

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ*

Введение

Квантовая механика давно стала привычным рабочим инструментом для исследователей в самых разных областях физики, однако концептуальные вопросы, которые впервые были поставлены еще в пору ее создания, до сих пор являются предметом дискуссий. Общеизвестными примерами являются так называемый парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) и парадокс «шредингеровского кота». Нерешенные концептуальные вопросы квантовой механики часто объединяют под именем «проблемы измерения». Они не имеют вполне ясной и однозначной формулировки и порой разными авторами преподносятся по-разному. Более того, существует вполне разумное мнение, разделяемое многими квалифицированными и опытными специалистами, что никаких концептуальных проблем в квантовой механике не существует. Типичная оценка такого рода обсуждений состоит в замечании, что это скорее не физика, а уже некоторая «философия».

В последние годы, однако, отношение к концептуальным проблемам квантовой механики быстро меняется. Несмотря на то, что они интенсивно обсуждались в период становления квантовой механики (например, обзор и перепечатки классических статей в [1]) и во все времена систематически освещались в учебниках, этим проблемам в настоящее время посвящена обширная литература. При этом они обсуждаются гораздо более детально и конкретнее, чем раньше [2, 3]. Более того, старые, известные со 30-х годов, вопросы получают новые формулировки, для ответа на них ставятся специальные эксперименты и в ходе их обсуждения возникают новые приложения квантовой механики.

Процесс измерения в квантовой механике, в отличие от классической, обладает очень существенной особенностью – он всегда

* Данный материал подготовлен к публикации В.Г. Киселевым (НГУ).

оказывает воздействие на подвергаемую измерению частицу, и это воздействие при данной точности измерения принципиально не может быть сделано сколь угодно слабым. В какой-то степени такое положение вещей обусловлено соотношением неопределенности и тем, что квантовая механика описывает микромир. Чем точнее измерение, тем сильнее оказываемое им воздействие, и лишь при измерениях очень малой точности воздействие на объект может быть очень слабым. Измерение само по себе неизбежно изменяет динамические переменные частицы. Разграничение наблюдения и некоей собственной «эволюции системы» рассматривалось многими видными учеными. Так, В.А. Фок предлагал различать в структуре реального эксперимента в квантовой механике «три стадии: приготовление объекта, поведение объекта в фиксированных внешних условиях, которое только и является предметом описания квантово-механической теории и собственно измерение» [4]. Граница между этими элементами подвижна. Можно усложнить теоретическую часть за счет включения в нее части измерительной составляющей (этим занимается теория измерений). В настоящее время существуют различные точки зрения по данному вопросу, вплоть до крайних, например, утверждающих, что всю измерительную часть, включающую процедуру сравнения с эталоном, включить в теорию принципиально нельзя [5].

Проблема редукции волнового пакета.

Воздействие измерения на изучаемую систему и роль измерения в квантовой механике впервые подробно изучались Нильсом Бором. Работы Бора и его последователей составляют основу общепринятой сегодня «копенгагенской интерпретации» квантовой механики. Суть данного подхода состоит в существовании при измерении в квантовой механике явления «редукции волновой функции».

Один из общепринятых в настоящее время путей, на котором возникает явление редукции волновой функции, выглядит так. Пусть измеряется какая-либо величина, например, положение частицы в плоскости экрана (фотопластинки), и этой величине отвечает оператор A , причем прибор показал некоторый результат a_1 . Тогда на языке квантовой теории это явление описывается как мгновенное изменение волновой функции системы от $|\Psi\rangle = \sum_k c_k |a_k\rangle$ (началь-

ное состояние системы является суперпозицией некоторого числа векторов, которые соответствуют всем возможным результатам измерения к $|a_1\rangle$ с вероятностью $|c_1|^2$ (в соответствии с правилами Борна). Все остальные слагаемые исчезают, и именно в этом состоит «редукция», или «коллапс» волновой функции.

Редукция состояния перестраивает это состояние таким образом, чтобы оно полностью соответствовало результату измерения. Видно, что до измерения состояние не соответствует ни одному из возможных альтернативных результатов измерения. Именно это имеется в виду, когда говорят, что свойство, обнаруженное при измерении, может не существовать до измерения. В классической физике такого, разумеется, не может быть. Редукцию можно описать также как селекцию альтернативы – фиксацию одного из всех возможных альтернативных результатов измерения. Например, если до измерения волновая функция частицы отлична от нуля в широкой области, то после измерения положения частицы ее волновая функция отлична от нуля лишь в узкой области, соответствующей полученному результату измерения. Это значит, что произошла редукция состояния частицы, в данном случае нелокализованная частица стала локализованной.

Причина возникновения редукции кроется во взаимодействии исследуемого объекта с измерительным прибором, характерной особенностью которого является «классичность», которая характеризуется отсутствием для прибора состояний суперпозиции. В каждый момент времени «показание прибора» имеет некоторое, строго определенное значение. «Классичность» прибора обусловлена, как правило, наличием у него макроскопического числа степеней свободы. Для пояснения этого факта рассмотрим простой пример. Пусть квантовая система находится в состоянии $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$. Пусть эта система провзаимодействовала с некоторой другой системой α . При заданном начальном состоянии системы $|\alpha_0\rangle$ результат взаимодействия зависит от состояния системы $|\psi\rangle$. Будем рассматривать лишь такое взаимодействие, которое приводит к различению между состояниями $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ и при этом не меняет этих состояний. Именно такое взаимодействие характерно для ситуаций, которые можно назвать измерением (в данном случае это измерение,

характеризуемое проекторами $|\psi_1\rangle\langle\psi_1|$ и $|\psi_2\rangle\langle\psi_2|$). «Различение» означает, что конечные состояния системы $|\alpha\rangle$, соответствующие начальным состояниям $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ системы $|\psi\rangle$, различны. Переход, вызванный таким взаимодействием, можно описать как

$$|\psi_1\rangle|\alpha_0\rangle \rightarrow |\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle, \quad |\psi_2\rangle|\alpha_0\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle.$$

