

ПРОБЛЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И ТЕОРЕМА БЕЛЛА

В.И. Аршинов

Важнейшим аспектом взаимоотношения теоретического и эмпирического является проблема интерпретации теории. В этой связи особый интерес представляет проблема интерпретации одной из наиболее революционных теорий современной физики – квантовой механики. Перечень вопросов, которые обычно включают в проблему интерпретации квантовой механики в качестве наиболее важных и принципиальных, весьма обширен, может быть по-разному сформулирован и не очень точно определен. Мы рассмотрим здесь лишь некоторые из них в связи с так называемой теоремой Белла, которая обычно формулируется в виде утверждения о невозможности локальных скрытых параметров в квантовой механике [1].

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" [2]. 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" [3]. 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 [4]. 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 [5]. 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 [6].

Что же касается самого Боба и его нынешних сотрудников, то они, как и Стэпп, полагают, что теорема Белла вообще не имеет непосредственного отношения к концепции скрытых параметров. Ее значение в том, что она служит ориентиром в поисках новых подходов к более углубленному пониманию и обобщению квантовой механики [7].

Разделяя это мнение, мы попытаемся далее изложить содержание теоремы Белла в рамках соответствующего ей методологического и исторического контекста таким образом, чтобы иметь возможность оценить ее значение в плане достаточно широкой концептуальной перспективы.

Теорема, о которой идет речь, была впервые сформулирована американским физиком-теоретиком Джоном Стюартом Беллом в 1964 г. в связи с его исследованием моделей теорий со скрытыми параметрами. Напомним кратко, что это такое, отметив предварительно, что общая концепция скрытых параметров, как это станет ясно из дальнейшего, в достаточно отчетливом виде ее сторонниками никогда не формулировалась. Тем не менее, когда говорят о скрытых параметрах в квантовой механике, то, как правило, имеют в виду следующее. Известно, что квантовая механика является теорией вероятностного или статистического типа. Это означает, что она в общем случае не дает нам точных предсказаний результатов эксперимента. Например, она не предсказывает точное место попадания электрона, прошедшего через диффрагирующую систему, на фотопластинку. Отсюда возникает предположение, что квантовомеханическое описание физической системы с помощью волновой функции не является полным описанием "реального положения вещей" и что существуют некоторые дополнительные гипотетические переменные, которые "скрыты" от нас, т.е. недоступны наблюдению и контролю с помощью имеющихся у нас экспериментальных средств. Фиксация этих переменных позволила бы точно предсказывать место

попадания электрона на фотопластинку и дала бы тем самым возможность восстановить детерминизм классического типа при описания квантовых явлений.

Надо сказать, что причины, по которым гипотеза скрытых параметров до сих пор привлекает внимание современных исследователей, не сводятся непосредственно лишь к стремлению восстановить классический детерминизм в области квантовых явлений. Они, вообще говоря, сложнее, что, в частности, подтверждает и пример самого Белла. Объясняя мотивы, побудившие его заняться исследованием вопроса о скрытых параметрах в квантовой механике, он в качестве главного из них называет свою неудовлетворенность лежащим в основе принятой интерпретации квантовой механики расчленением физического мира на две принципиально различным образом описываемые области классических и квантовых явлений и при этом без ясной экспликации связи между ними. В современной теории, указывает Белл, наиболее полное описание состояния мира в целом или любой его части имеет форму $(\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_i, \Psi_1, \Psi_2 \dots \Psi_i)$, где λ_i – классические переменные, описывающие состояние экспериментальной установки: положение переключателей, стрелок и т.д., а Ψ_i – соответствующие квантовомеханические функции. Эта неоднородность, или, точнее говоря, дуализм описания, предполагает существование некоторой границы, разделяющей области классических и квантовых явлений или (прибегая к более общей философской терминологии) границы между познающим субъектом, который существует в классическом мире, адаптирован к нему, "оснащен" соответствующей системой понятий и приборов, и познаваемым им квантовомеханическим объектом. При этом если и имеется какое-то согласие в том, что по крайней мере переключатели и стрелки приборов находятся в классическом мире, "с нашей стороны", по эту сторону границы, то относительно "глубины ее залегания" "существуют самые разные мнения [8].

Разумеется, в плане практического применения теории, так сказать в прагматическом аспекте, этот вопрос может и не представляться особо важным.

