

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

530.145

О НЕЛОКАЛЬНОСТИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ*Б. И. Спасский, А. В. Московский*

В современной теории поля действует принцип локальности, предполагающий «такой механизм взаимодействия между полями, при котором влияние одного из полей, например u , на другое, например v , имеет локальную в пространстве-времени структуру, т. е. поведение поля v в точке x пространства-времени определяется значением поля u (u , возможно, его производных) в той же точке пространства-времени»⁶⁸. В этом смысле под нелокальными теориями имеют в виду целый класс обобщений квантовой теории поля, основанных на предположении о неточности взаимодействия⁶².

Термин нелокальность используется в современной литературе еще и в несколько ином смысле. Дело в том, что существует целый ряд квантовых явлений, которые с точки зрения классической можно интерпретировать как проявление особого рода нелокальности, присущей квантовым объектам. Мы имеем в виду эффект Ааронова — Бома, парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена, эффект Брауна — Твисса и другие подобного рода явления. Их обсуждению и посвящена данная статья.

Одна из особенностей возникновения и развития квантовой теории состоит в том, что сначала был создан математический аппарат этой теории, а затем началось выяснение физического смысла этого аппарата. Прежде всего появились попытки построить интерпретацию, основанную на классических представлениях, однако очень быстро стало ясно, что эта задача неразрешима.

Так, уже в 1910 г. Г. А. Лоренц, обсуждая гипотезу о корпускулярных свойствах света, пришел к заключению о невозможности дать непротиворечивое объяснение корпускулярно-волнового дуализма света. Он рассуждал примерно так¹:

Если предположить, что пучок световых лучей является потоком частиц, то как можно тогда объяснить интерференцию, дифракцию и тому подобное? Устойчивую интерференционную картину дают только когерентные лучи, поэтому, например, при прохождении пучком полупрозрачного зеркала нужно предположить, что либо один фотон делится на два, и интерферируют между собой эти две половины, или же интерферируют разные фотоны, являющиеся когерентными. Но первое предположение было трудно принять, так как известны были случаи интерференции при большой (порядка метра) разности хода. Отсюда следовало бы, что фотоны должны иметь размеры такого же порядка, что представлялось явно неразумным. Но и другое предположение, согласно которому фотоны в световом пучке образуют когерентный ансамбль, встречало затруднение, так как сразу же возникал вопрос: почему одни фотоны отражаются, а другие преломляются, или почему два фотона, попадая в то место экрана, где наблюдаются темные полосы, уничтожают друг друга.

После открытия корпускулярно-волнового дуализма частиц (электронов) подобные вопросы стали еще более острыми. Некоторые физики

(де Бройль, Шредингер и др.) попытались разработать модель, которая как-то объединяла корпускулярные и волновые свойства частиц, однако эти попытки успехом не увенчались.

Принципиально иной подход был предложен в рамках так называемой «копенгагенской» школы (Бор, Гейзенберг, Борн и др.): для того чтобы дать логически непротиворечивую интерпретацию квантовой механики, необходимо пересмотреть сами основы классической физики. И хотя внутри копенгагенской интерпретации существовало множество оттенков в трактовке роли наблюдателя, природы статистичности микропроцессов, эти разногласия носили в основном методологический характер.

Согласно этому подходу, пока частица не взаимодействует с каким-либо классическим объектом, она не имеет определенных пространственно-временных характеристик, находясь как бы сразу во всех тех областях пространства, где соответствующая ей волновая функция отлична от нуля. В этом духе можно, например, трактовать явление интерференции частицы на двух отверстиях: пока частица не попала на флуоресцирующий экран, она нелокализована и как бы проходит сразу через обе щели, от которых наблюдается интерференция.

1. ЭФФЕКТ ААРОНОВА И БОМА. СОВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Свойство нелокализации частиц в квантовой механике стало в 60-е годы предметом специального обсуждения в связи с работами Ааронова и Бомы, которые обратили внимание на существование явления, получившего название эффекта Ааронова и Бомы.

Этот эффект заключается в следующем. Из классической электродинамики следует, что поведение заряженной частицы зависит от величины электромагнитного поля только в той точке пространства, где она в данный момент находится. Если во всей области возможного движения частицы поле отсутствует, ее движение остается невозмущенным. Другими словами: по движению частицы в пространстве, свободном от поля, нельзя судить о том, есть ли поле в других частях пространства. Между тем на поведение квантового объекта может влиять существование поля и там, где вероятность обнаружения частицы равна нулю. Впервые на это обстоятельство указали В. Эренберг и Р. Е. Сайди в статье, опубликованной в 1949 г.² Десять лет спустя Я. Ааронов и Д. Бом в серии статей³ подробно рассмотрели этот вопрос. Один из мысленных экспериментов, предложенных Аароновым и Бомом, таков. Плоская электронная волна длины λ дифрагирует на экране с двумя щелями. За щелями помещены два длинных проводящих цилиндра длиной $l \gg \lambda$. Каждая из частей разделенного волнового пакета проходит через свою цилиндрическую трубу, и, отклоняясь под действием призм, имеет возможность интерферировать с другой. Когда пакеты втягиваются в трубки, к ним прикладывается постоянная разность потенциалов; до того, как пакеты начинают выходить из трубок, разность потенциалов снимают. Как показывает расчет, вид дифракционной картины зависит от разности потенциалов, приложенных к цилиндрам, так как пакеты, подвергшиеся действию потенциалов φ_1 и φ_2 , получают дополнительную разность фаз, пропорциональную $\varphi_1 - \varphi_2$. Между тем внутри цилиндра поле равно нулю, так как потенциал постоянен вдоль его длины. Поле существует только в пространстве вне цилиндров, где вероятность обнаружения электрона исчезающе мала. Итак, по виду интерференционной картины можно судить о наличии поля в тех частях пространства, где с классической точки зрения заряженная частица «заведомо отсутствует». Или, другими словами, «поле действует там, где его нет». Это противоречит принципу близкодействия и с точки зрения классической физики должно быть интерпретировано как действие на расстоянии.

Аналогичный эксперимент был предложен для случая движения электрона в пространстве около бесконечно длинного соленоида. Как и в опыте с электрическим полем, плоская электронная волна разделяется на две ветви с помощью экрана или отклоняющих призм и обтекает с двух сторон соленоид, перпендикулярный плоскости движения. Затем части волнового пакета сводятся для интерференции. В пространстве вне соленоида магнитное поле равно нулю. Однако векторный потенциал вне соленоида отличен от нуля, и хотя электрон не испытывает действия магнитного поля, благодаря существованию векторного потенциала, ветви волнового пакета приобретают разность фаз, которая определяет характер интерференционной картины.

Ферри и Рамсей подробно исследовали обе экспериментальные ситуации⁶. Они показали, что, вводя дополнительные конденсаторы, соединенные с теми, где проходит электронная волна (в случае электростатического поля), или помещая проводящий контур в пространство около соленоида, можно определить, по какому из путей двигался данный электрон. Но при этом исходная интерференционная картина искажается, аналогично тому, как это происходит, когда в случае дифракции электрона на двух щелях мы захотим узнать, через какую именно щель пролетела данная частица *).

В классической электродинамике поля E и H рассматриваются как основные физические сущности, в то время как скалярный и векторный потенциалы имеют значение вспомогательных математических понятий, служащих для их вычисления. Эффект Ааронова и Бом как бы является указанием на то, что в квантовой физике потенциалы играют роль, аналогичную роли полей в классической физике. Этот вывод кажется тем более неожиданным, что сами потенциалы определяются с точностью до калибровочного преобразования. Именно вопрос об «особой роли потенциалов в квантовой механике» (так называлась одна из первых статей Ааронова и Бом) и явился предметом особенно оживленной дискуссии. В своей первой статье Ааронов и Бом указали две возможности интерпретации эффекта: или отказаться от принципа локальности, или признать, что потенциалы есть физическая сущность не менее фундаментальная, чем поле. Но последнее означало бы возможность обнаружить физическое различие между состояниями, отличающимися только калибровкой. В своих последующих статьях авторы отказались от второй точки зрения и интерпретировали эффект как проявление нелокальности в поведении квантовых объектов. Однако, безотносительно к интерпретации эффекта, с классической точки зрения эффект Ааронова — Бом можно было бы рассматривать как доказательство действия на расстоянии. Но квантовая природа явления не позволяет нам делать такой вывод. Дилемма дальнего действия — ближнего действия, сформулированная на языке классических представлений о локализованных частицах, теряет свою законность в области квантовой физики, где представление о локализованном объекте может быть введено лишь условно **). Как показали Ферри и Рамсей в цитированной нами работе, эффект Ааронова — Бом наблюдается лишь в таких экспериментальных условиях, когда заведомо нельзя говорить о локализованной частице, но с другой стороны, если каким-либо способом произвести измерение координаты, т. е. локализовать частицу, явление полностью исчезает.

