

III. КОПЕНГАГЕНСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Копенгагенская интерпретация квантовой теории начинается с парадокса. Каждый физический эксперимент, безразлично относится ли он к явлениям повседневной жизни или к явлениям атомной физики, должен быть описан в понятиях классической физики. Понятия классической физики образуют язык, с помощью которого мы описываем наши опыты и результаты. Эти понятия мы не можем заменить ничем другим, а применимость их ограничена соотношением неопределенностей. Мы должны иметь в виду ограниченную применимость классических понятий, и не пытаться выходить за рамки этой ограниченности. А чтобы лучше понять этот парадокс, необходимо сравнить интерпретацию опыта в классической и квантовой физике.

Например, в ньютоновской небесной механике мы начинаем с того, что определяем положение и скорость планеты, движение которой собираемся изучать. Результаты наблюдения переводятся на математический язык благодаря тому, что из наблюдений выводятся значения координат и импульса планеты. Затем из уравнения движения, используя эти численные значения координат и импульса для данного момента времени, получают значения координат или какие-либо другие свойства системы для последующих моментов времени. Таким путем астроном предсказывает движение системы. Например, он может предсказать точное время солнечного затмения.

В квантовой теории все происходит по-иному. Допустим, нас интересует движение электрона в камере Вильсона, и мы посредством некоторого наблюдения определили координаты и скорость электрона. Однако это определение не может быть точным. Оно содержит по меньшей мере неточности, обусловленные соотношением неопределенностей, и, вероятно, кроме того, будет содержать еще большие неточности, связанные с трудностью эксперимента. Первая группа неточностей дает возможность перевести результат наблюдения в математическую схему квантовой теории. Функция вероятности, описывающая экспериментальную ситуацию в момент измерения, записывается с учетом возможных неточностей измерения. Эта функция вероятностей представляет собой соединение двух различных элементов: с одной стороны -- факта, с другой стороны -- степени нашего знания факта. Эта функция характеризует фактически достоверное, поскольку приписывает начальной ситуации вероятность, равную единице. Достоверно, что электрон в наблюдаемой точке движется с наблюдаемой скоростью. "Наблюдаемо" здесь означает -- наблюдаемо в границах точности эксперимента. Эта функция характеризует степень точности нашего знания, поскольку другой наблюдатель, быть может, определил бы положение электрона еще точнее. По крайней мере в некоторой степени экспериментальная ошибка или неточность эксперимента рассматривается не как свойство электронов, а как недостаток в нашем знании об электроне. Этот недостаток знания также выражается с помощью функции вероятности.

В классической физике в процессе точного исследования ошибки наблюдения также учитываются. В результате этого получают распределение вероятностей для начальных значений координат и скоростей, и это имеет некоторое сходство с функцией вероятности квантовой механики. Однако специфическая неточность, обусловленная соотношением неопределенностей, в классической физике отсутствует.

Если в квантовой теории из данных наблюдения определена функция вероятности для начального момента, то можно рассчитать на основании законов этой теории функцию вероятности для любого последующего момента времени. Таким образом, заранее можно определить вероятность того, что величина при измерении будет иметь определенное значение. Например, можно указать вероятность, что в определенный последующий

момент времени электрон будет найден в определенной точке камеры Вильсона. Следует подчеркнуть, что функция вероятности не описывает само течение событий во времени. Она характеризует тенденцию события, возможность события или наше знание о событии. Функция вероятности связывается с действительностью только при выполнении одного существенного условия: для выявления определенного свойства системы необходимо произвести новые наблюдения или измерения. Только в этом случае функция вероятности позволяет рассчитать вероятный результат нового измерения. При этом снова результат измерения дается в понятиях классической физики. Поэтому теоретическое истолкование включает в себя три различные стадии. Во-первых, исходная экспериментальная ситуация переводится в функцию вероятности. Во-вторых, устанавливается изменение этой функции с течением времени. В-третьих, делается новое измерение, а ожидаемый результат его затем определяется из функции вероятности. Для первой стадии необходимым условием является выполнимость соотношения неопределенностей. Вторая стадия не может быть описана в понятиях классической физики; нельзя указать, что происходит с системой между начальным измерением и последующими. Только третья стадия позволяет перейти от возможного к фактически осуществляющемуся.