Иное дело, если взглянуть на него с точки зрения фундаментальных принципов теории, которая обычно формулируется в терминах предсказаний результатов возможных экспериментов. Такая форма теории обязывает постулировать в ее собственных рамках существование квантовоклассической границы. Но в таком случае мы, видимо, вправе требовать от теории, чтобы она давала нам и некоторый рецепт, позволяющий всякий раз эту границу достаточно определенным образом идентифицировать. Однако теория в ее существующем виде эту границу не фиксирует, она оказывается подвижной и во многом условной. И это обстоятельство можно рассматривать как свидетельство того, что квантовая механика является самосогласованной и непротиворечивой теорией лишь в некотором *приближенном* смысле. Конечно, то же самое можно утверждать о любой физической теории, но в данном случае речь идет о том, что эта приближенность является *внутренним* свойством существующей формы квантовой теории. Другими словами, хотя теория построена так, что ее базисные утверждения относятся к результатам "измерений" и тем самым концепция измерения приобретает для нее принципиальное значение, сказать ясным образом, что такое измерение, она не может. "Ясным образом" означает: не прибегая к нежелательному внутри фундаментальной физической теории дуалистическому языку, наподобие, например, того, который был использован фон Нейманом в его квантовой теории измерения. Мы не будем здесь специально заниматься рассмотрением концепций фон Неймана, а также альтернативных подходов, пытающихся описать измерительный процесс не в рамках субъект-объектного отношения, как у фон Неймана, а как физическое взаимодействие между микро- и макросистемами. Нам важно лишь привлечь внимание к тому обстоятельству, что основную цель программы поиска теорий со скрытыми параметрами ее сторонники видят сейчас не в возврате к детерминизму классического образца, а скорее в возврате к тому, что они называют "объективным описанием квантовых явлений", имея в виду поиск иной формы физического описания: не в терминах наблюдения, а в терминах объектов "самих по себе", без ссылок на их отношение к измерительной

аппаратуре. Привлекательность этой формы описания в свете сказанного выше заключается в том, что она снимает, а точнее, просто отодвигает в сторону такие неясные и спорные проблемы, как проблема языкового дуализма, проблема границы между субъектом и объектом, наблюдаемым и наблюдающим, не говоря уже о том, что она выглядит как более соответствующая традиционному идеалу естественнонаучного познания.

Отметим еще, что отстаивание гносеологического приоритета именно этой формы описания составляло один из краеугольных камней позиции Эйнштейна в его отношении к квантовой механике. И хотя эта позиция неоднократно излагалась как самим Эйнштейном, так и его многочисленными комментаторами и критиками, так что ее принято считать хорошо известной и понятной, в действительности дело обстоит несколько иначе. К примеру, сам Белл, ставя знак равенства между концепцией скрытых параметров и поиском "объективной формы описания квантовых явлений", склонен ошибочно зачислять Эйнштейна в сторонники идеи скрытых параметров. Правда, эта ошибка оказалась с эвристической точки зрения для Белла весьма плодотворной, как это будет ясно из дальнейшего, но тем не менее следует подчеркнуть, что Эйнштейн не был защитником идеи скрытых параметров. В письме к Борну в 1952 г. он писал: "Видел ли ты, как Бом (как, впрочем, и де Бройль 25 лет тому назад) верит в то, что квантовую теорию можно детерминистски истолковать по-другому? Это, по-моему, дешевые рассуждения, но тебе, конечно, лучше судить" [9].

Различие в позиции Эйнштейна и точкой зрения сторонников скрытых параметров было отмечено также М. Борном, который в комментариях к своей переписке с Эйнштейном по этому поводу писал следующее: «Де Бройль, создатель волновой механики, а также Бом принимают, подобно Шредингеру, результаты самой квантовой механики, но не ее статистического толкования, для чего они допускают скрытые механизмы, "прячущиеся" за волнами, или переписывают формулы так, чтобы придать им такой вид, который подчиняется детерминистско-механическим законам. Но эти попытки дело далеко не

продвинули; мне кажется, что сегодня (1965 г.) они почти забыты. Да и Эйнштейн считал эту точку зрения слишком дешевой. Его идеи были радикальнее, но представляли собой некую "музыку будущего"» [10].

Но и сам Борн испытывал значительные затруднения, стараясь понять точку зрения Эйнштейна на квантовую механику, о чем весьма красноречиво свидетельствует их послевоенная переписка. К 1954 г., за год до смерти Эйнштейна, спор между ними по поводу квантовой механики обострился настолько, что потребовалось посредничество В. Паули, выступившего в своеобразной роли адвоката Эйнштейна, хотя и не разделяющего точку зрения последнего, но пытающегося четко сформулировать ее исходные предпосылки.

«Мне кажется, – писал Паули Борну, – Вы создали какое-то чучело Эйнштейна, которое с великой помпой и опровергаете. В особенности Эйнштейн не считает идею "детерминизма" (как он мне в категорической форме повторил) столь фундаментальной, как это часто кажется, а энергично отрицает, что он когда-либо выставлял подобный постулат в таком виде, что "последовательность подобных состояний тоже должна быть объективной, реальной, то есть автоматической, механической, детерминистской". В такой же мере он *оспаривает*, что он рассматривал вопрос, "является ли теория строго детерминистской?" в качестве "критерия для допустимой теории".

Эйнштейновская отправная точка является скорее "реалистической", а не "детерминистской". Это значит, что его философская предубежденность (*Präjudiz*) является другой...» [11]. В следующем письме Борну Паули еще раз уточняет: «Я полностью разделяю Вашу точку зрения на то, что Эйнштейн "одержим своей метафизикой". Я бы только назвал ее "реалистической метафизикой, а не "детерминистской"» [12]. Далее Паули приводит совет А. Эйнштейна сторонникам квантовой механики. «Во время моего прощального визита к нему он еще добавил, что по его мнению следовало бы говорить нам, сторонникам квантовой механики для того, чтобы быть логически неуязвимыми (но что не совпадает с тем, во что он верит): "Описание физических систем с помощью квантовой механики весьма неполно, но его

бессмысленно совершенствоваться, поскольку это совершенствование не увязывается с законами природы". Этой предложенной нам формулировкой я совсем не удовлетворен, – подчеркивает Паули, – поскольку своей метафизичностью она представляется мне схожей с рассуждениями об "ангелах на острие иглы (как будто существует нечто, о чем никто знать не может)"» [13].

