

УДК 530.145

Б. И. Спасский
А. В. Московский

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И ДИЛЕММА БЛИЗКОДЕЙСТВИЕ — ДАЛЬНОДЕЙСТВИЕ

На примере эффекта Ааронова — Бом, парадокса Эйнштейна — Подольского — Розена обсуждается вопрос о применимости дилеммы близкоедействие — дальноедействие к поведению квантовых объектов. Рассмотрен вопрос о предпосылках постановки проблемы взаимодействия в классической физике.

В этой статье показано, во-первых, что понятие близкоедействие неприменимо к поведению квантовых объектов и, во-вторых, что причина этого в том, что понятия близкоедействие и дальноедействие являются классическими¹.

В основе понятия близкоедействие лежит представление о том, что взаимодействие физических объектов происходит благодаря участию пространственно-непрерывных посредников. В электродинамике Фарадея — Максвелла причинные связи осуществляются передачей энергии, которая локализована в непрерывном электромагнитном поле.

Применение концепции близкоедействие к области микропроцессов наталкивается на серьезные трудности. Простейшим примером этого служит дифракция света на двух щелях. Вид дифракционной картины определяется величиной и взаимным расположением щелей. Если рассматривать свет как поток корпускул, невозможно с точки зрения близкоедействия объяснить одновременное воздействие обеих щелей на поведение фотона. (Пространственно-локализованная частица может пролететь только через одну щель.) Трудность исчезает, если предположить, что свет — волновой процесс. При этом, однако, возникает другая трудность, связанная с тем, что свет может поглощаться только дискретными порциями. Но если произошло поглощение фотона в одной точке пространства, вероятность его обнаружения в любой другой точке становится равной нулю (так называемая редукция волнового пакета). С точки зрения близкоедействия непонятно, каким образом волна «узнает» одновременно и во всем пространстве о происшедшем акте поглощения.

Из классического принципа близкоедействия следует, что поведение заряженной частицы зависит от напряженности электромагнитного поля только в той точке пространства, где она находится (принцип локальности). Если во всех областях возможного движения частицы поле отсутствует, ее движение остается невозмущенным. Между тем Ааронов и Бом показали, что на поведение микрочастицы может влиять существование поля и в тех точках пространства, где вероятность обнаружения частицы стремится к нулю [1].

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

¹ Точный смысл этого термина разъясняется в статье.

та проходит через свою цилиндрическую трубку 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 простой расчет, вид дифракционной картины зависит от разности потенциалов, приложенных к цилиндрам, так как пакеты, подвергшиеся действию потенциалов φ_1 и φ_2 , набирают разность фаз пропорциональную $\varphi_1 - \varphi_2$. Между тем внутри цилиндров поле можно считать равным нулю, так как потенциал постоянен вдоль его длины.

Поле существует только в пространстве вне цилиндров, где вероятность обнаружения электрона исчезающе мала. С классической точки зрения эффект Ааронова — Бома означает, что электрическое поле «действует» там, где его нет», что противоречит представлению о близкодействии. (Аналогичный эксперимент был предложен и для случая движения электрона в пространстве около бесконечнодлинного соленоида.)

Существует специфически квантовая особенность поведения микрообъектов, получившая название «несилового взаимодействия». Это понятие было введено В. А. Фоком и А. Д. Александровым при обсуждении известного парадокса Эйнштейна, Подольского и Розена [2]. «Несиловая связь» проявляется в том, что различные части квантового объекта остаются связанными между собою и в тех случаях, когда их энергетическое взаимодействие пренебрежимо мало. На языке квантового формализма это выражается в наличии у них общей волновой функции вплоть до того момента, пока одна из частей не вступит во взаимодействие с каким-либо прибором. Иллюстрацией этого может быть поведение двух частиц, которые некоторое время взаимодействовали между собою, а затем разошлись на большое расстояние, так что «обычным» взаимодействием можно пренебречь. При этом их суммарный импульс остается постоянным и определенным, хотя до взаимодействия частиц с прибором парциальные импульсы неопределенны.

Регистрация прибором одной из частиц фиксирует ее импульс, а тем самым делает известным и импульс второй частицы. Другими словами, воздействие прибора на одну из частиц фиксирует импульс второй, что трудно объяснить с точки зрения классического близкодействия. На это обстоятельство указал Эйнштейн, считавший, что физическая интерпретация квантового формализма оказывается перед дилеммой: или признать фундаментальную неполноту квантовой теории, или принять несовместимость классического понятия близкодействия с аксиомами адекватной теории микромира [3].