Мы разъясним эти три ступени на простом мысленном эксперименте. Уже отмечалось, что атом состоит из атомного ядра и электронов, которые двигаются вокруг ядра. Также было установлено, что понятие электронной орбиты в некотором смысле сомнительно. Однако вопреки последнему утверждению можно сказать, что все же, по крайней мере в принципе, можно наблюдать электрон на его орбите. Быть может, мы и увидели бы движение электрона по орбите, если бы могли наблюдать атом в микроскоп с большой разрешающей силой. Однако такую разрешающую силу нельзя получить в микроскопе, применяющем обычный свет, поскольку для этой цели будет пригоден только микроскоп, использующий γ -лучи, с длиной волны меньшей размеров атома. Такой микроскоп до сих пор не создан, но технические затруднения не должны нас удерживать от обсуждения этого мысленного эксперимента. Можно ли на первой стадии перевести результаты наблюдения в функцию вероятности? Это возможно, если выполняется после опыта соотношение неопределенностей. Положение электрона известно с точностью, обусловленной длиной волны γ -лучей. Предположим, что перед наблюдением электрон практически находится в покое. В процессе наблюдения по меньшей мере один квант γ -лучей обязательно пройдет через микроскоп и в результате столкновения с электроном изменит направление своего движения. Поэтому электрон также испытает воздействие кванта. Это изменит его импульс и его скорость. Можно показать, что неопределенность этого изменения такова, что справедливость соотношения неопределенностей после удара гарантируется. Следовательно, первый шаг не содержит никаких трудностей. В то же время легко можно показать, что нельзя наблюдать движение электронов вокруг ядра. Вторая стадия -- количественный расчет функции вероятности -- показывает, что волновой пакет движется не вокруг ядра, а от ядра, так как уже первый световой квант выбивает электрон из атома. Импульс γ -кванта значительно больше первоначального импульса электрона при условии, если длина волны γ -лучей много меньше размеров атома. Поэтому уже достаточно первого светового кванта, чтобы выбить электрон из атома. Следовательно, нельзя никогда наблюдать более чем одну точку траектории электрона; следовательно, утверждение, что нет никакой, в обычном смысле, траектории электрона, не противоречит опыту. Следующее наблюдение -- третья стадия -- обнаруживает электрон, когда он вылетает из атома. Нельзя наглядно описать, что происходит между двумя следующими друг за другом наблюдениями. Конечно, можно было бы сказать, что электрон должен находиться где-то между двумя наблюдениями и что, по-видимому, он описывает какое-то подобие траектории, даже если невозможно эту траекторию установить. Такие рассуждения имеют смысл с точки зрения классической физики. В квантовой теории такие рассуждения представляют собой неоправданное злоупотребление языком. В настоящее время мы можем оставить открытым вопрос о том, касается ли это предложение формы высказывания об атомных процессах или самих процессов, то есть касается ли это гносеологии или онтологии. Во всяком случае, при формулировании положений, относящихся к поведению атомных частиц, мы должны быть крайне осторожны.

Фактически мы вообще не можем говорить о частицах. Целесообразно во многих экспериментах говорить о волнах материи, например о стоячей волне вокруг ядра. Такое описание, конечно, будет противоречить другому описанию, если не учитывать границы, установленные соотношением неопределенностей. Этим ограничением ликвидируется противоречие. Применяя понятия "волна материи" целесообразно в том случае, если речь идет об излучении атома. Излучение, обладая определенной частотой и интенсивностью, дает нам информацию об изменяющемся распределении зарядов в атоме; при этом волновая картина ближе стоит к истине, чем корпускулярная. Поэтому Бор советовал применять обе картины. Их он назвал дополнительными. Обе картины, естественно, исключают друг друга, так как определенный предмет не может в одно и то же время быть и частицей (то есть субстанцией, ограниченной в малом объеме) и волной (то есть полем, распространяющимся в большом объеме). Но обе картины дополняют друг друга. Если использовать обе картины, переходя от одной к другой и обратно, то в конце концов получится правильное представление о примечательном виде реальности, который скрывается за нашими экспериментами с атомами.

Бор при интерпретации квантовой теории в разных аспектах применяет понятие дополненности. Знание положения частицы дополнительно к знанию ее скорости или импульса. Если мы знаем некоторую величину с большой точностью, то мы не можем определить другую (дополнительную) величину с такой же точностью, не теряя точности первого знания. Но ведь, чтобы описать поведение системы, надо знать обе величины. Пространственно-временное описание атомных процессов дополнительно к их каузальному или детерминистскому описанию. Подобно функции координат в механике Ньютона, функция вероятности удовлетворяет уравнению движения. Ее изменение с течением времени полностью определяется квантово-механическими уравнениями, но она не дает никакого пространственно-временного описания системы. С другой стороны, для наблюдения требуется пространственно-временное описание. Однако наблюдение, изменяя наши знания о системе, изменяет теоретически рассчитанное поведение функции вероятности.