Можно предположить, что слова о "бессмысленном совершенствовании" в совете Эйнштейна относились, скорее всего, именно к попыткам дополнить квантовую механику скрытыми параметрами. Что же касается оценки Паули общей позиции Эйнштейна в отношении квантовой механики, то она при всей ее точности представляется несколько односторонней. В ней нетрудно увидеть скрытый упрек Эйнштейну в своего рода философском догматизме, который нельзя признать справедливым [14]. Здесь мы на время прервем наш экскурс в сравнительно недавнюю историю квантовомеханических дебатов и вернемся к Беллу, который в дополнение к двум указанным выше общим причинам, объясняющим интерес исследователей к скрытым параметрам, приводит еще одну причину уже более конкретного свойства, связанную с "особым характером некоторых квантовомеханических предсказаний" [15]. Речь идет об известном аргументе Эйнштейна, Подольского, Розена, который был выдвинут против утверждения о полноте квантовомеханического описания реальности и который часто, но не совсем точно называют парадоксом. Опуская технические подробности, мы воспроизведем в качественной форме этот аргумент примерно в том виде, который был придан ему в свое время Бомом [16], дополняя его изложением некоторыми историческими свидетельствами.

Рассмотрим квантовомеханическую систему двух частиц со спином $1/2$ каждая, находящихся первоначально в связанном состоянии с общим нулевым спином, которая затем распадается при помощи процесса, не меняющего полный момент количества движения системы. Частицы удаляются друг от друга на некоторое, вообще говоря, макроскопическое расстояние, такое, что силовое взаимодействие между ними становится равным нулю. В принципе они

могут достичь областей, отделенных друг от друга пространственно-подобным интервалом, что согласно *СТО*, должно исключать динамически причинную связь между ними. В каждой из этих областей располагается измерительная установка, контролируемая экспериментатором, который свободен выбирать, изменять и фиксировать те или иные инструментальные макропеременные, такие, как, например, ориентация магнитного поля в анализаторе типа прибора Штерна–Герлаха. При желании функцию экспериментатора можно передать генератору случайных чисел, автоматически управляющему макропараметрами прибора.

Устанавливая определенную ориентацию магнитного поля в направлении произвольно выбранного нами вектора \vec{a}_0 , мы можем измерить проекции на него спинов обеих частиц $\sigma_1 \vec{a}$ и $\sigma_2 \vec{a}$. При этом если измерение $\sigma_1 \vec{a}$ дает нам значение, скажем, $+1$, то, согласно квантовой механике, измерение $\sigma_2 \vec{a}$ обязательно даст величину -1 , и наоборот. Иными словами, результат второго измерения оказывается предопределенным. Вообще говоря, в этом нет ничего удивительного. Ведь в конце концов обе частицы имели общее прошлое, что и отражается в существовании корреляций между результатами измерений. Более того, этот факт вовсе не специфичен для квантовой механики, он имеет место и в классической физике. М. Борн в своей переписке с А. Эйнштейном, к которой мы уже обращались выше, 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" [17]. И все же кажущиеся столь очевидными доводы Борна столь же очевидно не убеждали Эйнштейна. Причину этого, возможно, удастся лучше понять, если мы теперь обратимся к системе исходных допущений, лежащих в основе аргументации Эйнштейна и его сотрудников в пользу тезиса о неполноте квантовой механики. Эта система включает в себя две явно сформулированные предпосылки. Во-первых, критерий реальности: "Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью (т.е. вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине" [18]. Во-вторых, критерий полноты. Физическая теория полна лишь в том случае, если каждый элемент физической реальности имеет свой аналог (counterpart) в физической теории. Но, помимо этих явно сформулированных предпосылок, аргументация Эйнштейна, Подольского, Розена содержала в себе, как отмечает М. Джеммер, также некоторые и неявные допущения [19]. Во-первых, они с самого начала признавали, что квантовую теорию следует рассматривать как "правильную", т.е. эмпирически обоснованную теорию, статистические предсказания которой подтверждены экспериментом. Далее, они временно допускали справедливость концепции Гейзенберга, согласно которой мы не вправе в общем случае приписывать квантовомеханической наблюдаемой до измерения какое-либо определенное значение, а следовательно, считать ее элементом физической реальности в смысле вышеприведенного определения. Здесь стоит заметить, что в понимании Гейзенберга квантовый объект до измерения следует мыслить в форме некоторой потенциальности, тенденции или возможности, количественная сторона которой выражается понятием вероятности. Причем, с его точки зрения, вероятность имеет статус "нового вида" объективной физической реальности [20], которую в духе философии Аристотеля следует располагать где-то "на полпути между осязаемой (massive) реальностью материи (matter) и интеллектуальной реальностью идеи или образа" [21].

