

В.Д.Эрекаев

## **Некоторые следствия ЭПР-парадокса: Неопределенность одновременных квантовых измерений**

Физическое истолкование процесса измерения в квантовой механике сопряжено с рядом существенных трудностей. Большинство из них связано с проблемой интерпретации коллапса волновой функции. Здесь мы рассмотрим некоторые особенности процедуры одновременных измерений в квантовой механике. Согласно квантовой механике, если операторы не коммутируют, то невозможно точно измерить значения соответствующих физических величин одной и той же частицы. Например, измеряя координату частицы и получая ее точное значение, мы не можем *одновременно* измерить *точное* значение импульса этой частицы. В рамках ЭПР парадокса [1, с. 604-611] мы приходим к выводу, что невозможно одновременно точно измерить эти же характеристики уже для двух частиц, удаленных после взаимодействия друг от друга на пространственно подобный интервал. Но так как частицы по условию мысленного ЭПР эксперимента движутся с одинаковыми скоростями и, следовательно, должны разойтись от места взаимодействия на одинаковое расстояние, то получается, что мы точно можем знать их местоположение и импульсы, которые по первоначальному предположению направлены в противоположные стороны. В этом противоречии и состоит суть ЭПР парадокса в одной из его интерпретаций.

Представим себе ситуацию, что необходимо измерить одновременно две какие-нибудь сопряженные величины, например, импульс и координату частицы. Как уже отмечалось выше, согласно квантовой механике их одновременное точное измерение невозможно. Однако попробуем ответить на следующий вопрос:

если у нас имеются приборы для измерения импульса и координаты и мы попытаемся провести одновременное измерение положения и импульса, то при таком одновременном измерении какая физическая величина будет иметь точное значение, а какая неопределенное?

Так как для одной и той же частицы проведение такого одновременного измерения затруднительно, то используем для этой цели ситуацию ЭПР эксперимента. А именно, мы можем измерять положение у одной из разлетевшихся частиц, а импульс — у другой. При этом, согласно квантовой механике, эти частицы представляют собой взаимосвязанную квантово-механическую систему, для которой должно выполняться соотношение неопределенностей и принцип дополненности. В частности, если мы измерили положение одной частицы, то ее импульс должен быть неопределенным, а существующая между двумя частицами взаимосвязь или корреляция должны привести к тому, что положение второй частицы должно быть определено, а импульс должен иметь неопределенное значение.

Учитывая это, будем *одновременно* измерять положение у одной частицы, а импульс — у другой. Повторим, что, согласно принципу неопределенности, одна из величин должна иметь точное значение, а другая — неопределенное. Но так как измерение проводится *одновременно*, то совершенно неясно, *какая именно* величина будет иметь точное значение, ведь ситуация абсолютно «зеркальная», полностью симметричная и нельзя отдать предпочтение чему-то одному. В этой ситуации можно говорить либо об усилении принципа неопределенности в отношении к процессу одновременных измерений, либо о новом противоречии в основаниях квантовой механики и, соответственно, об усилении тезиса о ее неполноте.

Поскольку у нас нет критериев для ответа на вопрос о том, какая из величин при одновременном измерении будет измерена первой, чтобы стать точно определенной, то рассмотрим более тщательно сам момент одновременного измерения. Логично предположить, что ответ на вопрос о том, какая физическая величина окажется измеренной точно, состоит в выяснении того, какая из величин окажется измеренной первой. Это действительно было бы логично, поскольку согласно принципу неопределенности мы не можем измерить одновременно точно значения двух некоммутирующих операторов, а измерив *точно* сначала одну из этих величин, мы автоматически получим неопределенное значение другой величины. Конечно, можно было бы попытаться сначала измерить неопределенную величину, а потом утверждать, что вторая

величина — точная. Но это невозможно, ибо «при измерении мы всегда получаем определенный результат». [2, с. 11-2 2]. Кроме того, для макронаблюдателя и современного способа познания, по-видимому, более понятен и все еще более естественен первый путь: определить по возможности точные значения, а потом делать вывод о неопределенности второй величины. Хотя мы должны допускать, что, по-видимому, в рамках квантовой механики и гейзенберговского принципа неопределенности *разделение* на точную и неопределенную величины при измерении происходит мгновенно и одновременно.