Здесь стрелка заменяет действие унитарного оператора, описывающего эволюцию. Но тогда в силу линейности этого оператора начальное состояние $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ системы $|\psi\rangle$ вызовет переход

$$(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\alpha_0\rangle \rightarrow c_1|\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle.$$

Предположим теперь, что взаимодействие захватывает большее число систем (или степеней свободы) $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \omega$. При этом исходная (измеряемая) система $|\psi\rangle$ не обязательно взаимодействует с каждой из этих систем. Она может взаимодействовать лишь с некоторыми из них, а далее уже эти провзаимодействовавшие с $|\psi\rangle$ системы могут взаимодействовать с остальными (и друг с другом). Важно лишь, что так или иначе информация о состоянии системы $|\psi\rangle$ будет «записана» в состояниях всех остальных рассматриваемых систем. По-прежнему мы будем предполагать, что состояние системы $|\psi\rangle$ не меняется, а состояния остальных систем зависят от этого состояния таким образом, что они различают между состояниями $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$. Это значит, что в результате взаимодействия происходит переход

$$(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle)|\alpha_0\rangle|\beta_0\rangle|\gamma_0\rangle\dots|\omega_0\rangle \rightarrow c_1|\psi_1\rangle|\alpha_1\rangle|\beta_1\rangle|\gamma_1\rangle \\ x\dots|\omega_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|\alpha_2\rangle|\beta_2\rangle|\gamma_2\rangle\dots|\omega_2\rangle$$

Если число систем, участвующих во взаимодействии, макроскопически велико, то возникает так называемое «запутывание» системы $|\psi\rangle$ с макроскопической системой A , и образуется суперпозиция двух различных состояний макроскопической системы. Состояния, входящие в суперпозицию, макроскопически различимы в том смысле, что огромное число степеней свободы в них описываются различными волновыми функциями. Итак, процесс, происходящий в ходе измерения, переводит исходное факторизованное состояние системы и ее окружение в сцепленное состояние:

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle|A_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle|A_2\rangle.$$

Это чистое состояние, поэтому оно может быть выражено вектором состояния (волновой функцией). Но мы можем выразить его и в форме матрицы плотности:

$$R = |\Psi\rangle\langle\Psi|$$

Если нас интересует лишь состояние системы $|\psi\rangle$ (но не ее окружения A), то описать это состояние можно так называемой редуцированной матрицей плотности, которая равна следу матрицы R по степеням свободы окружения:

$$\rho = \text{tr}_A R = |c_1|^2|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |c_2|^2|\psi_2\rangle\langle\psi_2| + c_2^*c_1\langle A_2|A_1\rangle|\psi_1\rangle\langle\psi_2| + c_1^*c_2\langle A_1|A_2\rangle|\psi_2\rangle\langle\psi_1|$$

Состояния $|A_1\rangle$ и $|A_2\rangle$ макроскопически различимы, т.е. отличаются друг от друга в огромном числе степеней свободы. В обозначениях, введенных выше, $|\alpha_1\rangle$ отличается от $|\alpha_2\rangle$, $|\beta_1\rangle$ отличается от $|\beta_2\rangle$ и так далее. Поэтому скалярные произведения $\langle\alpha_1|\alpha_2\rangle$, $\langle\beta_1|\beta_2\rangle$,... по модулю меньше единицы (не говоря уже о том, что какое-либо из них может оказаться нулевым). Следовательно, произведение этих чисел $\langle A_1|A_2\rangle$ практически равно нулю, и соответствующие перекрестные члены (так называемые фазовые элементы

матрицы плотности), отвечающие за наличие квантовой когерентности, исчезают. Таким образом, именно макроскопичность тел обуславливает отсутствие у них когерентных состояний.

Различные интерпретации квантовой механики

Предположение о редукции, происходящей в момент измерения, было введено в квантовую механику ее основателями, прежде всего Нильсом Бором и Джоном фон Нейманом, чтобы формально описать то, что происходит при взаимодействии квантовой системы с измерительным прибором, с помощью которого наблюдатель получает информацию об этой системе. Редукция квантовой системы при измерении позволяет правильно рассчитывать результаты измерений, и в этом смысле корректность этого понятия не подлежит сомнению. С практической точки зрения никакой проблемы нет: понятие редукции позволяет правильно выполнить любой расчет, все предсказания, полученные на основании таких расчетов, подтверждаются. С точки зрения стандартных требований, предъявляемых к физической теории, квантовая механика, дополненная постулатом о редукции состояния при измерении, полна и не требует никакой существенной переработки. В то же время с момента возникновения квантовой механики активно обсуждались возникающие в ней концептуальные проблемы, большая часть которых связана с процедурой измерения и понятием редукции. Эти обсуждения не только не закончились в наше время, но даже активизировались в последние два десятилетия.

В частности, всегда были физики, которые считали, что редукция является «чужеродным» элементом, что это понятие искусственно привнесено в квантовую физику, чтобы совместить ее с классическими законами, которым, казалось бы, должны подчиняться макроскопический прибор и тем более наблюдатель. Почему понятие редукции кажется искусственным? Дело в том, что измерительный прибор, используемый при измерении, а также глаз, нервы и мозг наблюдателя, фиксирующие результат измерения, состоят из квантовых атомов и, значит, сами являются квантовыми системами. Следовательно, они подчиняются законам квантовой механики, тогда как классическое описание их поведения является приближенным. Согласно законам квантовой механики (уравнению Шредингера) никакие взаимодействия

системы, в том числе с прибором и наблюдателем, не могут привести к редукции (то есть к устранению всех слагаемых суперпозиции, кроме одной, см. описание редукции, данное выше). Таким образом, если рассуждать строго логически, редукция невозможна. Вместо этого состояние всего комплекса, состоящего из измеряемой системы, прибора и наблюдателя, должно описываться как суперпозиция (сумма) состояний, соответствующих различным альтернативным результатам измерения. Итак, рассматривая и измеряемую систему, и измерительный прибор, и наблюдателя как квантовые системы, мы приходим к выводу, что полная система (включающая все эти части) остается в состоянии, в котором отражены все возможные альтернативные результаты измерения. Редукция, то есть выбор одной альтернативы, произойти не может. В то же время выбор одной альтернативы заведомо имеет место, когда наблюдатель осознает, какой результат дало измерение. Эта парадоксальная ситуация, выявляемая известными парадоксами «кота Шредингера» и аналогичным по сути «друга Вигнера», дает повод некоторым исследователям утверждать, что вводимое в квантовой механике понятие редукции (селекции) имеет непосредственное отношение к сознанию наблюдателя.