И наконец, наиболее важным компонентом во всей системе концептуальных предпосылок позиции Эйнштейна и его сотрудников следует считать условие, которое можно назвать условием "объективных локальных причин". Согласно этому условию, если во время измерения "две системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой системой во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений" [22]. Это условие в статье Эйнштейна, Подольского, Розена специально не выделялось, о нем просто говорилось по ходу дела, видимо, потому, что оно рассматривалось как нечто само собой разумеющееся. Между тем именно это условие и было, по существу, тем стержнем, который фиксировал концептуальную перспективу, в рамках которой Эйнштейн рассматривал всю проблему физической реальности и полноты ее квантовомеханического описания. Позднее, уже в послевоенные годы, Эйнштейн неоднократно подчеркивал, что отказ от этого условия был бы, по его мнению, равносильен отказу от возможности объективного установления "эмпирически проверяемых законов в привычном для нас смысле" [23].

Для Эйнштейна тезис о независимости измерений, производимых в разных, достаточно удаленных друг от друга местах пространства, и тезис о полноте квантовомеханического описания физической реальности находились во взаимоисключающем отношении, и поскольку принцип независимости измерений или условие локальности, по Эйнштейну, имеет статус необходимой и фундаментальной предпосылки научного исследования, то, очевидно, необходимо отказаться от предположения о полноте квантовомеханического описания реальности. Такова вкратце суть аргумента Эйнштейна, Подольского, Розена в свете более позднего взгляда Эйнштейна на квантовую механику.

Но почему все-таки вышеуказанные тезисы в глазах Эйнштейна исключали друг друга? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо реконструировать внутреннюю логику его позиции. Не претендуя на полное решение этой задачи, выскажем лишь некоторые соображения по этому поводу. Обратим внимание, что принцип "объективных локальных причин"

формулируется Эйнштейном применительно к макроскопическим системам просто как общее условие физической независимости (но не логико-информационной, как ошибочно понимал его М. Борн) измерений, производимых в разных местах пространства. Отдавая в теоретико-методологическом плане приоритет этому условию, Эйнштейн, по сути дела, принимал некоторую точку зрения, которую можно назвать точкой зрения идеализированного экспериментатора, оперирующего макропеременными прибора в обычном трехмерном пространстве и наблюдающего за последовательностью макроскопических событий. Эти события экспериментатор интерпретирует как процесс детектирования и регистрации частиц, обладающих неким свойством, именуемым "спином". Частицы могут иметь разные ориентации этого свойства, например "вверх" или "вниз" в отношении направления магнитного поля, которое устанавливает экспериментатор. Теперь у него возникает следующий вопрос: может ли он рассматривать эти отдельные макроскопические события в качестве физически независимых от макропеременных, контролируемых его коллегой в области, достаточно удаленной от него, например в области отделенной пространственно-подобным интервалом? Вопрос, как видим, непосредственно касается макроскопической ситуации в обычном трехмерном пространстве, и ответ на него, с точки зрения Эйнштейна, должен быть положительным. А как обстоит дело с точки зрения квантовой механики? Рассматривая этот вопрос, Эйнштейн принимал "метафизику потенциальностей" Гейзенберга, но при этом неявно подчинял ее своему условию локальности, проецируя ее в обычное трехмерное пространство. В результате этой операции – о том, насколько она обоснованна, будет сказано ниже – и возникает неприемлемый для Эйнштейна образ "мерцающей" физической реальности.

Действительно, 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" 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 общающихся 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 будем придерживаться последовательно квантовомеханической точки зрения, то нам придется расстаться с этой наглядной и, вообще говоря, механистической картиной. Образовавшийся вследствие этого вакуум в голове у нашего идеального экспериментатора можно попытаться заполнить, сказав ему, что 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" [24].

Но, чтобы окончательно не смутить идеального экспериментатора, ему можно пояснить, что Борн, скорее всего, имел в виду не ограниченность человеческого понимания вообще, а его ограниченность на уровне наглядных понятий, относительно которых явно или неявно предполагается, что они с неизбежностью являются классическими и что выйти за их рамки возможно

лишь на достаточно высоком уровне математической абстракции. И вообще "прогресс в физике всегда был однозначно связан с переходом от наглядного к абстрактному" [25]. Так что надеяться на лучшее будущее не стоит. К сказанному можно еще добавить, что тезис о невозможности построения классической картины поведения микрообъектов на основе данных, получаемых при различных, взаимно несовместимых экспериментальных условиях, является, по сути дела, ядром всей концепции дополнительности Н. Бора, выдающегося интеллектуального достижения человеческой мысли, игнорировать которое в попытках понять квантовую механику с методологической точки зрения неразумно.