Здесь также следует учесть и тот факт, что физика — наука приближений, а в реальных физических процессах не существует абсолютно точных, абсолютно мгновенных и абсолютно одновременных событий. Все значения физических величин определяются с некоторой точностью в рамках той или иной концептуальной и теоретико-формальной схемы. Например, согласно специальной теории относительности, одновременность может быть установлена с помощью часов, линеек и светового луча. Но понятно, что эта процедура и эта одновременность не являются чем-то абсолютно точным. С физической точки зрения, с точки зрения рассмотрения этого события *как процесса*, мгновенное появление двух взаимосвязанных значений физических величин остается совершенно неясным и физически необъяснимым. Принятие положения об абсолютной одновременности событий приведет к мгновенному действию на расстоянии. Последнее противоречит специальной теории относительности, но если все же вдруг и окажется истинным, то потребует капитальной перестройки представлений современной физики.

Поэтому, оставаясь в рамках разумных в настоящее время физических приближений и ограничений, предположим, что как только мы осуществим точное измерение одной из величин, то вслед за этим, пусть даже *почти мгновенно*, вторая величина принимает неопределенное значение. Физический смысл последнего, на наш взгляд, требует уточнения. Например, это может означать, что некоторая физическая величина никогда не имеет какого-то численного значения *в принципе* и этому должна соответствовать определенная глубокая онтология. Другая возможная трактовка состоит в том, что неопределенность может трактоваться *вероятностно*. Не вдаваясь в подробности этого вопроса, рассмотрим далее сам процесс измерения двух характеристик микрочастиц. Уменьшая интервал времени между появлением точного значения одной из

физических величин и неопределенного значения квантово-механически сопряженной ей физической величины, мы переходим к рассмотрению бесконечно малых временных интервалов. Формально математически момент появления точного и неопределенного значений величин можно рассматривать как *предел* процесса при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

В то же время квантовая механика дает возможность получить некоторые физически разумные результаты, не доходя до предела  $t=0$ . Дело в том, что уже для интервалов времени  $\Delta t \leq 10^{-23}$  с начинает явно и эффективно проявляться виртуальная природа микропроцессов. Вообще говоря,  $\Delta t \leq 10^{-23}$  с — это время жизни виртуальных частиц, поэтому *в пределах* этого интервала времени, т.е. от 0 с до  $10^{-23}$  с, или, по крайней мере, с планковского момента времени  $10^{-43}$  с до  $10^{-23}$  с, по-видимому, можно ожидать доминирования виртуальных процессов. Возможно даже, что на этом отрезке времени *все* физические процессы принимают виртуальную форму существования со всеми вытекающими отсюда свойствами.

Среди разнообразных свойств виртуальной формы существования процессов микромира отметим только следующее: на интервале «виртуального времени», т.е. в пределах  $10^{-23}$  с существенно возрастает роль флуктуаций и стохастичности процессов. Что это означает для рассматриваемой нами проблемы? В частности, то, что если мы для одновременного измерения точных значений и координаты и импульса выбираем приборы, которые могут измерить эти значения *точно*, то ответ на вопрос, какая характеристика будет измерена точно, а какая останется неопределенной, будет определяться виртуальными процессами, протекающими в пределах  $10^{-23}$  с процесса измерения. Стохастичность флуктуаций, сугубо вероятностный характер процессов этого уровня реальности, по-видимому, должны привести к тому, что результат данного одновременного измерения будет случайным. Это означает, что *нельзя даже в принципе* сказать, оставаясь в рамках стандартной интерпретации квантовой механики, какая величина будет точно измерена. Но это, в свою очередь, означает, что сам процесс одновременного измерения в квантовой механике становится вероятностным и в этом смысле неопределенным. Мы не можем гарантированно утверждать, что мы получим в результате такого измерения.

Возможно, что и в квантовой механике наши представления об одновременности должны измениться и принять некую неклассическую форму. Такие свойства одновременности не могут быть эквивалентны свойствам одновременности в специальной теории относительности, поскольку применение принципов СТО к квантовой механике ведет к квантовой теории поля, а мы в рассматриваемом случае, по-видимому, все же должны оставаться в рамках стандартной квантовой механики.

**Литература**

1. *Эйнштейн А.* Полн. Собр. соч. Т. 3.
2. *Гриб А.А.* Нарушение неравенств Белла и проблема интерпретации квантовой теории // *Философские исследования оснований квантовой механики. К 25-летию неравенств Белла.* М., 1990.