Попытки снять это противоречие, решить парадоксы квантовой механики, никогда не прекращались и до сих пор не привели к общепринятому решению. Стоящая при этом проблема носит название проблемы измерения. В поисках ее решения предлагались различные интерпретации квантовой механики. Еще раз следует отметить, что эта проблема возникает не из-за того, что теория неудовлетворительно описывает эксперимент, а из-за желания некоторых физиков сделать эту теорию логически более последовательной. Поэтому другие физики склонны считать проблему измерения надуманной, схоластической. Однако среди тех, кто активно искал решение этой проблемы, были практически все основатели квантовой механики, а в наше время вопросы, связанные с проблемой измерения, вызывают чрезвычайно большой интерес у гораздо более широкого круга физиков. Среди них такие выдающиеся исследователи, как Джон Арчибальд Уилер, Роджер Пенроуз, Дитер Цее, Давид Дойч. Обычно о различных подходах к решению концептуальных проблем квантовой механики и прежде всего проблемы измерения говорят как о различных интерпретациях квантовой механики. Были созданы несколько интерпретаций, которые претендуют на более высокий уровень фундаментальности, чем обычная квантовая

теория, самые известные из них – это квантовая механика Давида Боме, теория совместных квантовых историй, многомировая интерпретация квантовой механики.

Кроме того, существуют попытки модифицировать уравнение Шредингера включением стохастического члена, описывающего спонтанную декогеренцию [6]. Таким образом, декогеренция в этой теории не является следствием взаимодействия системы с окружением, а время от времени происходит спонтанно без всякого внешнего влияния и становится, таким образом, одним из фундаментальных законов природы. Параметры модифицированного уравнения Шредингера подбираются так, чтобы его предсказания на микроскопическом уровне согласовывались с предсказаниями квантовой механики, но на макроскопическом уровне приводили к отсутствию суперпозиций макроскопически различимых состояний. Однако попытки такого рода представляются весьма сомнительными. Введение в фундаментальное микроскопическое уравнение подобных членов физически никак не оправданно, кроме того, при имеющемся в настоящее время многообразии экспериментальных данных о свойствах и эволюции различных когерентных состояний представляется практически невозможным подобрать нужным образом параметры. Как бы то ни было, такую теорию при фиксированных параметрах всегда можно проверить экспериментально, и предложенные уже варианты теории, видимо, будут проверены в ближайшие годы.

Еще в 50-е годы Д. Бом развил концепцию «скрытых параметров» [7]. 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 Шредингера (в чем-то это идея перекликается с развиваемой в поздних работах Луи де Бройля теорией «волны-пилота»). 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 Эйнштейном, Подольским и Розеном, 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.

Теория совместных квантовых историй [8,9] опирается на картину эволюции квантовой системы, напоминающую фейнмановский интеграл по путям. У Фейнмана амплитуда распространения представляется как сумма (интеграл) амплитуд, соответствующих различным путям, ведущим из начальной точки к конечной. В теории совместных историй полная амплитуда представляется как сумма амплитуд, соответствующих различным «квантовым историям». Каждую историю можно (несколько упрощенно) представить как пучок фейнмановских путей. Далее ставится вопрос о том, в каком случае с таким пучком путей (с квантовой историей) можно корректно ассоциировать не только амплитуду вероятности, но и вероятность. Оказывается, это можно сделать, если пучок путей является достаточно широким. Более конкретно, выводится условие, необходимое для корректного введения вероятностей. Оно называется условием совместности квантовых историй. Такие достаточно широкие пучки путей (совместные истории) можно рассматривать как описывающие классическое движение.

Теория совместных историй показывает, следовательно, как классические черты эволюции возникают из чисто квантового описания системы. В данном случае квантовая система предполагается замкнутой. Если в рамках такой теории мы описываем измерение, то рассмотрение включает и измеряемую систему, и измерительный аппарат. Теория совместных историй позволяет сформулировать необходимое условие появления классических черт – это условие совместности историй (в работе [10] показано, что это условие не является достаточным).

Самый радикальный (но и наиболее критикуемый) вариант углубления теории – это так называемая многомировая интерпретация квантовой механики, предложенная в 1957 г. Эвереттом и развитая Уилером [11, 12]. Иногда она называется интерпретацией Эверетта – Уилера. В этом подходе рассматривается замкнутая система, включающая и измеряемую подсистему, и прибор, и наблюдателя (словом, всю Вселенную, весь мир). Для иллюстрации идей и методов, лежащих в основе разнообразных интерпретаций квантовой механики, а также ввиду ее крайней необычности, остановимся на этой теории чуть более подробно.