И наконец, возможно, самым сильным доводом для нашего экспериментатора могло бы оказаться одно из главных возражений Бора Эйнштейну, состоявшее, как известно, в указании на двусмысленность, неоднозначность использования понятия "физическая реальность" вне точно определенного экспериментального контекста, т.е. некоторого фиксированного информационного канала, связывающего ученого и исследуемый им фрагмент физической вселенной. И все же эти доводы могут и не удовлетворить нашего оппонента. К примеру, он может возразить Борну, сказав, что не стоит преувеличивать различие между наглядно-образным и абстрактным мышлением. Согласно представлениям современной психологии, это две в равной мере необходимые и непрерывно взаимодействующие между собой формы отображения объективной реальности, являющиеся компонентами целостной "внутренней структуры мыслительного процесса как такового..." [26]. К тому же наш экспериментатор находится в ситуации, в которой наглядно-классическое описание, согласно Бору, возможно. Бор неоднократно подчеркивал, что "отказ от наглядных представлений затрагивает только состояние атомных объектов; при этом полностью сохраняются основы описания экспериментальных действий, равно как и наша свобода их выбирать" [27]. Но здесь он вправе задать себе, например, такой вопрос: а не ограничивает ли эту свободу выбора его коллега, оперирующий своими приборами где-то

вдали от него? Кроме того, можно еще вспомнить, что, опять-таки согласно Н. Бору, формализм квантовой теории в целом применим только к замкнутым явлениям. "Всякое атомное явление, – писал Н. Бор, – замкнуто в том смысле, что его наблюдение основано на регистрации при помощи усилительных устройств, действующих необратимо... В этой связи важно понять, что формализм квантовой механики допускает хорошо определенное применение только к такого рода замкнутым явлениям" [28]. Однако в рассматриваемом случае выполнимость этого условия не ясна, что, в свою очередь, дает право сомневаться в применимости для его анализа квантового формализма, по крайней мере в его существующем виде. Кстати, аналогичный вывод делает также и Яух, подходя к этому вопросу с позиций квантовологической аксиоматики [29].

Что же касается возражений Бора Эйнштейну, то здесь можно заметить, что, хотя Бор успешно парировал критические атаки Эйнштейна, он, строго говоря, не опровергал его позицию до конца, во-первых, потому, что, не считая возможным исключить термин "физическая реальность", он в то же время не предлагал взамен своего определения этого понятия. Кроме того, есть основания полагать, что определение понятия "физическая реальность" не было главным пунктом позиции Эйнштейна, а скорее, следствием иных соображений. Как уже говорилось выше, для послевоенного этапа спора Эйнштейна с квантовой механикой был характерен акцент на принципе локальности как совершенно необходимой предпосылки существования "объективной формы" описания явлений. Но квантовая механика в понимании Эйнштейна нарушала этот принцип, хотя, по-видимому, и без наблюдаемых следствий. Причем это нарушение происходило на уровне макросистем, т.е. тогда, когда мы пытаемся применить квантовую механику как фундаментальную физическую теорию для их описания. Но это означало отрицание самой возможности существования объективной формы описания макросистем, а это, в свою очередь, явно противоречило тому факту, что на уровне макросистем, которые мы можем "воспринимать непосредственно" [30]

с большой, хотя и не сколь угодно высокой точностью, справедливы законы классической физики и "объективная форма описания". Именно здесь квантовая механика в глазах Эйнштейна не выдерживала экзамена на фундаментальность, «поскольку нельзя отказаться от возможности объективного описания отдельной макросистемы... без того, чтобы физическая картина мира в известной степени "скрылась в тумане"» [31].

И как раз в этом пункте с Эйнштейном не был согласен Паули, с предельной ясностью указав на это в своем письме Борну: «Я не считаю правдоподобной возможность того, чтобы "макротело" имело всегда квазирезкое определенное местонахождение, поскольку не вижу принципиальной разницы между микро- и макротелами» [32]. Но тут опять возникает вопрос о том, насколько совпадают или не совпадают в концептуальном отношении точки зрения Паули и Бора... В этом месте мы расстанемся с идеальным экспериментатором и его сомнениями. Вопросов, которые у него в принципе могут возникнуть, много, как впрочем, и ответов на их. Сказанное выше не претендовало на то, чтобы доказать приоритет одной точки зрения и несостоятельность другой. Его цель иная: указать на существование определенной проблемной ситуации, связанной не только с вопросом понимания "квантовой взаимосвязанности удаленных систем", но и с вопросом, что же такое понимание в физике вообще.

В контексте этой проблемной ситуации значение вклада Белла состоит, коротко говоря, в том, что он придал ясную математическую форму условию локальности Эйнштейна и непосредственно сопоставил его с предсказаниями квантовой механики. Тем самым впервые оказалось возможным вынести один из ключевых спорных вопросов интерпретации квантовой механики на суд эксперимента. Любопытно отметить, что сам Эйнштейн такой возможности не видел. «Мне кажется, – писал он, – не подлежит сомнению, что физики, которые считают квантово-механический способ описания принципиально окончательным..., откажутся от требования II о независимом существовании имеющих в различных областях пространства физических реальностей; они

могут с полным правом ссылаться на то, что квантовая теория явно нигде не применяет это требование» [33].

Напомним, что отправной точкой Белла было исследование гипотезы скрытых параметров. Рассматривая с этих позиций аргумент Эйнштейна, Подольского, Розена и полагая (вообще говоря, ошибочно), что их аргумент был выдвинут непосредственно в поддержку этой гипотезы, Белл тем не менее пришел к верному выводу, что то решение "парадокса", которое предлагалось в разных моделях теорий со скрытыми параметрами (Бом, Вижье, де Бройль и др.), с точки зрения Эйнштейна, не могло быть признано им удовлетворительным.