*) Первые экспериментальные подтверждения существования эффекта были получены еще в начале 60-х годов⁴. Между тем вопрос об интерпретации этих экспериментов служит до сих пор предметом дискуссии, вызванной в значительной степени серией статей, опубликованных Бокьери и Лонжье⁵. Эти авторы считают, что эффект Ааронова — Бом имеет чисто математическую природу и в действительности не может наблюдаться, а имеющие место эффекты следует объяснить неучтенными артефактами. Целый ряд авторов³ выступили с критикой аргументов Бокьери и Лонжье, указывая, что эффект Ааронова — Бом убедительно доказан теоретически и экспериментально. Из самых последних экспериментов отметим работу⁷¹, которая интересна, в частности, тем, что с целью устранения краевых эффектов в ней были использованы тороидальные магниты.

**) Подробнее см.⁸.

Еще одной иллюстрацией свойства нелокальности квантовых объектов могут служить интерференционные эксперименты, проведенные в 60-х годах Пфлигором, Манделем и Маджером. Они показали, что перекрывающиеся пучки лучей двух лазеров могут дать интерференционную картину (см. ⁹). На первый взгляд эти результаты противоречат дираковской концепции фотона, согласно которой «каждый фотон интерферирует только сам с собой, а интерференция между отдельными фотонами никогда не происходит» ¹⁰. «Рассуждая классически», можно думать, что, поскольку два фотонных пучка возникают в двух различных лазерах, наблюдаемый эффект обязан взаимодействию между двумя различными фотонами.

Между тем эксперименты не оставляют возможности для такого вывода: интерференционная картина сохраняется и в том случае, когда падающий на регистратор световой пучок уменьшен настолько, что в пространстве между ослабляющим фильтром и регистратором находится не более чем один фотон.

С классической точки зрения этот результат кажется неожиданным, хотя «фотон интерферирует только сам с собой» ¹⁰, в образовании интерференционной картины одинаково важна роль каждого лазера, так как она меняется при выключении одного из них. Как может фотон, испускаемый одним лазером, «знать» о том, включен или выключен другой?

Отметим, что данная ситуация не более парадоксальна, чем в интерференционных опытах Юнга с двумя щелями: и здесь фотон «взаимодействует сам с собой», «знает» о состоянии сразу двух щелей.

Корень этих парадоксов лежит в классическом представлении о локализованной частице-фотоне. Вопрос о том, «каким лазером испущен данный фотон?», имеет с квантовой механикой точки зрения не больше смысла, чем «через какую щель пролетел фотон» в опыте Юнга. И в том и в другом случае попытка «подсмотреть» за полетом фотона через щели или «маркировка» испускаемых лазерами квантов неизбежно разрушает исходную интерференционную картину.

Итак, «интуитивно ясное» классическое представление о независимых атомах, каждый из которых испускает «свой» фотон, в данном случае неприменимо. Квантовая система излучает как единое целое даже тогда, когда ее различные части удалены друг от друга на макроскопическое расстояние *).

Как подчеркивает Р. Саймонд, «все источники фотонов во Вселенной следует рассматривать как один источник с определенным пространственным распределением и вычислять общую волновую функцию этого «мирового источника». Деление «мирового источника» на независимые части в значительной степени произвольно... и возможно только в особых экспериментальных ситуациях, при которых можно ассоциировать определенно расположенный источник с наблюдаемыми фотонами, например, когда амплитуда вероятности по путям от других источников к точке наблюдения пренебрежимо мала» ¹¹.

Это присущее квантовым источникам свойство «неразложимости» можно продемонстрировать также и эффектом Брауна и Твисса, «интерференцией интенсивностей» ¹². Суть его состоит в следующем. Допустим, что мы имеем два источника света A и B , помещаемые на большом расстоянии от двух детекторов фотонов a и b . Детекторы подключены к схеме совпадений, регистрирующей количество фотонов, одновременно приходящих к a и b . Тогда, как показывает расчет ¹³, количество совпадений является периодической

*) В качестве еще одной иллюстрации этого можно рассмотреть интерферометр Майкельсона. Так как наблюдаемая картина зависит от взаимного положения зеркал, фотон, в известном смысле, взаимодействует с каждым из них. Однако такое взаимодействие нельзя трактовать классически как поглощение и испускание частей фотона отдельным зеркалом: квант может поглощаться только как целое. Поэтому совокупность двух зеркал следует рассматривать как вторичный излучатель, аналогичный двухлазерной установке Пфлигора и Мандела.

функцией $R_2 - R_1$, где R_1 — расстояние между A и a , R_2 — расстояние между B и b . Отметим, что квантовая особенность такого расчета состоит в невозможности отличить фотоны, попадающие в a из A от фотонов, попадающих в a из B . Если опыт построен так, что такое различие становится возможным, эффект отсутствует.

Разумеется, это явление кажется парадоксальным с точки зрения классических представлений: оно как бы означает, что фотоны, испускаемые двумя «независимыми» источниками, «знают» о поведении друг друга. Но, как мы видим, эта «независимость» сама по себе является классической абстракцией, имеющей конкретный смысл только в условиях такого опыта, в котором, благодаря какой-либо «маркировке», фотоны, приходящие от различных источников, различаются. Но тогда эффект отсутствует — складываются не амплитуды, а интенсивности.

2. ПАРАДОКС ЭЙНШТЕЙНА, ПОДОЛЬСКОГО И РОЗЕНА

Один из наиболее интересных аспектов нелокальности в квантовой механике был выявлен в связи с парадоксом Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР).

Впервые этот парадокс был сформулирован в статье названных авторов 1935 г., озаглавленной «Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?».

Прежде всего Эйнштейн с соавторами объясняют, что они понимают под полной теорией и физической реальностью. «Какой бы смысл не укладывался в термин «полное описание», от всякой полной теории, как нам кажется, необходимо требовать следующее: каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории»⁵⁸, т. 3, с. 605. Смысл этого определения зависит от содержания, вкладываемого в термин «элемент физической реальности». При каком условии следует считать, что нечто (объект или качество этого объекта) обладает физической реальностью? Авторы дают такое определение: «Если мы можем, без какого-либо возмущения системы, предсказать с достоверностью (т. е. вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине» (там же). Они иллюстрируют это определение, указывая, что если физическая система находится в состоянии, описываемом собственной функцией некоторого оператора A , т. е. если $A\psi = a\psi$, то соответствующая этому оператору физическая величина имеет значение a . Далее они подчеркивают, что согласно квантовой механике система не может находиться одновременно в собственных состояниях двух некоммутирующих операторов. Поэтому для некоммутирующих операторов соответствующие им физические величины не могут одновременно существовать.

Авторы выдвигают дилемму: «или 1) квантовомеханическое описание реальности посредством волновой функции неполно, или 2) когда операторы, соответствующие двум физическим величинам, не коммутируют, эти две величины не могут одновременно быть реальными» (там же, с. 607).

Эйнштейн, Подольский и Розен показывают, что если принять их критерий реальности, то волновая функция не дает полного описания физической системы. Рассматриваются две системы I и II, некоторое время взаимодействующие между собой; это могут быть, например, две частицы, затем эти частицы разлетаются. Согласно квантовой механике, их состояние описывается общей волновой функцией. ЭПР показывает, что в результате двух различных измерений, производимых над первой системой, вторая система может оказаться в двух разных состояниях, описываемых различными волновыми функциями. Парадоксальность ситуации, согласно ЭПР, заключается в том, что «так как во время измерения эти 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... Таким образом, одной и той же реальности (вторая система после взаимодействия с первой) можно сопоставить две различные функции (там же). Это тем более парадоксально, что соответствующие волновые функции могут оказаться собственными функциями двух некоммутирующих операторов P и Q . В таком случае, производя измерение над первой системой, можно будет предсказать «с достоверностью и без какого-либо возмущения второй системы» значения соответствующих величин для этой системы. Но поскольку процесс измерения над первой системой никак не влияет на вторую, приходится признать, что для второй системы соответствующие P и Q физические величины одновременно существуют. «Итак, — пишут ЭПР, — мы вынуждены заключить, что квантовомеханическое описание физической реальности посредством волновых функций не является полным» (там же, с. 610).

