

Член-корреспондент АН СССР А. Д. АЛЕКСАНДРОВ

## О ПАРАДОКСЕ ЭЙНШТЕЙНА В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

1. В 1935 г. Эйнштейн из рассмотрения одного конкретного примера пришел к выводу о неполноте квантовой механики<sup>(1)</sup>; это мы и называем парадоксом Эйнштейна. Тогда же Бор выступил с решением этого парадокса на основе своего «принципа дополнительности»<sup>(1)</sup>. Другое решение было дано Л. И. Мандельштамом на основе чисто статистического понимания квантовой механики<sup>(2)</sup>. Этот же взгляд развивает Д. И. Блохинцев в противовес выводам Эйнштейна и Бора<sup>(3)</sup>. В настоящей заметке мы имеем в виду дать иное решение парадокса, выяснить ошибки в рассуждениях указанных авторов и высказать в связи с этим два общих соображения по поводу квантовой механики.

2. В названном примере речь идет о системе из двух частиц  $A_1$ ,  $A_2$ , находящихся в таком состоянии, в котором имеют определенные значения сумма их импульсов  $p$  и разность координат  $x$  (ради краткости мы опускаем указание на то, что речь идет о координатах и составляющих импульса вдоль данной оси). Производя измерение импульса частицы  $A_1$  и обнаруживая его значение  $p_1$ , получим, что частица  $A_2$  будет находиться в состоянии с определенным импульсом  $p_2 = p - p_1$ . Производя же измерение координаты частицы  $A_1$  и обнаруживая ее значение  $x_1$ , получим, что частица  $A_2$  имеет координату  $x_2 = x_1 - x$ . Парадокс по Эйнштейну состоит здесь в том, что, не действуя на частицу  $A_2$ , мы можем один раз определить ее импульс, а другой раз координату, так что обе величины должны иметь смысл для этой частицы одновременно вопреки соотношению неопределенностей.

Однако никакого парадокса в действительности нет. Для того чтобы в этом убедиться, достаточно посмотреть на дело с точки зрения квантовой механики, как она есть, без всяких дополнений в духе «дополнительности» или «ансамблей». По квантовой механике к системе из двух частиц в указанном состоянии относится общая  $\psi$ -функция, не распадающаяся в произведение  $\psi$ -функций для каждой частицы в отдельности. Стало быть, согласно квантовой механике частицы образуют одну систему, между ними есть некоторая связь. «Измерение» объективно есть воздействие на систему, и нет ничего удивительного в том, что при одном воздействии получается один результат, при другом — другой. Разные воздействия по-разному нарушают связь частиц и потому приводят к разным результатам для второй частицы.

Таково решение парадокса. Отложив обсуждение вопроса о связи частиц в системе, имеющей общую  $\psi$ -функцию, обратимся к рассмотрению выводов Эйнштейна и других.

3. Эйнштейн, как показывает самое название его статьи, имел в виду доказать неполноту квантовой механики. Его вывод содержит,

однако, чисто логическую ошибку. Рассуждение его основано на следующем соображении: «Так как во время измерения частицы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой частицей со второй частицей не может произойти никаких реальных изменений» (1). (Мы ввели лишь термин «частица» вместо «система»). Стало быть, здесь уже предположено, что между частицами нет связи и потому они должны иметь свои отдельные, какие-то неизвестные состояния. Однако квантовая механика приписывает частицам только общую  $\psi$ -функцию. Значит, она уже тем самым не полна: она в этой общей  $\psi$ -функции не учитывает имеющейся якобы разделенности частиц. Таким образом, посылка Эйнштейна уже содержит то, что он хочет доказать: утверждение о неполноте квантовомеханического описания. Весь вывод его оказывается лишним, раз результат уже дан в качестве посылки.

Следовательно, либо мы предполагаем частицы разделенными и тем самым заранее считаем квантовую механику неполной, либо должны принять, что наличие общей  $\psi$ -функции системы означает некоторую связь ее частей. Всякая теория заведомо неполна в том смысле, что не исчерпывает свойства объекта полностью. Но априорное предположение о разделенности частиц, которую теория не описывает, принципиально не отличается от априорного предположения о том, что частица может иметь одновременно определенные координату и импульс. Поэтому аргументация Эйнштейна не имеет никакого значения.