Действительно, вся аргументация Эйнштейна основывалась на том, что "встроенный" в квантовую механику "механизм вывода", согласно которому измерение над одной частицей влияет на состояние другой, находящейся вдали от первой, не отражает никакого реального физического процесса, а имеет субъективную, логико-информационную природу, аналогично тому, как это имеет место в классической механике, также допускающей существование корреляций между пространственно-разделенными событиями, а следовательно, и мгновенные изменения вероятностных распределений, индуцированные измерениями на расстоянии. Но в моделях теорий со скрытыми параметрами возникала прямо противоположная картина. Работа по восстановлению классического детерминизма начиналась с Ψ -функции, которую пытались дополнить скрытыми параметрами. В рамках обычного трехмерного пространства эти модели оказывались с неизбежностью нелокальными, что не вызывало особого удивления, поскольку скрытые параметры вводились в нерелятивистскую теорию. Возникающую при этом картину "мгновенно информирующих друг друга частиц" можно было после этого попытаться улучшить, сделав ее релятивистски инвариантной, т.е. интерпретировать выполнение первого измерения как причинное запаздывающее влияние на результат второго. И все же такая картина с физической точки зрения по целому ряду причин, на которых мы не имеем

здесь возможности остановиться, остается мало привлекательной. Но если не "впадать в искушение рассматривать выполнение первого измерения как причинное влияние на результат второго" (а Эйнштейн в него, как мы видели, не впадал. – *Авт.*), то, как отмечает Белл, остается допустить, что "результат второго измерения фактически предопределен заранее переменными, которые мы не контролируем, но которые обнаруживаются первым измерением, и мы можем поэтому в принципе предвидеть результат второго" [34]. Иными словами, предполагается, что еще до измерения в данной области пространства уже имеется определенная информация, связанная с физической системой, которая затем просто фиксируется первым измерением и распространяется в неискаженном виде к месту нахождения другого прибора. Всю картину событий можно попытаться сделать, таким образом, объективно локальной, и это, видимо, ближе всего к той форме описания, которую, по мнению Эйнштейна, должна иметь фундаментальная физическая теория. В более конкретном виде все это выглядит так. Рассматривается уже знакомая нам система двух частиц со спином $1/2$ и "общей судьбой", которые удаляются друг от друга к разным приборам, измеряющим знаки их спинов вдоль направлений \vec{a} и \vec{b} соответственно. Затем принцип локальности Эйнштейна интерпретируется как утверждение, что каждая из измеряемых нами частиц имеет некоторое свойство, которое мы 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 $P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})$ (где $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ – единичные векторы), для которой оказывается справедливым следующее неравенство:

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

Заметим, что $P(\vec{b}, \vec{c})$ в данном случае отрицательна. Этот результат, называемый неравенством Белла, получается с помощью простых преобразований, воспроизводить которые здесь нет возможности. 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 [35]. Клаузер и Хорн [36] 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:

$P_{\text{к.м.}}(\vec{a}, \vec{b}) = -\cos(\alpha)$, где α – угол между фиксированными ориентациями анализаторов. Если теперь подставить $P_{\text{к.м.}}(\vec{a}, \vec{b})$ 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.

Различными группами экспериментаторов была проведена большая работа по проверке предсказаний квантовой механики с точки зрения теоремы Белла. И хотя эту работу нельзя считать полностью законченной, большинство до сих пор выполненных измерений свидетельствуют в пользу квантовой механики. Ее предварительные итоги достаточно определенно выразили Клаузер и Хорн в следующих словах: "Физики всегда пытались моделировать микроскопические и макроскопические явления в терминах объективных сущностей с предпочтительно более или менее ясной структурой. Наша работа была стимулирована вопросом: возможно ли перестроить или переинтерпретировать существующий формализм квантовой механики таким образом, чтобы восстановить объективность (описания. – *Авт.*) природы и оказалось бы возможным строить такие (не обязательно строго детерминистические) модели. Мы нашли, однако, что естественным образом, согласуясь с локальностью и без наблюдаемых изменений в экспериментальных предсказаниях, это сделать невозможно" [37]. Но, если "объективно локальные теории" не подходят для моделирования квантовых явлений, тогда для этой цели остаются теории нелокального типа, т.е. теории, которые нарушают неравенство Белла наподобие ранней модели Д. Боба. Однако, как справедливо заметил А. Шимони [38], хотя априори против такого рода теорий возражать, конечно, не следует, ибо природа, как показывает история науки, не брала на себя обязательств сохранять наши априорные концепции, тем не менее против класса нелокальных теорий существуют серьезные методологические возражения, поскольку он оказывается слишком широким, а потому адаптируем к любому набору экспериментальных данных. Необходимы какие-то дополнительные эвристические принципы выбора, с помощью которых можно было бы сузить класс нелокальных теорий и получить специфические для него экспериментальные следствия [39].