Вообще дуализм между двумя различными описаниями одной и той же реальности не рассматривается больше как принципиальная трудность, так как из математической формулировки теории известно, что теория не содержит противоречий. Дуализм обеих дополнительных картин ярко выявляется в гибкости математического формализма. Обычно этот формализм записывается таким образом, что он похож на ньютонову механику с ее уравнениями движения для координат и скоростей частиц. Путем простого преобразования этот формализм можно представить волновым уравнением для трехмерных волн материи, только эти волны имеют характер не простых величин поля, а матриц или операторов. Этим объясняется, что возможность использовать различные дополнительные картины имеет свою аналогию в различных преобразованиях математического формализма и в копенгагенской интерпретации не связана ни с какими трудностями. Затруднения в понимании копенгагенской интерпретации возникают всегда, когда задают известный вопрос: что в действительности происходит в атомном процессе? Прежде всего, как уже выше говорилось, измерение и результат наблюдения всегда описывается в понятиях классической физики. То, что выводится из наблюдения, есть функция вероятности. Она представляет собой математическое выражение того, что высказывания о возможности и тенденции объединяются с высказыванием о нашем знании факта. Поэтому мы не можем полностью определить результат наблюдения. Мы не в состоянии описать, что происходит в промежутке между этим наблюдением и последующим. Прежде всего это выглядит так, будто мы ввели субъективный элемент в теорию, будто мы говорим, что то, что происходит, зависит от того, как мы наблюдаем происходящее, или по крайней мере зависит от самого факта, что мы наблюдаем это происходящее. Прежде чем разбирать это возражение, необходимо совершенно точно выяснить, почему сталкиваются с подобными трудностями, когда стараются описать, что происходит между двумя следующими друг за другом наблюдениями. Целесообразно в этой связи обсудить следующий мысленный

эксперимент. Предположим, что точечный источник монохроматического света испускает свет на черный экран, в котором имеются два маленьких отверстия. Поперечник отверстия сравним с длиной волны света, а расстояние между отверстиями значительно превышает длину волны света. На некотором расстоянии за экраном проходящий свет падает на фотографическую пластинку. Если этот эксперимент описывать в понятиях волновой картины, то можно сказать, что первичная волна проходит через оба отверстия. Следовательно, образуются две вторичные сферические волны, которые, беря начало у отверстий, интерферируют между собой. Интерференция произведет на фотографической пластинке полосы сильной и слабой интенсивности -- так называемые интерференционные полосы. Почернение на пластинке представляет собой химический процесс, вызванный отдельными световыми квантами.

Поэтому важно также описать эксперимент с точки зрения представлений о световых квантах. Если бы можно было говорить о том, что происходит с отдельным световым квантом в промежутке между его выходом из источника и попаданием на фотографическую пластинку, то рассуждать можно было бы следующим образом. Отдельный световой квант может пройти или только через первое, или только через второе отверстие. Если он прошел через первое отверстие, то вероятность его попадания в определенную точку на фотографической пластинке не зависит от того, закрыто или открыто второе отверстие. Распределение вероятностей на пластинке будет таким, будто открыто только первое отверстие. Если эксперимент повторить много раз и охватить все случаи, в которых световой квант прошел через первое отверстие, то почернение на пластинке должно соответствовать этому распределению вероятностей. Если рассматривать только те световые кванты, которые прошли через второе отверстие, то почернение будет соответствовать распределению вероятностей, выведенному из предположения, что открыто только второе отверстие. Следовательно, общее почернение должно быть точной суммой обоих почернений, другими словами -- не должно быть никакой интерференционной картины. Но мы ведь знаем, что эксперимент дает интерференционную картину. Поэтому утверждение, что световой квант проходит или через первое, или через второе отверстие, сомнительно и ведет к противоречиям. Из этого примера видно, что понятие функции вероятности не дает пространственно-временного описания события, происходящего в промежутке между двумя наблюдениями. Каждая попытка найти такое описание ведет к противоречиям. Это означает, что уже понятие "событие" должно быть ограничено наблюдением. Этот вывод весьма существен, так как, по-видимому, он показывает, что наблюдение играет решающую роль в атомном событии и что реальность различается в зависимости от того, наблюдаем мы ее или нет. Чтобы сделать это утверждение более ясным, проанализируем процесс наблюдения.