Итак, свойства микрообъектов не позволяют объяснить их поведение с точки зрения концепции близкодействия. Означает ли это необходимость возврата к представлению о дальнодействии?¹

По нашему мнению, основные представления квантовой физики требуют не только отказа от классического близкодействия, но и пересмотра той формулировки дилеммы близкодействие — дальнодействие, которая была сформулирована на языке классической физики и в рамках ее основных представлений.

Классическая постановка дилеммы близкодействие — дальнодействие исходит из следующих предположений. Физические объекты обладают относительно независимым существованием, в частности их можно считать пространственно разделенными (локализованными) сущностями. Всякая сложная система разложима на сумму частей,

¹ Этот вопрос тем более актуален, что начиная с известной работы Уиллера и Фейнмана [4] непрерывно продолжаются попытки построить теорию, основанную на дальнодействии.

свойства которых инварианты по отношению к свойствам целого. Эйнштейн так сформулировал это представление: «Характерным для ... физических объектов является ..., что они мыслятся распределенными некоторым образом в пространственно-временном континууме. Существенным для этого распределения, вводимых в физику объектов, является требование существование вещей в некоторый определенный момент времени независимо друг от друга, поскольку они находятся в разных частях пространства. Без признания такой независимости («бытия как такового») пространственно отделенных друг от друга объектов... было бы невозможно физическое мышление в привычном для нас смысле» [3].

Взаимодействие классических объектов возникает только благодаря обмену энергией и импульсом, и никакой другой причины корреляции в их поведении быть не может. В этом контексте возможно четкое различие концепций близкодействия и дальнодействия, т. е. может быть поставлен вопрос; передаются ли энергия и импульсы пространственно-непрерывным образом или скачком. (Окончательное его решение в пользу близкодействия было получено только после открытия законов сохранения энергии и конечности скорости распространения взаимодействия.)

С квантовой точки зрения представления о физическом объекте как состоящем из относительно независимых частей является слишком грубой моделью. Квантовые объекты и явления следует рассматривать как «неделимые целые, которые было бы неправильно анализировать, даже абстрактно и мысленно, как если бы они состояли из различных частей, составленных из различного рода микрообъектов». Это единство квантовых объектов проявляется в наличии корреляции в поведении их «частей», которое не сводится к обмену энергией и импульсом. Примерами такой корреляции служат парадокс Эйнштейна, Подольского и Розена, эффект Ааронова—Бома и т. д.

С классических позиций возможно достичь все более точного наблюдения объекта без искажения наблюдаемого явления. Квантовое единство проявляется, в частности, и в том, что всякая попытка «заглянуть внутрь» объекта разрушает его цельность и приводит к неустранимому изменению первоначальной картины. Так, в опыте с дифракцией света мы можем поставить счетчики фотонов непосредственно за щелями. При этом интерференционная картина искажается, поскольку кванты, зарегистрированные счетчиками, не участвуют в ее образовании¹.

По этой причине невозможно сохранить представление о непрерывности причинно-следственных цепей. Между тем понятие близкодействие и есть представление о такой непрерывности.

Итак, классическое представление о том, что физические объекты относительно независимы (всякая корреляция в их поведении осуществляется обменом импульсом — энергией), с точки зрения квантовой физики является лишь грубым приближением.

Именно поэтому классическая постановка дилеммы близкодействие — дальнодействие и сами эти понятия теряют первоначальный смысл в применении к квантовым объектам.

Их можно сохранить лишь с теми же серьезными ограничениями, с какими, в соответствии с идеей дополтельности, например, классические понятия частицы и волны применимы к описанию квантового объекта. При этом возможно возникновение парадоксов, аналогичных

¹ Аналогичный этому мысленный опыт Ааронова и Бома возможно изменить таким образом, что, учитывая обратное действие заряда электрона на трубку, можно определить, через какую из них пролетел электрон. Однако, как показали Фарри и Рамсэй, если такое определение реально осуществить, интерференционная картина исчезнет.

тем, которые появляются при распространении классических моделей на неклассические области¹.

