varphi_i(y).$$

Если условия таковы, что при $\psi_0(x) = \psi_i(x)$ после взаимодействия будет

$$\Psi(x,y) = \psi_i(x) \varphi_i(y),$$

то, измеряя состояние системы 2 после взаимодействия, мы можем заключать о состоянии системы 1 до взаимодействия. Требование, чтобы такое соотношение выполнялось, есть требование того, чтобы данная аппаратура являлась измерителем величины R .

По сути дела Мандельштам пользуется более узким определением, позволяющим записывать

$\Psi(x,y)$ как $\Psi(x,y) = \sum c_i \psi_i(x) \varphi_i(y)$ и, соответственно, считать измерением такую ситуацию, когда при $\psi_0(x) = \psi_i(x)$ после взаимодействия будет

$$\Psi(x,y) = \psi_i(x) \varphi_i(y).$$

Мандельштам подробно разбирает измерение координаты частицы при помощи электронного микроскопа. В этом случае R – координата частицы, а S – координата электрона, рассеянного этой частицей и направленного линзой на фотопластинку, иными словами, координата пятна на фотопластинке. При этом Мандельштам показывает, что описываемый им электронный микроскоп не может служить измерителем импульса. Если $\psi_0(x)$ – собственная функция оператора импульса, то $\Psi(x,y)$ не редуцируется к одному из своих слагаемых. Взаимодействие частицы и электрона предстает как возникновение суперпозиции, суммы произведений собственных функций импульсов частицы и электронов. Эта суперпозиция построена таким образом, что в ней не прослеживается однозначного соответствия между импульсами частицы и рассеянных электронов.

Если же $\psi_0(x)$ – собственная функция координаты ($\psi_0(x) = \delta(x-x_0)$), то

возникает суперпозиция иного рода. Путем тождественных преобразований она сводится к произведению $\delta(x-x_0) \delta(y/s -x_0)$, где $\delta(y/s -x_0)$ – тоже собственная функция координаты. Поскольку координату электрона мы можем измерять непосредственно (пятнышко на фотопластинке), то микроскоп служит измерителем координаты.

С точки зрения ортодоксальной (копенгагенской) интерпретации, термин «координата частицы» имеет смысл, поскольку существует устройство (электронный микроскоп), способное измерять координату. Описание этого устройства входит в определение координаты частицы. Понятие же импульс частицы имеет смысл, поскольку существует иное (дополнительное) устройство, способное измерять этот импульс.

При статистической (ансамблевой) интерпретации волновая функция соотносится не с одной частицей, а с ансамблем частиц. В изложении Мандельштама, волновая функция характеризует ансамбль мысленных или реальных опытов, в которых частицы (например, электроны) готовятся в одном и том же квантовом состоянии и производится измерение величин их свойств (координаты, импульса, спина и т.д.). Приготовить множество частиц в одном и том же состоянии значит задать совокупность макропараметров, определяющих «условия опыта». Волновая функция, стало быть, соотносится с множеством опытов, определенных одной и той же совокупностью макропараметров. Каждый из опытов, однако, дает свой результат, обнаруживает свое «поведение» микро-частицы. Пусть, например, в evacuated трубки из накаленной нити, к которой приложено известное напряжение, летят электроны. Если зафиксированы такие макропараметры, как напряжение, температура нити, ее конфигурация, то совокупность электронов обладает определенным квантовомеханическим состоянием, представимым волновой функцией. В каждом из опытов, однако, электрон обнаруживает свое поведение, скажем, попадание в ту или иную точку анода или экрана [40].

Эвакуированная трубка иллюстрирует общий принцип статистической интерпретации. Разбирая теорию электронного микроскопа, Мандельштам рас-

смаатривает ансамбль опытов, в которых макроскопические параметры определяют состояние пары частиц – частицы, чью координату измеряют, и рассеянного на ней электрона. Пока не фиксируется попадание электрона на фотопластинку, мы имеем ансамбль, в котором присутствуют частицы с самыми разными координатами и импульсами [41]. Зафиксировав пятна на фотопластинке, мы отбираем из этого ансамбля подансамбль с определенными значениями координаты электрона и соответственно частицы. Электронный микроскоп служит измерителем координаты. Это значит, что он отбирает подансамбль пар частиц—рассеянных электронов с определенной координатой и, соответственно, тех частиц, на которых электроны рассеиваются и координата которых подлежит определению. Электронный микроскоп не измеряет импульс: в отобранном подансамбле – «импульсы любые» [42].