Уместно вспомнить, что в естествознании нас интересует не Универсум в целом, включающий нас самих, а лишь определенная его часть, которую мы и делаем объектом нашего исследования. В атомной физике обычно эта сторона представляет собой чрезвычайно малый объект, именно атомные частицы или группы таких частиц. Но дело даже не в величине; существенно то, что большая часть Универсума, включая и нас самих, не принадлежит к предмету наблюдения. Теоретическое истолкование эксперимента начинается на уровне обеих стадий, о которых уже говорилось. На первой стадии дается описание эксперимента в понятиях классической физики. Это описание в конечном счете связывается на данной стадии с первым наблюдением, и затем описание формулируется с помощью функции вероятности. Функция же вероятности подчиняется законам квантовой механики, ее изменение с течением времени непрерывно и рассчитывается с помощью начальных условий. Это вторая стадия. Функция вероятности объединяет объективные и субъективные элементы. Она содержит утверждения о вероятности или, лучше сказать, о тенденции (потенция в аристотелевской философии), и эти утверждения являются полностью объективными. Они не зависят ни от какого наблюдения. Кроме этого, функция вероятности содержит утверждения относительно нашего знания системы, которое является субъективным, поскольку оно может быть различным для различных наблюдателей. В

благоприятных случаях субъективный элемент функции вероятности становится пренебрежительно малым в сравнении с объективным элементом, тогда говорят о "чистом случае".

При обращении к следующему наблюдению, результат которого предсказывается из теории, важно выяснить, находился ли предмет до или по крайней мере в момент наблюдения во взаимодействии с остальной частью мира, например с экспериментальной установкой, с измерительным прибором и т. п. Это означает, что уравнение движения для функции вероятности содержит влияние взаимодействия, оказываемое на систему измерительным прибором. Это влияние вводит новый элемент неопределенности, поскольку измерительный прибор описывается в понятиях классической физики. Такое описание содержит все неточности в отношении микроскопической структуры прибора, известные нам из термодинамики. Кроме того, так как прибор связан с остальным миром, то описание фактически содержит неточности в отношении микроскопической структуры всего мира. Эти неточности можно считать объективными, поскольку они представляют собой простое следствие того, что эксперимент описывается в понятиях классической физики, и поскольку они не зависят в деталях от наблюдателя. Их можно считать субъективными, поскольку они указывают на наше неполное знание мира. После того как произошло взаимодействие, даже в том случае, если речь идет о "чистом случае", функция вероятности будет содержать объективный элемент тенденции или возможности и субъективный элемент неполного знания. Именно по этой причине результат наблюдения в целом не может быть точно предсказан. Предсказывается только вероятность определенного результата наблюдения, и это утверждение о вероятности может быть проверено многократным повторением эксперимента. Функция вероятности в отличие от математической схемы механики Ньютона описывает не определенное событие, а, по крайней мере в процессе наблюдения, всю совокупность (ансамбль) возможных событий. Само наблюдение прерывным образом изменит функцию вероятности: оно выбирает из всех возможных событий то, которое фактически совершилось. Так как наше знание под влиянием наблюдения изменяется прерывно, то и величины, входящие в его математическое представление, изменяются прерывно, и потому мы говорим о "квантовом скачке". Если кто попытается строить критику квантовой теории на основе старой поговорки: "Natura non facit saltus", то на это можно дать ответ, что наше знание, несомненно, изменяется прерывно. Именно этот факт -- прерывное изменение нашего знания -- оправдывает употребление понятия "квантовый скачок". Следовательно, переход от возможности к действительности совершается в процессе наблюдения. Если мы будем описывать, что происходит в некотором атомном событии, то должны будем исходить из того, что слово "происходит" относится только к самому наблюдению, а не к ситуации между двумя наблюдениями. При этом оно означает не психологический, а физический процесс наблюдения, и мы вправе сказать, что переход от возможности к действительности совершился, как только произошло взаимодействие объекта с измерительным прибором, а с помощью прибора -- и с остальным миром. Этот переход не связан с регистрацией результата наблюдения в сознании наблюдателя. Однако прерывное изменение функции вероятности происходит благодаря акту регистрации, так как в этом случае вопрос касается прерывного изменения нашего знания. Последнее в момент наблюдения отражается прерывным изменением функции вероятности. В какой мере мы пришли в конце концов к объективному описанию мира и особенно атомных явлений? Классическая физика основывалась на предположении -- или, можно сказать, на иллюзии, -- что можно описать мир или по меньшей мере часть мира, не говоря о нас самих. Действительно, в значительной степени это было возможно. Например, мы знаем, что существует город Лондон независимо от того, видим мы его или нет. Можно сказать, что классическая физика дает именно идеализацию мира, с помощью которой можно говорить о мире или о его части, при этом не принимая во внимание нас самих. Ее успех привел к всеобщему идеалу объективного описания мира. Давно уже объективность является высшим критерием ценности научных открытий. Соответствует ли этому идеалу копенгагенская интерпретация квантовой теории? По всей вероятности, мы вправе сказать, что насклонно возможно, квантовая теория соответствует этому идеалу. Безусловно, квантовая теория не

содержит никаких действительно субъективных черт, и она вовсе не рассматривает разум или сознание физика как часть атомного события. Но она начинает с разделения мира на объекты и остальной мир и с условия, что этот остальной мир описывается в понятиях классической физики. Само разделение в определенной степени произвольно. Но исторически оно является прямым следствием научного метода прошлых столетий. Применение классических понятий есть, следовательно, в конечном счете результат общего духовного развития человечества. В некотором роде это затрагивает нас самих, и потому наше описание нельзя назвать совершенно объективным.