В конце статьи ЭПР делают два важных замечания. Первое из них предваряет критику их определения физической реальности. «На это заключение можно было бы возразить, что наш критерий реальности не является достаточно определенным. Действительно, мы не пришли бы к нашему заключению, если бы настаивали на том, что две или больше физических величин могут одновременно считаться элементами реальности только в том случае, если их можно одновременно измерить или предсказать. С этой точки зрения величины P и Q одновременно не обладают реальностью, поскольку предсказать можно либо P , либо Q , но не P и Q одновременно» (там же, с. 610). Но такое возражение ЭПР заранее отвергают, поскольку тогда реальность этих величин для второй системы оказывается зависящей от процесса измерения, производимого над первой. Но это невозможно, так как «никакое разумное определение реальности не должно, казалось бы, допустить этого» (там же).

Ответ Бора последовал менее чем через два месяца после появления статьи ЭПР. Острие его аргументации направлено против эйнштейновского понятия реальности: «Всякий критерий реальности, подобный предложенному упомянутыми авторами, — пишет Бор, — будет ... содержать существенную неоднозначность, если мы станем применять его к действительным проблемам, которые нас здесь интересуют»⁽¹⁵⁾, с. 182). В чем причина такой неоднозначности, Бор разъясняет как в статье 1935 г., так и во многих других работах, посвященных методологическим вопросам квантовой теории.

Основная ошибка Эйнштейна, по мнению Бора, состоит в том, что он приписывает квантовым объектам наличие свойств безотносительно к той реальной экспериментальной ситуации, в которой эти свойства проявляются. Такой подход, правомерный в классической физике, невозможен в квантовой: «Мы сталкиваемся в атомной физике с совершенно новой ситуацией, когда принципиально невозможно провести четкое разграничение между внутренними свойствами объектов и их взаимодействием с измерительными приборами, которые необходимо использовать для самого обнаружения этих свойств»⁽¹⁵⁾, с. 383). Таким образом, считает Бор, парадокс ЭПР, происходящий из кажущейся несовместимости свойств объекта, наблюдаемого при различных экспериментальных условиях, находит свое объяснение во взаимоисключаемости необходимого для этих наблюдений экспериментального оборудования. Иными словами, то, что измеряя импульс одной частицы, мы можем однозначно предсказать результат измерения импульса другой, вовсе не означает, по Бору, что импульс второй частицы реально существует до процесса его действительного измерения.

После статей Эйнштейна с соавторами и Бора рассмотренный парадокс неоднократно подвергался анализу. Было высказано много различных соображений и по поводу взглядов Эйнштейна и взглядов Бора, см., например,¹⁶⁻¹⁸. Наиболее широко распространенным было мнение, опирающееся на копенгагенскую интерпретацию квантовой механики. Данный подход

сводится к тому, что обе частицы до измерения не являются локализованными в пространстве и поэтому говорить о том, что они разлетелись на большое расстояние, не имеет смысла. Они как бы присутствуют одновременно везде, поскольку их волновая функция распределена по всему пространству. Для того чтобы быть уверенным, что частицы разлетелись на большое расстояние, нужно провести над ними измерение, которое нарушает их общую волновую функцию. При этом измерение не обязательно означает непосредственное взаимодействие прибора с объектом. Возможно опосредственное измерение, которое ничем принципиально не отличается от непосредственного.

Однако такой подход к решению парадокса ЭПР удовлетворял не всех, высказывались и другие идеи. Существовало мнение, что парадокс снимается, если считать, что волновая функция описывает не одну частицу, а статистический ансамбль системы. Тогда измерение, например, импульса одной частицы, будет означать выбор соответствующего подансамбля как части всего ансамбля, описываемого функцией ψ . В этом случае корреляция между двумя частицами имеет статистический характер, а вместе с этим снимается и весь парадокс.

Отметим, что и сам Эйнштейн понимал возможность такой постановки вопроса, но считал, что в этом случае квантовая механика не может рассматриваться как полная теория, поскольку не дает описания поведения отдельных микрообъектов. Он писал: «В конце концов кажется неизбежным представление, что физика должна стремиться к описанию реального состояния отдельной системы. Природу в целом можно рассматривать только как отдельную (однократно существующую) систему, а не как «ансамбль систем»⁶⁸, т. 3, с. 622).

Иное решение парадокса ЭПР предложили В. А. Фок и А. Д. Александров, выдвинувшие представление о «несиловом взаимодействии» квантовых объектов. В своих комментариях к «Автобиографическим заметкам» Эйнштейна Фок писал, что ошибка Эйнштейна состоит именно в отрицании всяких взаимодействий, кроме силовых. Особенность поведения квантовых объектов, фиксируемая парадоксом ЭПР, и есть, по мнению Фока, ясное указание на существование «несилового взаимодействия». Другим примером такого взаимодействия может, по его мнению, служить корреляция поведения микрообъектов, выражаемая принципом Паули¹⁹.

А. Д. Александров также считает, что в рассуждениях ЭПР содержится ошибка. Она состоит в предположении, что разлетевшиеся частицы более не взаимодействуют. Такое представление вполне соответствует классическим представлениям, но неверно с точки зрения квантовой. Именно то обстоятельство, что квантовая механика приписывает ψ -функцию только обоим частицам вместе, но не каждой в отдельности, и есть, по мнению А. Д. Александрова, указание на существование особой несиловой связи между ними. «Мы можем не представлять себе этой связи наглядно, она может оказаться необычной ..., но мы должны признать наличие связи, если только принимаем квантовую механику всерьез и считаем, что ψ -функция есть представитель состояния», — подчеркивает А. Д. Александров²⁰.

В качестве другого примера несилового взаимодействия он рассматривает явление интерференции от двух зеркал. Интерференционная картина, которая определяется положением зеркал, означает, что отдельный фотон испытывает на себе такое «действие зеркал», которое не связано с передачей энергии и импульсов.

Близких позиций придерживаются авторы работы⁶¹. Они считают, что измерение, производимое над одной из коррелированных частиц, меняет состояние другой, причем такое материальное воздействие распространяется сколь угодно быстро. Они подчеркивают, однако, что этот процесс не может служить основой для передачи информации.

Отметим также точку зрения на парадокс ЭПР, высказанную Д. Бомом. В связи со своей интерпретацией квантовой механики, предложенной им

в 50-х годах, основанной на представлении о скрытых параметрах, Бом рассмотрел парадокс Эйнштейна, Подольского и Розена. В своей теории Бом полагал, что, помимо обычного силового взаимодействия, между квантовыми объектами существует другой вид взаимодействия, при котором существуют силы, распространяющиеся мгновенно, причем их величина либо совсем не зависит от расстояния, либо зависит каким-то необычным образом. Если принять существование подобных сил, то можно считать, что взаимодействие между разлетевшимися частицами не прекращается и на большом расстоянии⁵⁴. Существуют также и другие подходы к разрешению рассматриваемого парадокса, на которых мы останавливаться не будем.

В своей книге «Квантовая теория» Бом рассмотрел новый вариант мысленного опыта ЭПР²². Молекула, находящаяся в синглетном состоянии, разлетается на два атома, каждый из которых имеет спин $1/2$. После распада, в силу закона сохранения момента импульса, общий момент импульса обеих частиц по-прежнему будет равен нулю.