Подведем теперь некоторые итоги. Первый и наиболее очевидный вывод из сказанного состоит в том, что надеждам Эйнштейна не суждено было оправдаться. Его требования локальности действительно оказались несовместимыми со статистическими предсказаниями квантовой теории, однако эксперимент разрешил это противоречие в пользу квантовой теории, а не его условия локальности. В этом смысле квантовая механика является нелокальной теорией, причем ее нелокальность не связана с нашим незнанием, как полагал Эйнштейн, она отражает "реальную фактическую ситуацию", но не на уровне статистических предсказаний релятивистской квантовой теории, а на уровне индивидуальных событий. Квантовая нелокальность, или в другой терминологии – неотделимость [40], вообще говоря, не противоречит *СТО*, которая фактически основывается на утверждении, согласно которому не существует операционально хорошо определенных сигналов для передачи информации со скоростью, большей скорости C . По-видимому, квантовую нелокальность нельзя использовать в качестве канала для передачи информации со сверхсветовой скоростью, так что на операциональном уровне никакого конфликта между квантовой механикой и *СТО* не существует [41].

Однако значение теоремы Белла отнюдь не сводится к тому, что она "нанесла решающий удар по позиции Эйнштейна в его споре с Бором". Как это ни парадоксально на первый взгляд, результат Белла, с особой резкостью высветивший хорошо известную и ставшую привычной для физиков специфичность квантовых явлений, наоборот, в чем-то и содействовал укреплению позиции Эйнштейна. В условиях нового этапа развития физики, которая все более становится физикой космологической, а также изменившихся философских умонастроений в среде ученых Запада результат Белла привлек внимание многих физиков к старым вопросам Эйнштейна: что такое фундаментальная физическая теория, в какой форме она должна осуществляться и в чем должна состоять ее интерпретация?

Поиски "объективной формы описания", предпринятые как самим Беллом, так и рядом других исследователей, ясно свидетельствуют о том, что

физика не рассталась окончательно с эйнштейновским идеалом "независимого наблюдателя" и теперь пытается вернуться к нему. Эти попытки, по нашему мнению, выражают закономерную тенденцию в развитии физики, и их нельзя расценивать как методологически несостоятельные. Однако при этом было бы ошибочно думать, 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 [42]. 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. Для семантической согласованности теории необходимо к "каналу наблюдателя" подключить еще обобщенный теоретический образ исследуемого универсума [43]. Квантовая механика такого хорошо отрефлектированного образа еще не имеет, на что, собственно, и указывал Эйнштейн. В этом смысле она, очевидно, не является полной или, лучше сказать, до конца укомплектованной теорией. Следующий шаг на пути концептуального развития квантовой механики должен быть, видимо, в методологическом отношении связан уже не с противопоставлением, а с объединением двух идеалов физического познания, символизируемых наблюдателем-участником и независимым метанаблюдателем в единой теоретической системе. Однако более подробный анализ этого вопроса выходит за рамки настоящей статьи.

Примечания

1. См.: Bell I.S. On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox // *Physics*. 1964. Vol. 1. P. 145-149.
2. Stapp. H.P. Bell's Theorem and World Process // *Nuovo Cimento*. 1975. Vol. 29B. N 2. P. 271.
3. См.: D'Espagnat B. Use of Inequalities for the experimental test of a general Conception of the Foundation Microphysic // *Physical Review*. 1975. Vol. 11. N 6. P. 1424.
4. См.: Shimony A. Experimental Test of local Hidden-Variable Theories // *Foundation of Quantum Mechanics: Proceeding of the International School "Enrico Fermi"*. Course 49. N.Y., 1972.
5. См.: Lochak E. Has Bell's Inequality a General Meaning for Hidden-Variable Theories // *Foundation of Physics*. 1976. Vol. 6. N 2. P. 173.
6. См.: Bub J. On the Completeness of Quantum Mechanics // *Contemporary Research in the Foundation and Philosophy of Quantum Physics*. Dordrecht, 1973. P. 32.
7. См.: Baracca A., Bohm D., Hiley B., Stuart A. On Some New Notions Concerning Locality and Nonlocality in the quantum theory // *Nuovo Cimento*. 1975. Vol. 28B. N 2. P. 254.
8. См.: Bell I.S. Introduction to the Hidden-Variable Questions // *Foundation of Quantum Mechanics*. P. 171.
9. Эйнштейн А. Письмо к М. Борну от 12.5.1952 г. // *Эйнштейновский сборник*. 1972. М., 1974. С. 66.
10. См.: Эйнштейн А. Указ. соч. С. 74.
11. Письмо Паули Борну от 31.3.54 // *Эйнштейновский сборник*. 1972. С. 91.
12. Там же. С. 96.
13. Письмо Паули Борну от 15.4.54.
14. Говоря о своем отношении к традиционным философским системам, Эйнштейн отмечал, что ученый "с благодарностью принимает

гносеологический анализ понятий, но внешние условия, поставленные перед ним опытными фактами, не позволяют ему чрезмерно ограничивать себя принадлежностью к некоторой философской системе при построении понятий. Поэтому в глазах последовательно мыслящего философа он предстает как оппортунист, бросающийся из одной крайности в другую. Как человек, пытающийся описать мир, не зависящий от актов восприятия, он кажется реалистом. Как человек, считающий понятия и теории свободными (не выводимыми логическим путем из эмпирических данных) творениями человеческого разума, он кажется идеалистом. Как человек, считающий свои понятия и теории обоснованными лишь в той степени, в какой они позволяют логически интерпретировать соотношения между чувственными восприятиями, он является позитивистом. Он может показаться точно так же и платонистом и пифагорейцем, ибо он считает логическую простоту непреложным и эффективным средством своих исследований" (Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М., 1967. Т. 4. С. 310-311).