4. В своем решении парадокса Эйнштейна Бор, следуя позитивизму, больше обсуждает возможности нашего знания, чем объективные явления. По Бору, при измерении над частицей «речь идет по существу о возмущении в смысле влияния на самые условия, определяющие возможные типы предсказаний будущего поведения системы» (4). Соответственно, состояние частицы понимается скорее как «сведения о состоянии». Вместе с тем, Бор рассуждает как бы о классических частицах и только корректирует возможные сведения о них посредством «принципа дополненности» (5). Поэтому коротко его рассуждения сводятся к следующему. Частицы  $A_1$ ,  $A_2$  перестали взаимодействовать, и измерение над частицей  $A_1$  изменяет только наши сведения или «возможные типы предсказаний» для частицы  $A_2$ . В одном случае сведения относятся к импульсу, в другом — к координате, и парадокс исчезает, так как состояние частицы  $A_2$  по существу отождествляется с этими сведениями.

Это рассуждение, во-первых, исходит из того же априорного предположения, что частицы в действительности не связаны. Стало быть, оно не признает того, что общая  $\psi$  (а следовательно, квантовая механика вообще) удовлетворительно отражает действительность. Поэтому и привлекаются по существу посторонние для квантовой механики соображения «дополненности». Во-вторых, это рассуждение, очевидно, идеалистично, так как смешивает объективное состояние со сведениями или типами предсказаний. Наконец, это рассуждение содержит чисто логическую ошибку. Для того чтобы ее обнаружить, встанем на точку зрения позитивизма и примем, что «состояние есть сведения о состоянии». Однако в изложенном рассуждении явно сформулировано предположение, что «частицы перестали взаимодействовать». А как раз об этом до измерения у нас нет и не может быть никаких сведений. Следовательно, это допущение с позитивистской же точки зрения является совершенно бессмысленным, а вместе с ним бессмысленно и все рассуждение. Эта ошибка не случайна, так как, очевидно, смещение предположений об объективных фактах («частицы на самом деле разделены») с субъективными знаниями («сведения о состоянии») ничего не может дать, кроме логических ошибок и из-

вращения науки. Если же мы отбросим допущение о разделенности частиц, то остается допущение, что частицы связаны, а тогда вступает в силу наше рассуждение, проведенное в п. 2, и парадокс разрешается без всякого позитивизма простой ссылкой на связь частиц.

Таким образом, решение Бора является мнимым: оно исходит из того же предвзятого предположения о разделенности частиц, не имеющего основания в самой квантовой механике.

5. Исходя из статистической точки зрения, волновая функция  $\psi(x_1, x_2)$  для системы из двух частиц относится не к индивидуальной системе, а к ансамблю (т. е. к набору) большого числа этих систем ((<sup>3</sup>), стр. 54). Из этого толкования, пишет Д. И. Блохинцев, «следует, что в приведенном А. Эйнштейном примере речь идет о разложении исходного ансамбля  $\psi(x_1, x_2)$  на различные, исключаяющие друг друга подансамбли (один раз по признаку  $p_1$ , другой раз по признаку  $x_1$ ). Изменение же «состояния» второй частицы связано не с воздействием прибора, а с корреляцией состояний первой и второй частицы, обусловленной взаимодействием этих частиц, имевшим место до измерения» (<sup>3</sup>). Иными словами, частицы уже разошлись и с ними ничего не происходит, мы только разными способами сортируем их по подансамблям. В одном имеет определенное значение импульс, в другом — координата, но вследствие «неустранимого квантового рассеяния» в одном подансамбле координаты и импульс не могут быть определенными. Парадокс Эйнштейна устранен простым отказом говорить об одной частице: случаи определенных  $p_2$  или  $x_2$  относятся к разным подансамблям.