Измерим теперь проекцию на ось X моментов импульса первой частицы, пусть мы получим значение σ_x . После этого мы сможем утверждать, что составляющая спина второй частицы по оси X будет равна $-\sigma_x$. Но так как при измерении мы не воздействовали на вторую частицу, то, согласно Эйнштейну, проекция момента импульса вдоль оси X у второй частицы равна $-\sigma_x$ до ее измерения. Но мы можем измерить проекцию момента импульса у первой частицы на ось Y , получив значение σ_y , и тогда другая частица будет иметь слагаемую вдоль этой оси $-\sigma_y$. Но квантовая механика не разрешает иметь одновременно определенные значения двум слагающим момента импульса у одной частицы. Таким образом, мы приходим к тому же парадоксу, что и Эйнштейн, Подольский и Розен. Вариант парадокса ЭПР, рассмотренный Бомом, хотя принципиально и не отличается от парадокса, рассмотренного в первоначальной редакции, тем не менее выглядит проще для теоретического анализа. Помимо этого, можно было надеяться, что эксперимент, предлагаемый Бомом, может быть не только мысленным, но и поставленным реально.

Еще одну модификацию эксперимента Эйнштейна, Подольского и Розена предложили Ааронов и Бом в 1957 г.²³. Теперь речь шла об опыте с фотонами. В случае аннигиляции электрона и позитрона возникают два фотона (два γ -кванта). Расчет показывает, что вылетевшие фотоны излучаются при этом всегда в состоянии поляризации во взаимно перпендикулярных направлениях.

Измеряя теперь поляризацию для одного фотона, мы узнаем одновременно и поляризацию другого, непосредственно не измеряя ее. При этом нужно подчеркнуть, что вылетающие фотоны не обладают определенной поляризацией. Таким образом, в данном случае в наиболее простой форме проявляется квантовомеханическая закономерность, выраженная в парадоксе ЭПР.

3. ТЕОРЕМА БЕЛЛА

Начиная с 60-х годов, парадокс ЭПР обсуждается в связи с теоремой Белла о возможности введения в квантовую механику так называемых скрытых параметров. О создании детерминистической теории микроявлений, которая включала бы в себя квантовую механику, говорили многие выдающиеся физики (Эйнштейн, Шредингер, де Бройль, Бом и другие). Однако более распространенным мнением было мнение о невозможности введения в теорию микроявлений скрытых параметров.

Важную роль в распространении этого взгляда сыграла известная работа фон Неймана⁵⁵, в которой автор предложил доказательство несовместимости теории скрытых параметров с основными положениями квантовой механики. Работа Неймана вызвала дискуссию, в ходе которой выяснилось,

что доказательство, приведенное фон Нейманом, нельзя считать окончательным, поскольку оно основано на предположениях, вообще говоря, не обязательных для любой модели скрытых параметров. Более общее доказательство тезиса фон Неймана было дано в работах Яуха и Пирона⁵⁶, а затем Кохена и Шпекера⁵⁷.

В 1965 г. Д. Белл опубликовал статью¹⁴, в которой проблема скрытых параметров была рассмотрена с новой и, как показали последовавшие события, весьма плодотворной точки зрения. В этой работе им была сформулирована теорема, смысл которой в следующем: теории скрытых параметров, которые воспроизводят все результаты квантовой механики, должны быть существенно нелокальными. Под локальностью Белл понимает выполнение следующего требования: измерение, производимое в точке A , не может влиять на результаты измерения, производимого в точке B .

Белл рассматривает мысленный эксперимент, аналогичный рассмотренному ЭПР. Предположим, что результаты корреляционных измерений определяются в конечном счете значениями, которые имеют «управляющие» поведением частиц скрытые параметры, о свойствах которых не делается никаких явных допущений, кроме одного: они должны удовлетворять принципу локальности. Тогда, как показывает Белл, результаты такого эксперимента должны удовлетворять простому неравенству, известному как неравенство Белла, физический смысл которого легко понять на следующем конкретном примере.

Рассмотрим пары одинаковых атомов, появляющихся в результате распада двухатомной молекулы, находящейся в синглетном состоянии. Эти атомы летят в противоположных направлениях, и по закону сохранения момента импульса проекции спинов таких атомов на некоторую ось имеют противоположное значение. Эти проекции можно измерить с помощью двух идентичных установок Штерна — Герлаха, помещаемых на пути разлета атомов. Оси таких установок (т. е. направление магнитного поля) могут быть ориентированы вдоль любого вектора, лежащего в плоскости, перпендикулярной линии разлета *). Рассмотрим три таких вектора — A , B , C . Допустим, что ось левого анализатора параллельна A , правого — B . Обозначим теперь через $n(A, B)$ вероятность того, что атом пройдет левый поляризатор «вверх» вдоль оси A , а его «близнец» пройдет магнитное поле правой установки «вниз» вдоль оси B . Смысл величин $n(A, C)$ и $n(B, C)$ аналогичен этому. Тогда, как показывает Белл, числа $n(A, B)$, $n(B, C)$ и $n(A, C)$ должны удовлетворять неравенству

$$|n(A, B) - n(A, C)| + n(C, B) + n(C, C) \leq 2.$$

Между тем квантовомеханический расчет показывает, что при определенных случаях ориентации осей это неравенство должно нарушаться. Таким образом, предсказания квантовой механики должны находиться в противоречии с представлением о локальных скрытых параметрах. Значит, если скрытые параметры и существуют, они должны быть существенно нелокальными: измерение, производимое над одной частицей, влияет на значение скрытых параметров, управляющих движением другой.

Работа Белла интересна тем, что указывает целый класс физических ситуаций, когда предсказания квантовой механики и теории скрытых параметров могут различаться. Все же, с чисто экспериментальной точки зрения, неопределенность оставалась, так как ко времени написания неравенства Белла не был проведен ни один опыт, который мог бы служить для его проверки. Более того, сама возможность осуществления этой проверки при существующей технике эксперимента была далеко не очевидной. Дело в том, что Белл вывел свое неравенство из рассмотрения мысленного и, следова-

*) В контексте данного опыта условие локальности означает, что относительное количество частиц, регистрируемых в каналах одной установки, не зависит от ориентации оси другой.

тельно, сильно идеализированного (по сравнению с действительными свойствами регистрирующей аппаратуры) эксперимента.

Ситуация изменилась в 1969 г., когда Клаузер, Хорн, Шимони и Холт опубликовали работу ²⁴, в которой показали принципиальную техническую возможность проведения реального эксперимента. Сделав весьма разумные допущения о свойствах регистрирующей аппаратуры, они вывели неравенство (известное как неравенство Белла — Клаузера — Хорна — Шимони — Холта), которое служит экспериментально проверяемой формой неравенства Белла. В этой же работе была предложена идея измерения корреляции поляризаций фотонов, возникающих при атомном каскадном переходе, осуществленная позже в опыте С. Фридмана и Д. Клаузера 1972 г. ²⁵.

Работа Белла вызвала дискуссию по поднятым ею проблемам. Дискуссия эта далека от завершения, однако уже сейчас можно говорить о ее наиболее «инвариантном слагаемом»: это результаты опытов, предпринятых с непосредственной целью проверки неравенства Белла.

Прежде чем перейти к описанию конкретных экспериментов, укажем, что, безотносительно к виду исследуемых частиц, каждый такой эксперимент состоит из четырех серий корреляционных измерений. Фиксируются три направления A, B, C , лежащие в плоскости, перпендикулярной направлению разлета частиц, причем углы между ними выбираются так, чтобы различие предсказаний об уровне корреляций, следующие из квантовой механики и теории локальных скрытых параметров, было максимально. В первой серии измерений один фильтр (например, поляризатор) и помещенный за ним детектор фиксируют частицы, имеющие плоскость поляризации, параллельную оси A . Второй фильтр, ориентированный параллельно B , и детектор ведут аналогичное измерение с частицами, летящими в противоположном направлении. Схема совпадения регистрирует уровень корреляции отсчетов детекторов. После проведения статистически достоверной серии измерений положение одного из фильтров (например, второго) меняется; он ориентируется в положении C , и измеряется уровень корреляции для осей A и C . В третьей серии измерений фильтры занимают положение B и C . Для нормирующей оценки эффективности работы фильтров, детекторов и схем совпадения проводится измерение уровней совпадений в условиях, когда один из фильтров или оба сразу отсутствуют. Результаты, полученные в четырех сериях измерений, сравниваются в контексте неравенства Белла — Клаузера — Хорна — Шимони — Холта, причем нарушение этого неравенства и служит экспериментальным свидетельством нарушения неравенства Белла.

В зависимости от сорта коррелирующих частиц проведенные к настоящему времени эксперименты можно разделить на три группы.