Развитие современной физики вновь поставило вопрос, который в разных натурфилософских и физических концепциях стоял на заре физики. Его можно сформулировать так: какова природа взаимозависимости в поведении различных частей Вселенной, почему различные части Вселенной ведут себя так, что вся Вселенная выглядит как некоторое закономерное целое? При всем различии картезианской и ньютоновской научно-исследовательских программ общая для них схема ответа на этот вопрос такова. Причина единства Вселенной состоит в том, что различные ее части непрерывно (во времени) действуют друг на друга, т. е. взаимодействуют. В рамках ньютоновской концепции мера этого действия — сила картезианской — происходящий в результате взаимодействия, обмен количеством движения. Лишь когда встает вопрос о «тонкой структуре» взаимодействия, появляется различие картезианского и ньютоновского подходов. С точки зрения Декарта, любые причинные цепи пространственно непрерывны (идея близкодействия).

Ньютон также считал, что тяготение осуществляется некоторым элементом, но склонялся к мысли, что им является нематериальный агент. В дальнейшем ньютоновская идея дальнего действия освободилась от теологических добавлений и стала рассматриваться лишь как представление о том, что причинные цепи могут быть и пространственно-прерывными. Но при всем различии концепций дальнего действия и близкодействия им присуща общая идея: саморегуляция природы возникает благодаря непрерывному (во времени) взаимодействию ее частей.

В рамках своей натурфилософии Лейбниц предложил принципиально иное решение проблемы. Взаимная корреляция поведения частей мира происходит потому, что все элементы природы (монады) изначально синхронизованы (идея предустановленной гармонии). Законы физики — это только удобный способ описания такого синхронного поведения, а то, что «макроскопически» воспринимается как взаимодействие тел, есть лишь иллюзия.

В качестве аналога своей модели мира Лейбниц приводит известный пример часовой мастерской, в которой находится множество идущих равномерно часов. Показания их стрелок различны, но по «состоянию» одного циферблата можно предсказать время, показываемое другим; можно далее установить законы такого соответствия, условно полагая, что одни часы «действуют» на другие и т. д.

Короче говоря, если, с точки зрения Декарта и Ньютона, взаимодействие первично, а корреляция является следствием его, то, по Лейбницу, корреляция первична и взаимодействия вообще нет.

Следует отметить, что взгляды Лейбница не получили широкой поддержки современников. Последующая эволюция физики доказала плодотворность пути, предложенного Ньютоном и Декартом. Всегда, когда в поведении физических тел обнаруживалась корреляция, физики стремились указать способ, которым эти тела действуют друг на друга, и, если известные виды сил не давали исчерпывающего объяснения, происходило открытие новых. Можно сказать, что история физики — это (в значительной части) история открытия разнообразных способов и вариантов взаимодействия.

Но не являются ли трудности современной теории поля указанием на ограниченность концепции взаимодействия и необходимость использования (может быть, в качестве дополнительного) подхода, основанного на развитии идей Лейбница?

Уже несколько десятилетий продолжают попытки разрешить две

¹ Простейшим примером такого парадокса и являются трудности объяснения дифракционной частицы на двух щелях, описанные на с. 309.

фундаментальные проблемы квантовой теории поля — бесконечной собственной энергии частиц и бесконечной энергии собственных колебаний. Были испробованы различные новые пути: нелокальное взаимодействие, нелинейные обобщения, дискретное пространство-время и т. д., но решающий успех так и не был достигнут.

В связи с этим можно думать, что для преодоления кардинальных трудностей теории поля необходим отход от понятия взаимодействия и переход к концепции гармонизированных квантовых состояний. Новая теория может отказаться от построения детальной картины взаимодействия микрообъектов и должна ставить своей задачей только связать их состояния, разделенные конечным пространственно-временным интервалом. Пробразом такой теории может служить теория S -матрицы Гейзенберга. В отличие от уравнения Шредингера, которое на языке ψ -функции описывает непрерывную эволюцию состояния системы, S -матричный подход связывает лишь ее начальное и конечное состояние, используя различного рода законы сохранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаонов У., Воhm D. «Phys. Rev.», 1959, 116, 485.
2. Александров А. Д. Связь и причинность в квантовой области. — В кн.: Современный детерминизм и законы природы. М., 1973, с. 335—364.
3. Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. 3. М., 1966, с. 613.
4. Wheeler J. A., Flymman R. P. «Rev. Mod. Phys.», 1949, 21, 425.

Поступила в редакцию
19.9 1976 г.

Кафедра
общей физики для физиков