В ней все возможные результаты измерения квантовой системы рассматриваются наравне. Отвергается обычное представление, будто лишь один из возможных результатов реализуется, а остальные явля-

ются потенциальными возможностями, которые остаются нереализованными. Эта интерпретация предполагает, что редукция вообще не происходит (в сумме векторов, о которой говорилось выше, сохраняются все слагаемые). То явление, которое описывается как редукция вектора состояния, является лишь кажущимся, т.е. связана с сознанием наблюдателя. Согласно интерпретации Эверетта, каждая из компонент суперпозиции описывает целый мир, и ни одна из них не имеет преимущества перед другой. Имеется столько миров, сколько альтернативных результатов имеет рассматриваемое измерение. В каждом из этих миров имеется и измеряемая система, и прибор, и наблюдатель. И состояние системы, и состояние прибора, и сознание наблюдателя в каждом из этих миров соответствует лишь одному результату измерения, но в разных мирах результаты измерения различны. Различные (классически несовместимые) картины мира сосуществуют в квантовом мире, и лишь в сознании наблюдателя появляется единственная классическая картина мира. Для наглядности говорят о том, что существуют различные классические миры (эвереттовские параллельные миры), из которых сознание индивидуального наблюдателя воспринимает лишь один. Впрочем, такая формулировка иногда может вводить в заблуждение, и ее нужно поверять формулировкой в терминах суперпозиции и составляющих ее слагаемых.

Соответственно, декогеренции не происходит, и нет никакой причины для того, чтобы суперпозиция альтернативных чистых состояний превратилась в смешанное состояние.

Таким образом, если в теории декогеренции возможны разные результаты измерения, но реализуется (с соответствующей вероятностью) лишь один из них, то в интерпретации Эверетта одинаково реальны все результаты измерения, но реализуются они в разных мирах. Заметим, что в интерпретации Эверетта проблема выбора (селекции) результата измерения все же существует, она лишь иначе формулируется. Вопрос: «Какой из результатов измерения реализуется?» – теперь не стоит, потому что одинаково реальны все результаты. Зато появляется вопрос: «В каком из эвереттовских миров оказался данный наблюдатель?»

В более наглядной формулировке, предложенной Уилером, в момент квантового измерения перед наблюдателем как бы оказывается железнодорожная стрелка, и его поезд может пойти в одном из нескольких направлений. В зависимости от того, в каком направлении пойдет поезд, наблюдатель увидит тот или иной результат

измерения. Возможные направления поезда соответствуют альтернативным результатам измерения или различным эвереттовским мирам. Поезд всегда пойдет лишь по одному из направлений, но все остальные столь же реально существуют, и в других направлениях то же измерение дает другие результаты.

Может возникнуть одно возражение против такой гипотезы. Почему результаты измерения выбираются с разными вероятностями, именно с теми, которые предсказывает квантовая механика? Оказывается, что в теории Эверетта показывается, что среди всех параллельных миров есть тождественные (т.е. такие, в которых все подсистемы имеют одно и то же состояние). При этом мир некоторого определенного типа встречается тем чаще, чем больше квантовая механическая вероятность соответствующей альтернативы.

Таким образом, в интерпретации Эверетта – Уилера трудный вопрос о селекции, т.е. о выборе одного из множества альтернативных результатов измерения, по крайней мере освещается с иной точки зрения.

Общепринятая теория измерений в открытых системах учитывает влияние окружения на систему, хотя конкретная модель окружения не включается в описание. Основные выводы из такой теории следующие:

- с точки зрения физики полна, так как может включать любую часть Вселенной, за исключением, быть может, каких-то глубоких структур в мозгу, в которых отображается информация о результате измерения;

- не содержит парадоксов (приводит к смешанным состояниям, а не к суперпозициям);

- может описывать выбор альтернативного результата измерения (селекцию) лишь феноменологически, механизм выбора не обсуждается.

Упомянутое в последнем пункте феноменологическое описание селекции можно формализовать в случае мгновенного (в реальности – пренебрежимо малой длительности) измерения постулатом редукции фон Неймана, а в случае непрерывного измерения – ограниченным интегралом по путям или мнимым потенциалом.

Такое описание селекции решает, разумеется, все практические задачи. Однако с концептуальной точки зрения именно то, что в теории открытых систем селекция описывается феноменологически, можно воспринимать как слабый пункт, требующий поиска более полной или более фундаментальной теории. По-видимому, такая теория должна базироваться на рассмотрении таких замкнутых систем, когда модель

окружения фигурирует в теории в явном виде. Однако, стремясь описать измерение в терминах замкнутой системы, мы вынуждены все дальше и дальше отодвигать границы рассматриваемой системы, так что в конце концов она начинает захватывать органы чувств наблюдателя и те структуры в его мозгу, которые ответственны за отображение информации о результате измерения.

Если хотя бы одна такая структура останется вне того, что мы включаем в измеряемую систему, то возникает декогеренция, в результате которой мы избавляемся от парадоксальной суперпозиции различных состояний, но зато селекция (выбор) одной из альтернатив описывается лишь феноменологически, но не вскрывается ее механизм.

Если же включить в рассматриваемую систему все степени свободы, в которых могла бы быть отражена информация об альтернативе (переходим к теории замкнутой системы), то декогеренции не происходит, в силу чего: остается суперпозиция и по-прежнему не видно никакого механизма селекции одной из альтернатив (в данном случае – одной из компонент суперпозиции).

В интерпретации Эверетта предполагается, что селекция вообще никогда не происходит: все альтернативы одинаково реальны. Однако одно обстоятельство убеждает, что выбор все же всегда делается: в реальном опыте каждый экспериментатор имеет дело лишь с одной альтернативой. Открывая ящик со шредингеровским котом, любой экспериментатор увидит либо живого, либо мертвого кота.