В экспериментах первого типа измерялась корреляция поляризации фотонов, возникающих в результате каскадного высвечивания возбужденных атомов. Первый такой эксперимент был проведен С. Фридманом и Д. Клаузером в 1972 г. ²⁵. Их результаты показали нарушение неравенства Белла и, следовательно, подтвердили предсказание квантовой механики. Аналогичные опыты осуществили в 1976 г. Э. Фрай и Р. Томсон ²⁶ и Д. Клаузер ²⁷, а в 1981—1982 гг. — А. Аспек, П. Гранжье, Ж. Роже ⁶⁹, их выводы подтверждают выводы статьи Фридмана и Клаузера.

В противоречии с этим находится опыт Холта и Пипкина, проведенный в 1973 г. ²⁸. Их результаты не нарушают неравенство Белла и, таким образом, конфронтруют как с предсказаниями квантовой механики, так и с результатами опытов Фридмана — Клаузера и Фрая — Томсона.

Ко второму типу относятся эксперименты, в которых измеряется корреляция поляризаций γ -квантов, излучаемых в результате аннигиляции позитрона и электрона. Исторически этим опытам предшествует опыт Ву и Шахнова 1949 г. ²⁹, в котором впервые было подтверждено предсказание квантовой теории о наличии такой корреляции, хотя его результаты не могут служить для проверки неравенства Белла ²⁹.

В 1974 г. Фарачи с сотрудниками опубликовали результаты экспериментов, которые оказались неожиданными: данные измерений не нарушали неравенство Белла и, таким образом, находились в противоречии с квантовой механикой³⁰. В следующем 1975 г. были опубликованы результаты опытов, проводившихся в Колумбийском университете. Проводя аналогичный опыт, Кэсди, Ульман и Ву³¹ получили результат, нарушающий неравенство Белла и, следовательно, подтверждающий предсказание квантовой механики.

В 1977 г. сотрудники Болонского университета Бруно, д'Агостино и Марони провели еще один аналогичный опыт и пришли к выводу, совпадающему с выводами Кэсди, Ульмана и Ву³².

В экспериментах третьего типа объектом изучения являются разлетающиеся после столкновения пары протонов. Такой опыт провели в 1975 г. М. Ламей-Рахти и В. Митти³³. Пучок протонов из ускорителя направляется в мишень, в состав которой входили атомы водорода. Образующиеся в результате протонные пары разлетаются, находясь в синглетном состоянии, при этом проекции их спинов на заданные оси коррелируют. Результаты измерений показали нарушение неравенства Белла. Следует отметить, что это пока единственный опыт, в котором объектом измерения служат частицы с отличной от нуля массой покоя, — во всех остальных экспериментах ими являются фотоны.

Таким образом, значительное большинство из проведенных к настоящему времени *) опытов подтвердило предсказания квантовой механики, лишь в двух неравенство Белла не нарушалось. Можно считать поэтому достаточно твердо установленным, что квантовая механика подтверждена — на сей раз — в серии ЭПР-корреляционных экспериментов. Но как тогда следует расценивать «аномальные» результаты двух опытов: Холта — Пипкина и Фарачи? Вопрос этот до сих пор остается не вполне ясным **), но наиболее правдоподобное объяснение таково. Как следует из рассуждений Белла, квантовая механика предсказывает более сильную степень корреляции между явлениями, чем любая теория локальных скрытых параметров. Между тем несовершенство регистрирующей аппаратуры и схем совпадения может приводить к тому, что наблюдаемый уровень корреляции окажется существенно ниже, чем реальный. Чем ниже уровень корреляции, тем больше шансов на то, что результаты измерений не будут нарушать неравенство Белла. В этом смысле для опровержения теории локальных скрытых параметров достаточно лишь одного эксперимента, в котором неравенство Белла нарушается (аналогично тому, как для опровержения закона сохранения энергии было бы достаточно построить всего один действующий экземпляр вечного двигателя).

Итак, есть веские основания полагать, что корреляционные эксперименты, проведенные по проверке неравенства Белла, подтвердили справедливость квантовой механики. Следовательно, и проблема, возникшая вместе с работой Белла, кажется в значительной мере исчерпанной: если скрытые параметры и существуют, они должны быть существенно нелокальными.

4. ЛОКАЛЬНОСТЬ И СЕПАРАБЕЛЬНОСТЬ

Новый и весьма интересный подход к обсуждаемой проблеме сформулирован в работе А. Аспека³⁴. Автор предлагает разделить понятия локальность и сепарабельность (употреблявшиеся до того как синонимы). Смысл такого разделения состоит в следующем. Нелокальность, по Беллу, означает, что измерение над одной частицей может влиять на поведение другой. Но как быстро проявляется такое влияние ***)? Если оно возникает через время

*) Статья написана весной 1983 г.

**) Разумеется, можно предположить, что они просто ошибочны.

***) Если оно, разумеется, вообще имеет место.

меньшее, чем необходимо свету дойти от одного прибора к другому, за время между измерениями в A и B , то в этом случае измерения не только нелокальны, но и несепарабельны.

Формулируемый Аспеком «принцип сепарабельности» таков: характер измерения, производимого прибором A в определенный момент времени (событие A), не может влиять на результат, получаемый другим измерением, производимым прибором B (событие B), если событие B не лежит во времени подобной части светового конуса, имеющего вершину в A *). Проведенные до сих пор эксперименты не дают ответа на вопрос о сепарабельности. Для его решения необходимо было провести эксперимент, в процессе которого ориентация осей анализаторов будет меняться достаточно быстро, т. е. за промежутки времени заведомо меньшие, чем время прохождения светового луча от одной измерительной установки к другой.

Такой эксперимент провели А. Аспек, Ж. Далибар и Ж. Роже в 1982 г.⁷⁰ Ими показано, что неравенство Белла нарушается и в условиях опыта с быстро меняющимися осями анализаторов. Из эксперимента следует, таким образом, что если скрытые параметры и возможны, то они должны быть как нелокальными, так и несепарабельными.

а) Локальность или детерминизм?

К концу 70-х годов справедливость теоремы Белла и достоверность экспериментальных результатов стали почти общепризнанными. Центр дискуссии переместился в настоящее время на те выводы, которые следуют из теоремы Белла. Последняя, как мы видели, ставит перед необходимостью выбора между детерминизмом и локальностью. В зависимости от решения этого вопроса можно (хотя и с известной степенью условности) выделить две тенденции в подходе к проблеме локальности.

Первая (и количественно преобладающая) группа авторов считает, что наблюдаемое нарушение неравенства Белла не может служить однозначным доказательством нарушения локальности. При этом предполагается, что вероятностный характер квантовой механики является фундаментальным, т. е. не есть результат действия каких-то детерминистических скрытых параметров. С этой точки зрения **), находящейся в значительной степени в рамках копенгагенского подхода, все пары коррелированных частиц идентичны: не имеет особого смысла говорить, что результат взаимодействия чем-то детерминирован до того, как оно реально возникает в процессе проведения эксперимента. Поэтому и само понятие локальности имеет иной смысл, чем в том случае, когда признается справедливость детерминизма. Поскольку идентичные начальные условия не обязательно ведут к идентичным конечным состояниям, становится невозможным придать ясный смысл самому определению локальности: результат взаимодействия частицы a с прибором A не зависит от состояния прибора B . Единственное, на что может повлиять изменение состояния прибора B , это — вероятность различных результатов массового корреляционного эксперимента. Поэтому более точно выражает ситуацию термин «статистическая локальность», которому только и можно придать ясный экспериментальный смысл. С этой точки зрения, если и имеет место нарушение локальности, то оно не имеет статистического характера, а есть, в лучшем случае, свойство каждой пары частиц. Поэтому предположение о том, что существует некоторый «скрытый детерминизм», неизбежно приведет к проблеме: как объяснить, что локальность нарушается для индивидуальных явлений, но при этом «статистическая локальность» остается справедливой.

*) Из приводимого здесь определения сепарабельности ясно, что оно есть по сути дела утверждение о невозможности распространения физических процессов со скоростью больше скорости света, сформулированное в контексте корреляционного эксперимента.