Модальная интерпретация, как и копенгагенская, трактует квантовую механику как теорию, которая в своей основе является теорией не ансамбля, а одной физической системы. Согласно этой интерпретации, упоминавшаяся выше волновая функция $\Psi(x,y)$ представляет квантовое состояние пары частиц. Воспользовавшись аппаратом матрицы плотности (Мандельштам этого не делает), мы можем ввести квантовые состояния частиц в составе пары. Это будут смешанные состояния. Координата и импульс частицы характеризуют ее состояние-свойство. В противоположность копенгагенской интерпретации, модальная интерпретация наделяет частицы динамическими характеристиками. Эти характеристики, однако, неопределенны: квантовое состояние определяет лишь вероятности тех значений, которые могут приобретать координата и импульс частиц. Фиксация пятна на фотопластинке не означает отбор подансамбля из ансамбля. Состояние пары частиц при этом не меняется: суперпозиция $\sum c_i \psi_i(x) \phi_i(y)$ не переходит в один из своих элементов $\psi_i(x) \phi_i(y)$. Эта фиксация означает, что измерение дало определенную величину для состояния-свойства. Она означает, что мы нашли координату электрона и вычислили координату

частицы, на которой электрон рассеян. Импульсы же электрона и этой частицы остаются по-прежнему неопределенными.

Модальная интерпретация оказывается особенно удобной, когда рассматриваются приближенные измерения. Она хорошо выражает то обстоятельство, что в квантовой механике, в отличие от классики, приближенное знание физической величины – «не минус» [43].

Мандельштам не дает общего определения приближенного измерения. Он лишь модифицирует свою теорию электронного микроскопа, рассматривает микроскоп с конечной апертурой, дающий разброс пятнышек на фотопластинке – координат рассеянных электронов. Здесь уже невозможно однозначно рассчитать координату частицы, на которой происходит рассеяние. Можно, однако, воспользовавшись классической теорией вероятности, рассчитать вероятность того или иного значения этой координаты.

Копенгагенский язык не вполне приспособлен для изложения вопроса о приближенных измерениях. Ведь с копенгагенской точки зрения, физическая величина характеризует частицу тогда и только тогда, когда производится измерение этой величины. Под измерением же имеется в виду процедура, дающая точное значение измеряемой величины. Чтобы осмысленно рассуждать о приближенных измерениях, надо модифицировать копенгагенскую терминологию.

Мандельштам обсуждает приближенные измерения, используя ансамблевую терминологию. Приближенное измерение координаты означает отбор подансамбля, но только более широкого подансамбля, чем в случае точных измерений. На математическом языке это опять же означает переход суперпозиции $\sum c_i \psi_i(x) \varphi_i(y)$ в один из своих элементов $\psi_i(x) \varphi_i(y)$. Но это более «мягкий» переход. «При точных измерениях, – говорит Мандельштам, – сама функция $\psi(x)$ имела смысл только потому, что существует измерительное устройство, дающее точное значение x ... Если я хочу точно измерить x , то, вообще говоря, я должен совершенно разрушить $\psi(x)$. Но нельзя ли пойти на компромисс: ценой не вполне точного знания x исказить $\psi(x)$ не до конца, т.е. так, чтобы ка-

кие-то черты исходного состояния сохранились» [44]. Результат приближенного измерения можно выразить следующей формулой: $\Psi(x,y) = \sum_i c_i \psi_i(x) f(x,y)$, где $f(x,y)$ – расплывчатая функция от x , такая, что в пределах тех значений x , в которых сосредоточены отличные от нуля значения $\psi_i(x)$, $f(x,y)$ почти неизменна, и $\Psi(x,y)$ просто пропорциональна $\sum_i c_i \psi_i(x)$.

В модальной терминологии проблема измерения (речь идет не о рассеянии электронов на частице, координата которой подлежит измерению, а фиксации пятна на фотопластинке и расчете значения координаты) – это проблема состояний-свойств. Частица и электрон обладают не только квантовыми состояниями, но и состояниями свойствами. Они ими обладают до измерения и независимо от измерения. Если приближенно фиксируется координата рассеянного электрона, то приближенно фиксируется и искомая координата частицы (мы можем также посчитать вероятность того или иного значения последней). Приближенное измерение является «мягким», так как мы, измерив координату частицы, можем приближенно фиксировать и ее импульс. В пределах соотношения неопределенностей частица обладает одновременно приближенной координатой и приближенным импульсом.

Мы надеемся, что проведенное обсуждение дало читателю представление о выразительных возможностях модальной интерпретации и позволило сравнивать эти возможности с возможностями копенгагенского и ансамблевого подходов.

Примечания

1. Статья представляет результаты исследования, поддержанного Российским гуманитарным научным фондом (проект № 00-03-00024).
2. Лакатос И. История науки и ее рациональные реконструкции // Структура и развитие науки. М.: Прогресс, 1978. С. 222.
3. Фейерабенд П. Избранные труды по методологии науки. М.: Прогресс, 1986. С. 361.