15. Bell J.S. Op. cit. P. 172.

16. См.: Бом Д. Квантовая теория. М., 1965. С. 702-704.

17. Борн М. Письмо к Эйнштейну от 9.5.48 // Эйнштейновский сборник. 1972. С. 51.

18. Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Можно ли считать квантовомеханическое описание полным? // Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М., 1966. Т. 3. С. 605.

19. См.: Jamer M. The Philosophy of Quantum Mechanics. N.Y., 1974.

20. См.: Гейзенберг В. Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие физики. М., 1958. С. 24.

21. См.: Heisenberg W. Plank's discovery and Philosophical problems of atomic physics // On Modern physics. N.Y., 1961. P. 9-10. Что касается отношения Эйнштейна к философии Аристотеля, то свое неприятие ее он ясно выразил в одном из своих писем к М. Соловину в 1947 г.: "Среди произведений, которые я по вечерам читаю сестре, – писал Эйнштейн, – были и некоторые

философские труды Аристотеля. Откровенно говоря, я был разочарован. Не будь они столь туманными и запутанными, образчики философии такого рода не смогли бы просуществовать так долго. Но большинство людей испытывает священный трепет именно перед теми словами, которые не доступны их пониманию, и считает поверхностным того автора, которого они могут понять" (Эйнштейн А. Собр. науч. тр. Т. 4. С. 560). Как видим, философские вкусы Эйнштейна и Гейзенберга были существенно различны, так что в плане "метафизики" конфликт их взглядов был неизбежен.

22. Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Указ. соч. С. 608.
23. Эйнштейн А. Квантовая механика и действительность // Собр. науч. тр. Т. 3. С. 614.
24. Борн М. Комментарий к письму А. Эйнштейна от 28.10.52. // Эйнштейновский сборник. 1972. С. 69.
25. Борн М. Письмо к Эйнштейну от 9.5.48. С. 53.
26. Беккер Л.М. Психические процессы. Л., 1976. Т. 2. С. 132.
27. Борн Н. Атомы и человеческое познание // Избр. науч. тр. Т. II. С. 511.
28. Bohr N. Essays 1958/1962 on Atomic Physics and Human Knowledge. N.Y., 1963. P. 90.
29. См.: Jouch I.M. Foundation of Quantum Mechanics // Foundation of Quantum Mechanics. P. 20-55.
30. См.: Эйнштейн А. Элементарные соображения по поводу интерпретации квантовой механики // Собр. науч. тр. Т. 3. С. 618.
31. Там же. С. 622.
32. Письмо Паули Борну от 31.3.54. С. 94.
33. Эйнштейн А. Квантовая механика и действительность. С. 615.
34. Bell I.S. On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. P. 172-173.
35. См.: Eberhard P. Bell's Theorem without Hidden-Variable // Nuovo Cimento. 1977. Vol. 3803B. N 1. P. 75.
36. См.: Clauser I., Horne M. Experimental consequences of objective Local Theories // Physical Review D. 1974. Vol. 10. N 2. P. 526.

- 37.См.: Clauser I., Horne M. Op. cit. P. 532.
38. Shimony A. Op. cit. P. 192.
- 39.См.: Shimony A. Op. cit. P. 192.
- 40.См.: D'Espagnat B. Quantum Logic and Nonseparability // The Physicist's Conception of Nature. Dordrecht, 1973.
41. Строго говоря, это утверждение нуждается в дополнительном исследовании. Для того, чтобы сделать его более обоснованным, необходимо доказать, что в длинной последовательности макрособытий, с которыми имеют дело экспериментаторы, выполняющие серии однотипных измерений, действительно отсутствуют какие-то характерные особенности, признаки, метки и т.д., и из этих последовательностей поэтому невозможно извлечь никакой информации, т.е. они имеют чисто случайную природу. Однако такое доказательство в рамках обычной квантовой механики отсутствует (см.: Benioff P.A. Possible Strengthening on the Integrative Rules of Quantum Mechanics // Physical Review D. 1973. Vol. 7. N 3). В то же время высказываются соображения в пользу идеи о существовании канала сверхсветовой передачи информации. Так, Стэпп, анализируя теорему Белла и ее следствия в "философских рамках существующей квантовой теории", приходит к выводу, что "сверхсветовой перенос информации является необходимым" для более полного и глубокого понимания Природы как фундаментального процесса в духе метафизики реальности Уайтхеда. См.: Stapp H.P. Are Superluminal Connections Necessary? // Nuovo Cimento, 1977. Vol. 40B. N 1. P. 202.
- 42.См.: Паули В. Феномен и физическая реальность // Паули В. Физические очерки. М., 1975. С. 27.
- 43.См.: Тондл Л. Проблемы семантики. М., 1975. С. 296.