Однако это рассуждение опять содержит логические ошибки. Если  $\psi(x_1, x_2)$  относится к ансамблю (набору) пар частиц  $A_1, A_2$  и мы разлагаем этот ансамбль (набор), то тем самым подразумевается, что в нем есть частицы с определенными импульсами и координатами, хотя бы и в разных экземплярах пар  $A_1, A_2$ . Это есть предположение о «скрытых параметрах», противоречащее квантовой механике (и опровергаемое самим Д. И. Блохинцевым (<sup>3</sup>), стр. 64). Это возражение можно устранить только указанием на то, что «разложение ансамбля» связано с физическим воздействием, но тогда нельзя говорить, что «изменение состояния второй частицы связано не с воздействием прибора». Речь могла бы идти об ансамбле пар частиц  $A_1, A_2$  после измерения, но так как воздействие измерения отрицается, то это сводится к тому же ансамблю. А кроме того, ансамбль после измерения по квантовой механике не описывается уже функцией  $\psi(x_1, x_2)$ . Можно было бы, наконец, подразумевать ансамбль измерений, но тут вообще нет одного ансамбля, а есть два разных ансамбля: один ансамбль измерений координаты, другой ансамбль измерений импульса (как это уже отметил В. А. Фок (<sup>4</sup>)). Таким образом, вообще остается совершенно непонятным и неизвестным, что же такое этот «исходный ансамбль  $\psi(x_1, x_2)$ », который «разлагается на подансамбли».

Сведение вопроса к простой сортировке совокупности измерений не только содержит указанную ошибку (смешение двух разных ансамблей измерений), но вообще приводит к тому, чтобы считать квантовую механику статистикой опытов. Л. И. Мандельштам так вопрос и ставит ((<sup>2</sup>), стр. 355). Но это отличается от точки зрения Бора лишь тем, что считаются предметом теории не единичные опыты, а «коллективы» опытов.

В действительности, между частицами до измерения есть связь, что отражает их общая  $\psi$ ; измерение состояния (точнее, даже появление отдельной  $\psi$ ) второй частицы вызвано «воздействием измерения», т. е. изменением макро-условий (а не наблюдением, конечно). Это и дает объяснение парадокса, изложенное в п. 2, причем здесь всякое упоминание ансамблей оказывается просто лишним. Ансамбли при-

влекаются потому, что связь частиц отрицается, а предполагается лишь корреляция их состояний, аналогичная корреляции состояний классических частиц после соударения. Итак, либо мы признаем связь частиц и тогда ансамбль просто не нужен, либо мы считаем частицы в действительности не связанными и тем самым делаем априорное предположение о наличии скрытых параметров, т. е. противоречим квантовой механике и неизбежно приходим к ошибкам.

Таким образом, «статистическое объяснение» парадокса Эйнштейна содержит ошибки и ничего не объясняет; сводя же вопрос к сортировке опытов, оно приводит к идеалистической замене квантовой механики как теории атомных процессов статистикой опытов.

6. Во всех трех выводах: Эйнштейна, Бора и Мандельштама — Блохинцева принимается, что «частицы разошлись», и тем самым отрицается, что наличие общей  $\psi$ -функции, не разложимой на отдельные  $\psi$ , отражает связь частиц. Т. е. во всех выводах считается, что  $\psi$ -функция не отражает в достаточной мере свойств объекта, к которому она относится. Квантовую механику не хотят понять как она есть, не хотят считать ее сколько-нибудь удовлетворительным отражением объективных свойств атомных частиц. Отсюда неизбежно возникает потребность чем-то ее дополнять: «скрытыми параметрами», «соображениями дополнительности», «ансамблями»... Эта установка ошибочна и основана, в частности, на непонимании роли абстракций в познании; поэтому и отрицается значение  $\psi$  как характеристики объективного состояния частицы. Но квантовую механику нужно понимать как теорию объективных процессов и не истолковывать посредством чуждых ей соображений.

Связь частиц, отражаемая в наличии у них общей функции, не есть, конечно, механическая связь посредством веревок или сил; это есть особая форма связи в зависимости от условий. Но именно взаимная связь, выражаемая наличием общей  $\psi$ , есть главная основа всех успехов квантовой теории систем из многих частиц. Одна из важнейших особенностей квантовой механики состоит именно в том, что она открыла новую форму взаимной связи явлений в атомной области. Понимание этой особенности в свете учения диалектического материализма о всеобщей связи явлений имеет решающее значение для понимания квантовой механики.

Ленинградский государственный университет  
им. А. А. Жданова

Поступило  
14 III 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. А. Фок, А. Эйнштейн, Б. Подольский, Н. Розен и Н. Бор, УФН, 16, в. 4, 436 (1936). <sup>2</sup> Л. И. Мандельштам, Соч., 5, 1950. <sup>3</sup> Д. И. Блохинцев, Основы квантовой механики, 1949. <sup>4</sup> В. А. Фок, УФН, 45, в. 1, 162 (1951). <sup>5</sup> В. А. Фок, там же, 45, в. 1, 3 (1951).