4. Там же.
5. Smart J.J.C. Quine's philosophy of science // Word and Objections. Ed. by D. Davidson and I. Hintikka. Dordrecht, Boston: D. Reidel, 1975.
6. Речь идет о логико-математической точности. В философии имеется своя точность, которая эксплицируется, скажем, феноменологией.
7. Suppes P. "Models of Data", and "Measurement, Empirical Meaningfulness, and Three – Valued Logic" // Suppes P. Studies in Methodology and Foundations of Science. Dordrecht: Reidel, 1969.
8. Van Fraassen B. The Scientific Image. Oxford: Clarendon Press, 1980. Chapter 3.
9. Динамической переменной может быть, например, проекция спина частицы. Локальность, по Беллу, тогда предполагает, что значение этой переменной у одной частицы не зависит, как ориентированы оси координат у прибора, измеряющего проекцию спина у второй частицы.
10. Readhead M. Incompleteness, Nonlocality and Realism. A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics. Oxford: Clarendon Press, 1989. P. 139-140.
11. Гейзенберг В. Физика и философия. М.: ИЛ, 1963. С. 102-103. Пер. с нем. И.А. Акчурина и Э.П. Андреева.
12. Дышлевый П.С., Свириденко В.М. О принципе наблюдаемости и концепции дополнителности // Методологические проблемы теории измерений. Киев: Наукова думка, 1966.
13. Алексеев И.С. Концепция дополнителности: историко-методологический анализ. М.: Наука, 1978.
14. Фок В.А. Физический смысл волновой функции в квантовой механике // Природа. 1936. № 3.
15. Фок В.А. О так называемых ансамблях в квантовой механике // Вопросы философии. 1952. № 4.
16. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. 1957. Т. 62. Вып. 4.
17. Дышлевый П.С. Объект, субъект и условия познания в физике // Методологические проблемы теории измерений. Киев: Наукова думка, 1966.

- 18.Марков М.А. О природе физического знания // Вопросы философии. 1947. № 2.
- 19.Алексеев И.С. Цит. соч.
- 20.Пахомов Б.Я. Способ применения научного знания, строение теории и принцип дополнительности // Принцип дополнительности и материалистическая диалектика. М.: Наука, 1976. С. 232.
- 21.Паули В. Физические очерки. М.: Наука, 1975. С. 52. Пер. Ю.А. Данилова и А.А. Сазыкина.
- 22.Бор Н. Избранные научные труды. М.: Наука, 1971. Т. 2. С. 186.
- 23.Там же. С. 185.
- 24.Поппер К. Квантовая теория и раскол в физике. М.: Логос, 1998. С. 127. Перевод, послесловие и комментарии А.А. Печенкина.
- 25.Шрёдингер Э. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1967. С. 237.
- 26.Readhead M. Incompleteness, Nonlocality and Realism. A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics. Oxford: Clarendon Press, 1989. P. 92-93.
- 27.Mermin N.D. Hidden Variables and the two theorems of John Bell // Reviews of Modern Physics. 1993. Vol. 65. P. 805.
- 28.Van Fraassen B. Quantum Mechanics. An Empiricist View. Oxford: Clarendon Press, 1991. P. 243.
- 29.Everett H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics // Reviews of Modern Physics. 1957. Vol. 29. № 3. P. 454.
- 30.Everett H. Theory of the Universal Wave Function // The Many World Interpretation of Quantum Mechanics. Princeton University Press, 1973. P. 111.
- 31.Kohen S. A New interpretation of Quantum Mechanics // Symposium on the Foundations of Modern Physics. P. Lahti, P. Mittelstaedi (eds.). Singapore: World Scientific, 1985. P. 151-169.
- 32.Healey R.A. The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive interpretation. Cambridge Univ. Press, 1989.
- 33.Bub J. Interpretating the Quantum World. Cambridge Univ. Press, 1997.

34. Dickson M. Quantum Chance and Nonlocality. Cambridge Univ. Press, 1998.
35. The Modal Interpretation of Quantum Mechanics. D. Dieks and P. Vermaas (eds.). Dordrecht: Kluwer, 1998.
36. Van Fraassen B. Op. cit.
37. Van Fraassen B. Op. cit. P. 273.
38. Надо, однако, заметить, что модальная интерпретация ван Фраассена составляет часть его конструктивного эмпиризма, антиреалистической философской концепции, трактующей теории как описания эмпирически данного. Тем не менее и эта версия модальной интерпретации возникла в противовес копенгагенскому подходу с его ссылкой на наблюдателя при объяснении квантовых состояний. Конструктивный эмпиризм подспудно тоже ссылается на наблюдателя: эмпирически данное – это данное в наблюдении и эксперименте. Однако он исключает ссылку на *специфические действия* наблюдателя – на выбор того или иного экспериментального устройства, на фиксацию какого-либо события, приводящую к "редукции волнового пакета".
39. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. С. 325-388.
40. Там же. С. 333-334.
41. "Пока я ничего не измеряю, я имею $\Psi(x,y)$, где представлены все x и все p ". – Там же. с. 364.
42. Там же.
43. Там же. С. 370.
44. Там же. С. 371-373.