**) Весьма ясно изложенной, например, в ³⁵.

Принципиально иной точки зрения придерживается другая группа авторов: природа фундаментально детерминистична и эксперименты по проверке неравенства Белла ясно указывают на нарушение локальности^{36-47, 64, 66}. Такая позиция сразу порождает по крайней мере два вопроса. Первый из них: каков тот реальный физический процесс, благодаря которому измерение, проводимое над частицей b прибором B , может влиять на взаимодействие частицы с прибором A ? В принципе можно предположить существование некоторого поля, исходящего из B и влияющего на работу прибора A или на поведение частицы a . Странно, тем не менее, что такое действие не должно зависеть от расстояния от A до B *). Второй вопрос: с какой скоростью может распространяться такое взаимодействие? Из эксперимента Аспека, Далибара и Роже следует, что она больше скорости света, тем не менее некоторые авторы отстаивают мнение о том, что за нарушение локальности ответствен некоторый физический процесс, переносящий информацию от одного прибора к другому.

Наиболее последовательно и конкретно эта точка зрения развивается в работах Н. Гуффаро Петрони и П. Вижье^{46, 47}. Они строят «причинную теорию микроявлений в рамках модели флюида с иррегулярными стохастическими флуктуациями», предложенной в 1958 г. Бомом и Вижье⁴⁹. Эта теория — один из вариантов теории скрытых параметров.

Ряд авторов³⁶⁻³⁸ развивают идею, что нарушение локальности следует истолковывать в рамках теории дальнего действия Уилера — Фейнмана, в которой на равных правах используются запаздывающие и опережающие физические воздействия. В этой схеме корреляция показания приборов объясняется тем, что с помощью опережающих волн («телеграф в будущее») информация от прибора B распространяется к источнику фотонов и каким-то образом влияет на их поляризацию. В таком подходе сохраняется релятивистская инвариантность, однако неизбежно воспроизводятся трудности, характерные для теории дальнего действия и, в частности, нарушение временного порядка между причиной и следствием²¹.

б) Возможен ли «сверхсветовой телеграф»?

Как мы видели, ситуация, описанная ЭПР, может рассматриваться как парадоксальная или нет, в зависимости от общих взглядов на природу и научное знание, которое разделяет тот или иной ученый. В соответствии с ними и интерпретация нарушения неравенства Белла в корреляционных экспериментах может быть различной. Существует, однако, вопрос, решение которого может вынести эти различия за чисто «методологические» рамки и тем самым сравнить эвристическую ценность различных интерпретаций. Этот вопрос о том, соответствует ли редукции волновой функции (которая происходит, например, в корреляционном эксперименте при измерении параметров одной из частиц) физический процесс, распространяющийся со скоростью, превышающей световую. С «ортодоксальной» точки зрения на этот вопрос следует отвечать отрицательно. Говорят, что при измерении, производимом на одной частице, меняется лишь наше знание о результатах будущего измерения параметров другой частицы, но не ее реальное состояние.

Многие авторы, интерпретирующие нарушение неравенства Белла как свидетельство в пользу нелокальности, считают также, что сверхсветовые процессы существуют. Их аргументы, однако, отличаются разной степенью конкретности.

В статье с характерным названием «Является ли сверхсветовая связь необходимой?» ее автор Генри Стапп пишет: «Центральная тайна квантовой

*) Уровень корреляции между отсчетами приборов A и B не зависит от расстояния между ними. Это следует из смысла закона сохранения и подтверждено недавно в эксперименте Вильсона, Лава и Батта, специально поставленном с целью проверить эту независимость⁵⁰.

теории заключена в вопросах: «Как может информация собираться столь быстро? Как может частица знать о том, что есть две цели? Как может информация о том, что происходит повсюду, собираться и влиять на то, что может произойти здесь?». Квантовые явления дают *prima facie* *) свидетельство того, что информация передается способом, который необъясним классически. Итак, идея, что информация распространяется со сверхсветовой скоростью, а *prigori* не кажется абсурдной» (⁵¹, с. 202). Это еще, однако, не значит, что такие процессы можно наблюдать непосредственно: «Все, что мы знаем о природе, находится в согласии с идеей, что *фундаментальные* (выделено нами. — Б. С., А. М.) процессы природы лежат за пределами пространства-времени..., но генерируют события, которые могут быть локализованы в пространстве-времени» (там же).

Из приведенной цитаты мы видим, что аргументация Стаппа в пользу существования сверхсветовых скоростей носит «интуитивный» характер и не может рассматриваться как прямое доказательство. Остается также неясным, какой смысл следует вкладывать в понятие скорости процессов, лежащих «за пределами пространства-времени».

Более конкретные аргументы приводят Н. Гуфари Петрони и П. Вижье в работе ⁴⁷. Они рассматривают корреляционный эксперимент, в процессе которого состояние одного из анализаторов (например, *B*) быстро меняется экспериментатором, находящимся в *B*. Первоначально оси приборов ориентированы так, что в их показаниях существует максимальная корреляция. Затем в некоторый момент времени положение прибора *B* резко меняется на такое, что корреляция полностью исчезает. Задача наблюдателя *A* состоит в том, чтобы указать этот момент. Разумеется, наблюдатель *A*, знающий лишь показания своего прибора, не может сделать этого, но, ознакомившись с протоколом наблюдателя *B* и сравнив его со своим, он укажет тот момент времени, когда прибор *B* был повернут. Конечно, получить такой протокол он должен с помощью «обычного» сигнала, посланного из *B*.

Итак, процесс получения информации из *B* в *A* состоит из двух этапов: получение «зашифрованного» сигнала в виде протокола наблюдений над прибором *A* и затем «расшифровка» его с помощью «ключа» в виде протокола наблюдателя *B*.

В этом не лишенном остроумия рассуждении отсутствует, тем не менее, последнее и принципиально важное звено — доказательство того, что объем информации, расшифровываемой наблюдателем *A*, превышает объем информации, получаемой им в виде протокола наблюдателя *B*. Нетрудно видеть, что это не так **), и, следовательно, аргументация Гуфари Петрони и Вижье не достигает цели.

Другой аргумент в пользу существования сверхсветовой связи приводит Н. Герберт в работах ^{45, 72}. Он считает, что предлагаемая им экспериментальная схема может служить физической основой для создания реального «сверхсветового телеграфа».

Общий для оптических установок *A* и *B* источник испускает коррелированные пары фотонов оптического диапазона; он расположен чуть ближе к *B*, так что интервал между событиями поглощения фотонов пространственноподобный. Аппарат *B*, являющийся источником передаваемой *A* информации, состоит из пары дополнительных анализаторов — прибора для измере-

*) *Prima facie* (лат.) — на первый взгляд.

**) Действительно, выясняя из сравнения протоколов, какое из двух возможных положение занимает ось *B*, наблюдатель *A* «расшифровывает» информацию в 1 бит. Но для того, чтобы сделать это заключение хотя бы с минимальной степенью достоверности, он должен иметь протоколы измерений для одной пары частиц, извлекая из протокола *B* информацию в 1 бит. Поскольку случайные совпадения отсчетов могут быть при любой взаимной ориентации осей, для повышения надежности своих заключений наблюдатель *A* должен использовать для анализов по возможности большее число парных отсчетов. Но тогда отношение количества «расшифровываемой» информации к используемой становится еще меньше; см. также ^{52, 63, 65}.

ния плоскости поляризации и установки, определяющей направление вращения плоскости поляризации. Аппарат *A* состоит лишь из полуволновой пластинки, соответствующим образом ориентированной. Такая пластинка меняет на обратное направление вращения циркулярно-поляризованного светового пучка и оставляет неизменным плоскополяризованный в том случае, когда плоскость его поляризации совпадает с одной из плоскостей пластинки. Проходящий через пластинку циркулярно-поляризованный фотон меняет ее момент импульса; реакция пластинки отсутствует в случае плоскополяризованного пучка. По Герберту, в зависимости от того, какой тип установки будет использован в *B* для регистрации проходящих фотонов, частицы, подлетающие к *A*, будут иметь различные сорта поляризации, и, измеряя «отдачу» пластинки в *A*, можно будет судить о типе установки, находящейся в *B*. Сверхсветовой телеграф готов!

Заметим сразу, что рассуждения Герберта основаны на двух существенно «неортодоксальных» с точки зрения квантовой механики предположениях: отдельные фотоны имеют определенный сорт поляризации до взаимодействия с анализатором *); то, как поляризован фотон *a*, зависит от взаимодействия фотона *b* со своим прибором.