Таким образом, пытаясь оставаться в рамках обычных физических концепций, мы всегда имеем дело со всей совокупностью альтернатив, но описывая происходящее с точки зрения сознания конкретного наблюдателя, мы всегда имеем дело лишь с одной из них. Некоторые современные ученые (например, [13]) склоняются к выводу, который очень труден для физика: теория, которая могла бы описывать не только множество альтернативных результатов измерения и вероятностное распределение по ним, но и механизм выбора одного из них, обязательно должна включать сознание. В рамках многомировой интерпретации Эверетта, он звучит несколько иначе: функция сознания состоит в том, чтобы выбрать один из альтернативных эвереттовских миров. На вопрос: что такое осознание? следует ответить: это выбор альтернативы при квантовом измерении. Лишь после того, как выбор сделан, возникает определенная картина происходящего, описываемая языком классической физики (например, лишь после этого стрелка прибора

оказывается в определенном положении). Пока же выбор не произошел, есть лишь квантовая картина с присущим ей множеством альтернатив. Можно сказать так: лишь выбор альтернативы определяет, что же происходит в реальности. Функция сознания (осознание) сама по себе есть один из этапов квантового измерения, именно – выбор (селекция) альтернативы. Сознание, следовательно, не нужно включать в теорию измерения. Оно уже включено в нее. Нужно лишь узнать в одном из элементов теории измерения (этим элементом является выбор альтернативы) то, что в другом контексте называется осознанием.

Проиллюстрировать мысли, высказанные выше, можно, ответив на знаменитое возражение Эйнштейна Бору: «Да, Бог не играет в кости, он равно приемлет все возможности. В кости играет сознание каждого наблюдателя».

В различных формах мысль о необходимости включения наблюдателя и даже сознания в теорию высказывалась с первых лет существования квантовой механики. Например, это было характерно для взглядов Паули. В работе Вигнера содержится даже гораздо более сильное утверждение: сознание не только необходимо включить в теорию измерения, но сознание может влиять на реальность. Подобную мысль высказывал и Шредингер. Стоит отметить, что и в последние годы роль сознания в интерпретации квантовой механики обсуждалась очень широко. Наиболее экзотическими в этой области являются представления российского ученого Р.С. Нахамсона (например, [14]), который придерживается точки зрения о наличии своего рода «сознания» у каждой отдельной частицы.

Впрочем, изложенная выше концепция, наряду с остальными интерпретациями квантовой механики, также имеет много слабых мест и предоставляет широкие возможности для критиков. Если рассуждать в духе копенгагенской школы (имеют смысл только те вопросы, которые можно задать экспериментально), то все построения, проведенные выше, бессмысленны ввиду полной ненаблюдаемости рассматриваемых эффектов. Между параллельными мирами Эверетта не может быть никакого контакта, каждый наблюдатель видит лишь один из них, и нет никакой возможности доказать или опровергнуть существование других. Вероятность оказаться в данном мире (то есть получить данный результат измерения) рассчитывается по обычным квантово-механическим правилам. Отсутствие возможности проверить интерпретацию Эверетта при том, что ее предположения (реальность всех альтернатив) чрезвычайно радикальны, – главное воз-

ражение против этой интерпретации. Поэтому предлагались варианты многомировой интерпретации, в которых между различными мирами имеется взаимодействие, однако такие предложения нефизичны и еще более искусственны. Кроме того, непосредственно в рамках эвереттовской концепции возникают трудности при рассмотрении случая нескольких наблюдателей [15].

Парадокс ЭПР и теорема Белла

Некоторые контринтуитивные, парадоксальные черты квантово-механического измерения приводят даже к появлению новых направлений в науке. Свойства квантовой системы, обнаруженные при измерении (например, локализация частицы, то есть свойство быть в определенном месте) могут не существовать до измерения. Такого рода парадоксальные черты квантовой механики подтверждены экспериментально и даже используются для создания технических устройств, обладающих неожиданными новыми возможностями. Так, быстро развивающаяся прикладная наука, квантовая криптография, предлагает способы передавать секретный код с гарантией от его перехвата. Точнее, любая попытка перехвата пересылаемого кода, пересылаемого по «квантовому» каналу, неизбежно оставит след, который будет обнаружен принимающим и даст знать, что этим кодом пользоваться нельзя – он раскритичен. Гарантию обнаружения дают законы квантовой механики: невозможно подслушать передаваемое, не оставив следа, так как невозможно получить информацию о квантовой системе, не изменив ее состояния. В свою очередь это положение следует из знаменитого принципа неопределенности. В этой связи интересно рассмотреть один из самых известных квантово-механических парадоксов – парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР).

Этот парадокс был в центре знаменитой дискуссии между Эйнштейном и Бором (см. [17]) и в дальнейшем очень много обсуждался в литературе. Проще всего провести этот анализ на примере распада частицы спина 0 на две частицы спинов 1/2. Состояние двух частиц после такого распада имеет вид

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 \right),$$

где $|\uparrow\rangle_i$ означает состояние i -й частицы со спином, направленным вверх относительно выделенной оси (например, z), а $|\downarrow\rangle_i$ – состояние i -й частицы со спином вниз. Состояние является сцепленным (entangled) состоянием двух частиц, причем направление спина каждой из частиц не определено, но между направлениями спинов обеих частиц имеется квантовая корреляция.

Наличие корреляции приводит к тому, что измерения проекций спинов двух частиц оказываются коррелированными даже после того, как частицы удалятся друг от друга на любое расстояние. В принципе они могут достичь областей, отделенных друг от друга пространственно-подобным интервалом, что, согласно специальной теории относительности, должно исключать динамически причинную связь между ними. Если измерение проекции спина первой частицы показывает, что ее спин направлен вверх, то измерение проекции спина второй частицы (расположенной в этот момент как угодно далеко) заведомо покажет, что спин направлен вниз, и наоборот. Допустим, что в процедуре измерения, произведенной над первой частицей, реализуется одна из потенциальностей наблюдаемой физической системы. Но какую именно систему наблюдает экспериментатор? В рамках локальной картины ответ ясен: он наблюдает частицу, точнее говоря, проекцию ее спина на заданное им направление магнитного поля. В таком случае получается, что вторая частица по какому-то скрытому от нас информационному каналу мгновенно узнает, в каком направлении ей надо иметь определенное значение проекции своего спина. Квантовая механика, таким образом, нарушает условие «объективных локальных причин» (более подробно этот термин будет обсужден ниже) на уровне отдельных макрособытий и в этом смысле является нелокальной теорией. Конечно, правомерность таких рассуждений может быть легко поставлена под сомнение. Ведь вся картина нелокально связанных или мгновенно сообщающихся между собой частиц возникает лишь тогда, когда мы пытаемся осмыслить квантовую взаимосвязанность удаленных друг от друга частиц в рамках «реального» трехмерного пространства и органически связанной с ним концепции, по которой каждая из этих систем предполагается физически локализуемой, т.е. имеющей некие фундаментальные качества или свойства, не зависящие сколько-нибудь существенным образом от взаимосвязей между ними. Но если мы бу-