Вначале говорилось, что копенгагенская интерпретация квантовой теории начинается с парадокса. Она исходит, с одной стороны, из положения, что мы должны описывать эксперименты в понятиях классической физики, и с другой -- из признания, что эти понятия не точно соответствуют природе. Противоречивость этих исходных положений обуславливает статистический характер квантовой теории. В силу этого предлагали совсем отказаться от классических понятий, рассчитывая, по-видимому, что радикальное изменение понятий, описывающих эксперимент, приведет к нестатистическому, полностью объективному описанию природы. Однако эти соображения основываются на непонимании. Понятия классической физики являются уточненными понятиями нашей повседневной жизни и образуют важнейшую составную часть языка, являющегося предпосылкой всего естествознания. Наше действительное положение в естествознании таково, что для описания эксперимента мы фактически используем или должны использовать классические понятия. Иначе мы не поймем друг друга. Задача квантовой теории как раз и состоит в том, чтобы на этой основе объяснить эксперимент. Нет смысла толковать, что можно было бы предпринять, если бы мы были другой природы по сравнению с тем, что мы есть на самом деле. В этой связи мы должны отчетливо понимать, говоря словами Вейцеккера, что "природа была до человека, но человек был до естествознания". Первая половина высказывания оправдывает классическую физику с ее идеалами полной объективности. Вторая половина объясняет, почему мы не можем освободиться от парадоксов квантовой теории и от необходимости применения классических понятий. При этом следует сделать несколько замечаний о фактическом методе квантово-теоретического истолкования атомных событий. Ранее отмечалось, что мы всегда стоим перед необходимостью разделять мир на объекты, подлежащие изучению, и остальной мир, включающий и нас самих. Это разделение в определенной степени произвольно. Однако это не должно приводить к различию в конечных результатах. Например, объединим измерительный прибор или его часть с объектом и применим закон квантовой теории к этому более сложному объекту. Можно показать, что подобное видоизменение теоретического подхода фактически не изменяет предсказания о результате эксперимента. Это математически следует из того, что законы квантовой теории для явлений, в которых постоянная Планка считается очень малой величиной, почти идентичны с классическими законами. Однако было бы ошибкой полагать, что такое применение законов квантовой теории может исключить фундаментальные парадоксы.

Только тогда измерительный прибор заслуживает своего назначения, когда он находится в тесной связи с остальным миром, когда существует физическое взаимодействие между измерительным прибором и наблюдателем. Поэтому неточность в отношении микроскопического поведения мира, так же как и в случае первой интерпретации, проникает в квантово-механическое описание мира. Если бы измерительный прибор был изолирован от остального мира, он не мог быть описан в понятиях классической физики.

По этому поводу Бор утверждал, что, по всей вероятности, правильнее было бы сказать по-другому, а именно: разделение мира на объекты и остальной мир не произвольно. При исследовании атомных процессов наша цель -- понять определенные явления и установить, как они следуют из общих законов. Поэтому часть материи и излучения, которая принимает участие в явлении, представляет собой естественный

предмет теоретического истолкования и должна быть отделена от используемого прибора. Тем самым в описание атомных процессов снова вводится субъективный элемент, так как измерительный прибор создан наблюдателем. Мы должны помнить, что то, что мы наблюдаем, -- это не сама природа, а природа, которая выступает в том виде, в каком она выявляется благодаря нашему способу постановки вопросов. Научная работа в физике состоит в том, чтобы ставить вопросы о природе на языке, которым мы пользуемся, и пытаться получить ответ в эксперименте, выполненном с помощью имеющихся у нас в распоряжении средств. При этом вспоминаются слова Бора о квантовой теории: если ищут гармонии в жизни, то никогда нельзя забывать, что в игре жизни мы одновременно и зрители и участники. Понятно, что в научном отношении к природе наша собственная деятельность становится важной там, где приходится иметь дело с областями природы, проникнуть в которые можно только благодаря сложнейшим техническим средствам.