Жиранди и Вебер указали на еще одну причину некорректности аргументов Герберта ⁵². Квантовомеханический расчет показывает, что идеальная полуволновая пластинка должна иметь бесконечно большую массу; но в таком случае, измерение ее реакции становится невозможным, пластинка конечной массы неоднозначно различает циркулярно- и линейно-поляризованные фотоны **).

Таким образом, ни один из рассмотренных нами аргументов в пользу существования сверхсветовых сигналов не является удовлетворительным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы видели, что проблема «нелокальность в квантовой физике» охватывает два круга вопросов. К первому могут быть отнесены явления, физическая интерпретация которых не вызывает дискуссий. Это эффекты Ааронова — Бомы, Брауна — Твисса и т. д., обсуждаемые нами в гл. 2 статьи. Они демонстрируют присущие квантовым объектам черты специфической целостности и, рассматриваемые классически, могут порождать иллюзию своеобразного «действия на расстоянии»: дифрагирующая на двух щелях частица как бы «знает» о состоянии сразу двух щелей, поле действует там, где его нет в эффекте Ааронова — Бомы, и т. д. Основой такой иллюзии служит классическое представление о мире как совокупности локализованных и потому относительно независимых друг от друга объектов. При этом всякая корреляция в их поведении объясняется в конечном счете взаимодействием, т. е. обменом энергией — импульсом. В таком контексте понятия близкодействие и дальнодействие имеют ясный смысл и служат двумя вариантами ответа на вопрос, являются ли причинные связи пространственно непрерывными.

Но квантовый объект не есть ни локализованная в пространстве частица, ни классически понимаемая волна, но есть нечто третье, проявляющее свойство этих классических моделей лишь в некоторых предельных экспериментальных ситуациях. Поэтому дилемма «близкодействие — дальнодействие» теряет в квантовой физике свой ясный смысл. Более соответствует сути дела термин «нелокальность», который можно рассматривать как «квантовый аналог» понятия дальнодействия.

*) Это утверждение аналогично тезису, что микрообъект обладает определенными координатой или импульсом безотносительно к реальной экспериментальной ситуации.

**) Обстоятельство, аналогичное тому, которое обнаружил Бор при анализе идеализированных экспериментов, предложенных Эйнштейном для опровержения принципа неопределенности; подробнее см. ¹⁵, с. 399.

В дорелятивистской физике конечность скорости света — один из выводов конкретно реализуемой электродинамикой Максвелла — Лоренца «научно-исследовательской программы» близкодействия. В релятивистской физике это положение приобретает характер постулата. Справедливый и в квантовой физике, для которой представление о пространственно-непрерывных причинных цепях теряет ясный смысл, принцип постоянства скорости света может рассматриваться в качестве «квантового аналога» понятия близкодействия. «Принцип сепарабельности», сформулированный Аспеком в контексте эйнштейновского корреляционного эксперимента, есть его простое следствие.

Другой круг вопросов, связанных с проблемой локальности, концентрируется вокруг теоремы Белла. Он является в последние годы наиболее дискуссионным и интересным с физической и методологической точек зрения. Одна из активно обсуждаемых здесь тем — следует ли признать квантовую корреляцию фундаментальным свойством природы, или же она должна быть объяснена в рамках иного подхода, чем существующая теория. Продолжают предприниматься попытки такого объяснения, но все они или недостаточно развиты, или содержат слишком экзотические предположения и выводы, а поэтому не нашли большого числа последователей. Наиболее влиятельной продолжает оставаться традиционная точка зрения: законы квантовой физики несводимы к какой-либо форме «скрытого детерминизма».

Такой подход содержит два парадокса *). Один из них хорошо известен и неоднократно обсуждался: поведение отдельных микрообъектов непредсказуемо, но квантовая механика с любой степенью точности может описать поведение ансамблей таких объектов. Другой парадокс стал явным в контексте теоремы Белла. В корреляционном эксперименте оказывается возможным предсказать (в идеале со стопроцентной вероятностью) исход индивидуального события. Но ведь это значит, что мы можем предсказать исход события, не имеющего причины!

Выражая свое отношение к квантовому индетерминизму, Эйнштейн однажды заметил, что по его убеждению, «бог не играет в кости». Воспользуемся этой метафорой Эйнштейна для обсуждения корреляционного эксперимента. Тогда, оставаясь на точке зрения локальности, мы должны будем сказать, что пока игральные кости находятся в воздухе, они не имеют меток на своих гранях (скрытые параметры отсутствуют). Метки — и причем одинаковые — возникают лишь в момент остановки. Когда же природа делает свой выбор? До того, как кости стали падать? Так естественно думать с классической точки зрения, но теорема Белла плюс требование локальности запрещают нам такой вывод. В момент остановки первой игровой кости? Но тогда не ясно, как это событие может повлиять на то, что происходит со второй костью. Нам, видимо, следует предположить, что для природы две игральные кости, выпавшие из одного стакана (или, говоря конкретнее, две частицы, возникшие в результате одного акта излучения, аннигиляции и т. п.), есть по сути дела один неделимый объект (коррелирующие частицы имеют общую волновую функцию), а падение их на стол (взаимодействие частиц с микроприбором) есть в известном смысле одно событие (или другими словами, одно «би-событие»), которое можно разделить на два лишь с известной степенью условности, аналогично тому, как весьма условно ядро атома можно представить себе состоящим из протонов и нейтронов.

Рассмотрение корреляционного эксперимента также дает возможность увидеть, как отличаются классическое и квантовомеханическое понимание законов сохранения. В классической физике сохраняться — значит непре-

*) Подчеркнем, что в слово «парадокс» мы не вкладываем никакого негативного смысла; парадокс (в отличие от паралогизма) не есть нечто подлежащее устранению, так как он указывает на некоторое неожиданное «странное» свойство природы (ее «тайну», — Р. Фейнман). «Гелиоцентризм Коперника был когда-то парадоксом. Истинный парадокс нуждается ... лишь в ясной его формулировке», — пишет О. К. де Борекар (48, с. 53).

рывно и в неизменном количестве существовать. Мы говорим, например, о сохранении импульса, подразумевая при этом какие-то порции материи, которые «имеют» импульс, обмениваются им, так что суммарное количество движения непрерывно остается определенным и неизменным. Описание микрообъектов невозможно без фиксации той экспериментальной ситуации, в которой они исследуются, и поэтому не всегда оказывается возможным говорить о характеристиках объекта, присущих ему непрерывно и вне всякого экспериментального контекста. Законы сохранения служат тогда наиболее концентрированным выражением закономерностей корреляции в поведении микрообъектов, находящихся в одинаковых условиях.

Закljučая нашу статью, отметим, что опыт Аспека, Далибара и Роже завершает определенный этап в дискуссии о локальности и скрытых параметрах. Сама же дискуссия, несомненно, будет продолжаться. В качестве объяснения этого приведем слова И. Пригожина ⁶⁷: «Вопросы, которые ставил Эйнштейн, всегда остаются с нами... Эйнштейну не удалось выявить противоречия в квантовой механике, и в этом смысле Бор оказался победителем, но не в меньшей степени правда и то, что все возрастающее число физиков не удовлетворено тем, что называют «копенгагенской интерпретацией». Бор хотел, некоторым образом, принять квантовую механику такой, какая она была, показать бесплодность поисков «более глубокой» интерпретации ее формализма. С этой точки зрения победителем оказался Эйнштейн. Сегодня, более чем 50 лет спустя, многочисленные научные журналы публикуют статьи, в которых обсуждаются скрытые переменные, проблемы измерения в квантовой механике, значение необратимости. Этот поток статей, уже кажущийся нескончаемым, стал бы, вероятно, еще интенсивнее, если бы журналы с серьезной репутацией не пытались ограничить свой тираж. Сомнения Эйнштейна, его вопросы о случайности и времени по-прежнему остаются главными темами нашей эпохи».