дем придерживаться последовательно квантово-механической точки зрения, то нам придется расстаться с этой наглядной и, вообще говоря, механистической картиной. С позиций квантовой механики эволюция квантовой системы из N частиц описывается решением уравнения Шредингера не в обычном трехмерном, а в абстрактном, $3N$ -мерном конфигурационном пространстве. Поэтому рассматривать «волны вероятности» в обычном пространстве не следует, это ведет к парадоксам. Нужно твердо усвоить, что волновая функция не является классическим понятием и в этом смысле она, по словам М. Борна, «недоступна человеческому пониманию».

В 1964 г. американский физик-теоретик Джон Стюарт Белл сумел придать этому парадоксу простую и наглядную форму, выведя так называемые неравенства Белла, которые будут рассмотрены подробнее чуть ниже. В связи с его исследованиями было введено понятие «объективной локальной теории», в которой свойства системы (в данном случае – свойства частицы) существуют объективно независимо от измерения, а также имеют место некоторые другие положения, характерные для классической теории. Точнее, в объективной локальной теории: каждая частица характеризуется некоторыми переменными (которые могут соответствовать, например, волновой функции), возможно коррелированными для двух частиц; результаты измерения одной частицы не зависят от того, производится ли измерение другой частицы и если да, то какой результат дает это измерение; характеристики статистических ансамблей (и, следовательно, статистика измерения) зависят лишь от условий в более ранние моменты времени: невозможна «ретроспективная причинность».

Теорема, впервые сформулированная и доказанная Беллом в 1964 г. [2] в связи с его исследованием моделей теорий со скрытыми параметрами, утверждает, что объективная локальная теория и квантовая механика дают разные предсказания для статистики результатов измерений. Рассмотрим попутно, что такое «скрытые параметры». Известно, что квантовая механика является теорией вероятностного или статистического типа. Это означает, что она в общем случае не дает точных предсказаний результатов эксперимента. Например, она не предсказывает точное место попадания электрона, прошедшего через дифрагирующую систему, на фотопластинку. Отсюда возникает предположение, что квантово-механическое описание физической системы с помощью волновой функции не является полным описанием «реального положения ве-

щей» и что существуют некоторые дополнительные гипотетические переменные, которые «скрыты» от нас, т.е. недоступны наблюдению и контролю с помощью имеющихся у нас экспериментальных средств, подобно тому, как незнание импульсов и координат всех частиц газа вынуждает нас прибегать к статистическому описанию в терминах термодинамических переменных. Фиксация скрытых переменных позволила бы точно предсказывать место попадания электрона на фотопластинку и дала бы тем самым возможность восстановить детерминизм классического типа при описании квантовых явлений.

В применении к рассматриваемой системе двух частиц со спином S в синглетном состоянии теореме Белла можно сформулировать следующим образом. Пусть частицы летят друг от друга к разным приборам, измеряющим знаки их спинов вдоль направлений \vec{a} и \vec{b} соответственно. Эйнштейновский принцип локальности интерпретируется как утверждение, что каждая из измеряемых частиц имеет некоторое свойство, которое будем обозначать через λ и которое не зависит от того, что случится с другой частицей. Заметим, что с этими свойствами никакой специальной модели, по крайней мере явно, не связывается. Они могут отражать какую-то «внутреннюю» сложную структуру частиц и их локальную связь со средой или просто тот факт, что частицы ранее взаимодействовали друг с другом. Предполагается лишь, что результаты измерений A и B знака спинов двух частиц вдоль ориентаций \vec{a} и \vec{b} как-то зависят от λ , причем не обязательно строго причинным образом, допустима и стохастическая зависимость. Теперь мы можем написать корреляционную функцию $P(\vec{a}, \vec{b})$, которая характеризует степень связи двух дискретных случайных процессов, происходящих в разных местах пространства. Эта функция записывается в виде

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int A(\lambda, \vec{a})B(\lambda, \vec{b})\rho(\lambda)d\lambda,$$

где $\rho(\lambda)$ – вероятностное распределение, характеризующее частоту появления свойства λ и $\int \rho(\lambda)d\lambda = 1$. После этого рассматривается разность $P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})$ ($\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ – единичные векторы), для которой оказывается справедливым следующее неравенство:

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| < 1 + P(\vec{b}, \vec{c})$$

Заметим, что $P(\vec{b}, \vec{c})$ в данном случае отрицательна. Этот результат, называемый неравенством Белла, получается с помощью простых преобразований, с деталями которых можно ознакомиться в [2]. По существу, он является следствием того факта, что вероятности не могут иметь отрицательных значений. Неравенство Белла может быть обобщено в самых разных направлениях, причем для его вывода не обязательно использование концепции скрытых параметров. Клаузер и Хорн [16] предложили называть класс всех теорий, для которых выполняется неравенство Белла, классом «объективно локальных теорий» (*ОЛТ*). Что же касается квантовой механики, то, согласно ее предписанию, соответствующая корреляционная функция имеет следующий вид:

$$P_{к.м.}(\vec{a}, \vec{b}) = -\cos(\vec{a}, \vec{b}), \text{ где } (\vec{a}, \vec{b}) \text{ — угол между фиксированными}$$

ориентациями анализаторов. Если теперь подставить $P_{к.м.}(\vec{a}, \vec{b})$ в неравенство Белла, то нетрудно будет убедиться, что квантовая корреляционная функция в некотором диапазоне углов это неравенство нарушает. В этом и состоит теорема Белла, которая утверждает невозможность моделирования квантовых корреляций в классе объективно локальных теорий таким образом, чтобы при этом воспроизводилась вся статистика предсказаний квантовой механики. В некоторых экспериментальных ситуациях их предсказания будут обязательно расходиться, и важность теоремы Белла заключается в том, что она эти ситуации достаточно четко выделяет.