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лоренц Г. А.— Старые и новые проблемы физики.— М.: Наука, 1970.— С. 81.
2. Ehrenberg W. E., Siday R. E.— Proc. Phys. Soc. Ser. B, 1949, v. 62, p. 8.
3. Агапов Y., Bohm D.— Phys. Rev., 1959, v. 115, p. 485; 1961, v. 123, p. 1511; 1963, v. 130, p. 1625.
4. Chambers R. G.— Phys. Rev. Lett., 1960, v. 5, p. 5.
Fowler H. A., Marton L., Simpson J. A., Suddeth J. A.— J. Appl. Phys., 1961, v. 32, p. 1153.
Boerch H., Hammich H., Grohman K., Wohllenberg D.— Z. Phys. 1961, Bd. 165, S. 79.
Mällenstedt G., Bayh W.— Phys. Bl., 1962, Bd. 18, S. 299.
Более подробную библиографию можно найти в работах:
Woodliff J., Schwarz H.— Am. J. Phys., 1971, v. 39, p. 111.
Boyer T.— Phys. Rev. Ser. D, 1973, v. 8, p. 1679.
Файнберг Е. Л.— УФН, 1962, т. 78, с. 53.
5. Bochieri P., Longier A.— Nuov. Cimento, 1978, v. 47, p. 475.
Bochieri P., Longier A., Siragusa S.— Ibid., 1979, v. 51, p. 1; 1980, v. 56, p. 55; 1981, v. 66, p. 164.
См. также: Roy S. M.— Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, p. 11.
6. Furry W. H., Ramsey N. F.— Phys. Rev., 1960, v. 118, p. 623.
7. Bohm D., Hilley B. J.— Nuovo Cimento, 1979, v. 52, p. 295.
Lipkin H. J.— Phys. Rev. Ser. D, 1981, v. 23, p. 1466.
Argall E. C.— Lett. Nuovo Cimento, 1982, v. 33, p. 7.
Rothe A. J.— Nuovo Cimento, 1981, v. 62, p. 54.
Klein U.— Acta Phys. Austr., 1980, v. 52, p. 269.
Greenberg D. M.— Phys. Rev. D, 1981, v. 23, p. 1460.
Peshkin M.— Phys. Rep., 1981, v. 80, p. 376.
8. Спасский Б. И., Московский А. В.— Вестн. Моск. ун-та. Сер. «Физика, астрономия», 1977, т. 18, № 3, с. 91.
9. Pfleeger R. L., Mandel L.— J. Opt. Soc. Am., 1968, v. 58, p. 946.

10. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики.— М.: Физматгиз, 1960.
11. Sciama R. J.— Am. J. Phys., 1969, v. 37, p. 1128.
12. Brown R. H., Twiss R. Q.— Nature, 1956, v. 178, p. 1046; Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1957, v. 242, p. 1230; 1958, v. 248, p. 199.
13. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения.— М.: Мир, 1969.— С. 517.
14. Bell D. J.— Physics, 1965, v. 1, p. 195.
15. Бор Н. Избранные научные труды. Т. 2.— М.: Наука, 1971.
16. Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике.— М.: Наука, 1972.
17. Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики.— М.: Наука, 1966.
18. Лифшиц И. М., Пятагорский Л. М.— В кн. Философские вопросы современной физики.— Киев: Изд-во АН УССР, 1956.
19. Фок В. А.— В кн. Эйнштейн и современная физика.— М.: Гостехиздат, 1956.— С. 72.
20. Александров А. Д.— В кн. Современный детерминизм. Законы природы.— М.: Наука, 1973.— С. 339.
21. Московский А. В., Шелике И. И.— В кн. История и методология естественных наук. Вып. 26.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981.
22. Бом Д. Квантовая теория.— М.: Наука, 1965.
23. Bohm D., Aharonov Y.— Phys. Rev., 1957, v. 107, p. 1070.
24. Clauser I. F., Horne M. A., Shimony A., Holt R. A.— Phys. Rev. Lett., 1969, v. 23, p. 880.
25. Freedman S. I., Clauser I. F.— Ibid., 1972, v. 28, p. 938.
26. Fry E. S., Thompson R. S.— Ibid., 1976, v. 37, p. 465.
27. Clauser I. F.— Ibid., v. 36, p. 1223.
28. Holt R. A., Pipkin F. A.— Preprint Harvard University.— 1973.
29. Wu C. S., Shaknov I.— Phys. Rev., 1950, v. 77, p. 193.
30. Faraci G., Gutkowski S., Nottarigo S., Pennisi A. R.— Lett. Nuovo Cimento, 1974, v. 9, p. 607.
31. Kasday L. R., Ullman I. D., Wu C. S.— Nuovo Cimento Ser. B, 1975, v. 25, p. 633.
32. Bruno M., d'Agostino M., Maroni C.— Ibid., 1977, v. 40, p. 142.
33. Laméhi-Rachti M., Mittig W.— Phys. Rev. Ser. D, 1976, v. 14, p. 2543.
34. Aspect A.— Ibid., p. 1944.
35. Berthelot A.— Nuovo Cimento. Ser. B, 1980, v. 57, p. 193.
36. De Beauregard O. C.— Ibid., 1980, v. 42, p. 41.
37. Cramer J. C.— Phys. Rev. Ser. D, 1980, v. 22, p. 362.
38. Pegg D. T.— Ibid. Ser. D, 1980, v. 78, p. 233.
39. Seleri F.— Cours and Lect Cism., 1978, v. 261, p. 393.
40. Seleri F.— Found. Phys., 1978, v. 8, p. 103.
41. Bohm D.— Ibid., 1977, v. 39, p. 193.
42. Bohm D., Hiley B.— Found. Phys., 1975, v. 5, p. 93.
43. Baracca A., Bohm D., Hiley B.— Nuovo Cimento, 1975, v. B28, p. 463.
44. Falciglia F., Jaci G.— Lett. Nuovo Cimento, 1979, v. 26, p. 327.
45. Gerbert N.— Life Inst. Cal. Preprint.— 1978.
46. Gufaro Petroni N., Vigier J. P.— Lett. Nuovo Cimento, 1979, v. 26, p. 149.
47. Gufaro Petroni N., Vigier J. P.— Ibid., v. 25, p. 151.
48. The Study of Time. III/Ed. J. T. Fraser.— N.Y.a.o.: Springer-Verlag, 1976.— P. 53.
49. Bohm D., Vigier J. P.— Phys. Rev., 1958, v. 109, p. 882.
50. Wilson A. R., Lowe L., Butt D. K.— J. Phys. Ser. G, 1976, v. 2, p. 613.
51. Stapp H. P.— Nuovo Cimento. Ser. B, 1977, v. 40, p. 191.
52. Girardi G. S., Weber T.— Lett. Nuovo Cimento, 1979, v. 26, p. 599.
53. Марков М. А. О природе материи.— М.: Наука, 1976.— С. 43.
54. Вопросы причинности в квантовой механике.— М.: ИЛ, 1955.— С. 79.
55. Фон Нейман И. Математические основы квантовой механики.— М.: Наука, 1968.
56. Jauch J. M., Piron C.— Helv. Phys. Acta, 1963, v. 36, p. 827.
57. Kohen S., Specker E. P.— J. Math. Mech., 1967, v. 17, p. 59.
58. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3.— М.: Наука, 1966.
59. Bussey P. J.— Phys. Lett. Ser. A, 1982, v. 90, p. 9.
60. Imaeda K.— J. Phys. Ser. A, 1982, v. 15, p. 1243.
61. Ломсадзе Ю. М., Ломсадзе Ш. Ю.— Изв. вузов. Сер. «Физика», 1982, т. 25, вып. 2, с. 13.
62. Ефимов Г. В. Нелокальные взаимодействия квантованных полей.— М.: Наука, 1977.
63. Jordan T. F.— Phys. Lett. Ser. A, 1983, v. 95, p. 264.

64. Gufaro Petroni N., Vigier J. P.— Ibid., v. 93, p. 383.
65. Dieks D.— Ibid., 1982, v. 92, p. 271.
66. Stapp H. P.— Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, p. 1470.
67. Пригожин И.— В кн. Эйнштейновский сборник. 1978—1979.— М.: Наука, 1983.— С. 118.
68. Ширков Д. В.— В кн. Физика микромира.— М.: Сов. энциклопедия, 1980.— С. 241.
69. Aspect A., Grangier P., Roger G.— Phys. Rev. Lett., 1981, v. 47, p. 460; 1982, v. 49, p. 1804.
70. Aspect A., Dalibard J., Roger G.— Ibid., v. 49, p. 1804.
71. Tonomura A. et al.— Ibid., 1983, v. 48, p. 1443.
72. Herbert N.— Found. Phys., 1982, v. 12, p. 1171.