После того, как теорема Белла была сформулирована, были предприняты усилия для экспериментальной проверки неравенства Белла, и в 1980 г. в опытах Аспекта было экспериментально установлено, что неравенство нарушается (см. [17]). Такой результат совместим с квантовой механикой и несовместим с объективной локальной теорией. Тем самым экспериментально доказано, что микроскопическим системам нельзя (во всяком случае, не всегда можно) приписывать состояния как объективно существующие и независимые от проводимых измерений. Впоследствии были реализованы многочисленные корреляционные эксперименты типа тех, что провел Аспект.

Опыты Аспекта, и вообще измерения над ЭПР-парой, интересны еще и тем, что они демонстрируют так называемую «квантовую нелокальность»: измерение, проведенное над одной из частиц, определяет результат измерения над второй частицей, которое проводится в тот же момент времени в другой точке пространства. Два события (измерение первой частицы и измерение второй частицы) могут быть разделены пространственно-подобным интервалом и, тем не менее, одно из них предопределяет второе. Чтобы сделать этот факт более убедительным, опыты, подобные опытам Аспекта, проводят при все большем пространственном разделении двух частиц. Группой Гизина в Женеве был проведен корреляционный опыт [18] при пространственном разделении ЭПР-пары в 10 км. Результат опыта оказался тем же самым.

На первый взгляд, кажется, что в опытах такого типа нарушается причинность. Это, однако, неверно, потому что отношение между двумя событиями (измерением первой и измерением второй частицы) – это не отношение причинно-следственной связи, а отношение корреляции. Хотя результаты измерений двух частиц скоррелированы друг с другом, но статистика измерений одной частицы не содержит никаких следов этой корреляции: проекция спина (на любую ось) при каждом измерении оказывается положительной с вероятностью $1/2$ и отрицательной с той же вероятностью. Экспериментатор не может управлять результатами измерения, а, следовательно, не может послать сигнал в точку, где расположена вторая частица. Сверхсветовая передача сигнала невозможна.

Невозможность передачи сверхсветового сигнала означает, что «квантовая нелокальность» имеет специфическую, корреляционную природу. Нелокальность результатов измерения имеет место, если имеется ЭПР-пара (две частицы в сцепленном состоянии). Однако процесс создания такой пары является локальным.

В опытах типа опыта Аспекта объективная локальная теория опровергается наблюдениями, в которых измеряется статистика результатов измерений над ЭПР-парой. Гринбергер, Хорн и Цайлингер предложили более сложный корреляционный опыт с тремя фотонами [19], в котором результаты измерения, предсказанные объективной локальной теорией, более радикально отличаются от того, что предсказывает квантовая механика: для некоторого измерения объективная локальная теория предсказывает положительный результат, а квантовая механика – отрицательный (и последнее подтверждается).

Впрочем, ЭПР-пары не являются уникальными чисто квантово-механическими объектами. В классической физике вполне могут существовать такого же рода корреляции. Макс Борн в своей переписке с Эйнштейном на это специально указывал. Он приводил пример обычного оптического двойного лучепреломления, где, измеряя поляризацию одного из лучей, мы сразу же получаем информацию о поляризации второго. Иными словами, мы «измерениями системы в одном месте пространства кое-что установили для системы в другом месте пространства. Такая возможность основана на знании того, что оба луча возникли после прохождения одного через кристалл, говоря языком оптики, – что они когерентны...». Этот пример, подчеркивает Борн, «показывает, что такие вещи происходят в обычной оптике. Квантовая механика только обобщила это дело... пространственно удаленные объекты, имеющие общую первопричину, вовсе не должны быть независимыми. Я думаю, что этого нельзя отрицать и нужно просто принять это».

Существует довольно широкий диапазон мнений относительно значимости теоремы Белла для основ квантовой механики. Например, в оценке такого видного специалиста по теории S -матрицы, как Стэпп, «теорема Белла является наиболее глубоким открытием науки». По мнению известного французского физика д'Эспанья, важность теоремы Белла заключается в первую очередь в том, что она впервые открыла возможность прямой экспериментальной проверки общих концепций, лежащих в основе всей современной микрофизики. Американский физик и философ А. Шимони отмечает, что после публикации двух статей Белла в 1964 и 1966 гг. произошел существенный сдвиг всей проблемы интерпретации квантовой механики. С другой стороны, один из учеников де Бройля, Ж. Лошак, считает, что теорема Белла имеет столь же малое значение для теории со скрытыми параметрами, как и известная теорема фон Неймана. Д. Баб, один из бывших сотрудников Д. Бома, рассматривая результат Белла в связи со спором вокруг теоремы фон Неймана, так же как и Лошак, приходит к выводу, хотя и руководствуется при этом совсем другими соображениями, что этот результат в конечном счете не содержит ничего нового. С точки зрения «физического» (здесь это слово употребляется в противовес «философскому», фактически как синоним «копенгагенского») сообщества, основная заслуга Белла состоит в том, что он сумел придать некоторым умозрительным рассуждениям, обычно лежащим в основе вопросов интерпретации

квантовой механики, количественную форму, доступную экспериментальной проверке.

Специфические черты квантовой механики, связанные со сцепленными состояниями, впервые были сформулированы в связи с ЭПР-парадоксом, однако в настоящее время они не воспринимаются как парадоксальные. Для людей, профессионально работающих с квантово-механическим формализмом (т.е. для большинства физиков) нет ничего парадоксального ни в ЭПР-парадах, ни даже в очень сложных сцепленных состояниях с большим числом слагаемых и большим числом факторов в каждом слагаемом. Результаты любых опытов с такими состояниями, в принципе, легко просчитываются (хотя технические трудности при расчете сложных сцепленных состояний, конечно, возможны).

То, что ощущение парадоксальности исчезло, объясняется тем, что специфика сцепленных состояний, известная со времени становления квантовой механики, в наше время исследована более детально. В частности, это проявилось в том, что некоторые специфические черты были сформулированы в виде простых и очень наглядных утверждений или теорем, таких, как невозможность клонирования состояний. С этой детализацией связаны и новые приложения квантовой механики – квантовая информация и квантовая криптография.

Заключение

Проходивший в последние два десятилетия процесс активного и детального изучения особенностей квантово-механических состояний и квантовых измерений связан, разумеется, с появлением новых экспериментальных возможностей, с огромной чувствительностью современной аппаратуры. Увеличение чувствительности измерений привело к тому, что гораздо более широкий круг экспериментаторов вынужден был непосредственно применять в своей работе квантовую механику. В результате родились по сути дела новые области науки, такие, как квантовая оптика. Работающие в этих новых областях люди выработали для себя наглядные образы и простые формулировки, позволяющие студенту или начинающему исследователю легко «войти» в квантовую механику, научиться безошибочно решать возникающие в ней типичные для его области исследований задачи. Появился простой язык, облегчающий выработку квантово-механической интуиции.

Параллельно с этим процессом «освоения» квантовой механики гораздо большим, чем ранее, числом физиков и инженеров и в тесной связи с этим процессом расширялись ее старые приложения (такие, как теория сверхпроводимости) и возникали совершенно новые (такие, как квантовая информация). Практика работы с квантовой механикой лишила многие ее специфические черты (такие, как суперпозиция состояний, сцепленные состояния) ореола парадоксальности, присущего им ранее.

В то же время, поиски «объективной формы описания», предпринятые как самим Беллом, так и рядом других исследователей, свидетельствуют о том, что физика не рассталась окончательно с эйнштейновским идеалом «независимого наблюдателя» и пытается вернуться к нему [20]. Эти попытки выражают закономерную тенденцию в развитии физики, и их нельзя расценивать как методологически несостоятельные. Однако представляется сомнительным, что возврат к идеалу независимого наблюдателя может произойти путем простого исключения ссылок на измерительную аппаратуру в языке квантовой теории. Включение наблюдателя и условий опыта в физическое описание природы является, как подчеркивал Паули, существенным и необратимым шагом, который был сделан в квантовой механике. Представляется совершенно очевидным, что развитая физическая теория должна не просто упорядочивать и объяснять поступающую информацию о физических явлениях, но также объяснять и сам способ ее приобретения, т.е. включать в себя описание информационного канала, который связывает исследуемый фрагмент реальности и наблюдателя. Однако для фундаментальной физической теории, если моделировать ее в виде некоего кибернетического устройства, одного блока «канала наблюдателя» оказывается недостаточно. Квантовая механика (на что указывал Эйнштейн) не является в известном смысле полной или, лучше сказать, до конца укомплектованной теорией. Попытки такого рода (разумеется, не претендуя на полноту и не скрывая известной субъективности излагаемых точек зрения) по «доукомплектованию» квантовой механики и были проиллюстрированы в настоящем обзоре.

Литература

1. *Wheeler J.A., Zurek W.H. (Eds) Quantum Theory and Measurement.* – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983.
2. *Bell J.S. Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy.* – Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

3. *Penrose R.* Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness. – Oxford: Oxford University Press, 1994.
4. *Фок В.А.* Критика взглядов Бора на квантовую механику // *Философские вопросы современной физики* (Под ред. И. В. Кузнецова, М Э Омелянского). – М.: Госполитиздат, 1958. – С. 166.
5. *Липкин А.И.* //УФН. – 2001. – Т. 171. – № 4. – С. 437.
6. *Ghirardi G.C., Rimini A., Weber T.* // Phys. Rev. D. – 1986. – V. 34. – P. 470.
7. *Bohm D.* // Phys. Rev. – 1952. – V. 85. – P. 166.
8. *Omnes R.* The Interpretation of Quantum Mechanics. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1994.
9. *Gell-Mann M., Hartle J.* // Phys. Rev. D. – 1993. – V. 47. – 3. 3345.
10. *Paz J.P., Zurek W.H.* // Phys. Rev. D. – 1993. – V. 48. – P. 2728.
11. *Everett H.* //Rev. Mod. Phys. – 1957. – V. 29. – P. 454; Reprinted in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J.A. Wheeler, W.H. Zurek). – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1983.
12. *De Witt B.S., Graham N. (Eds)* The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1973.
13. *Менский М.Б.* //УФН. – 2001. – Т. 171. – № 4, с. 459.
14. *Нахамсон Р.С.* //УФН. – 2001. – Т. 171. – № 4. – С. 441.
15. *Барвинский А.О., Каменщик А.Ю., Пономарев В.Н.* Фундаментальные проблемы интерпретации квантовой механики. Современный подход. – М.: МГПИ, 1988.
16. *Clause I, Horne M.* // Phys. Rev. D. – 1974. – V. 10. – P. 526.
17. *Aspect A.* // Nature (London). – 1999. – V. 390. – P. 189.
18. *Tittel W. et al.* // Europhys. Lett. – 1997. – V. 40. – P. 595.
19. *Pan J.-W. et al.* // Nature (London). – 2000. – V. 403. – P. 515.
20. *Аршинов В.И.* Проблема интерпретации квантовой механики и теорема Белла // *Теоретическое и эмпирическое в научном познании.* – М., 1984.

Новосибирский государственный
университет, г. Новосибирск