

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

530.145

**ЕЩЕ РАЗ О СООТНОШЕНИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ДЛЯ ЭНЕРГИИ И ВРЕМЕНИ**

(Ответ Ааронову и Бому)

**1. ГНОСЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
ОБ ИЗМЕРЕНИИ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**

Для правильного суждения о квантовомеханических соотношениях неопределенности совершенно необходимо иметь ясное представление о гносеологической постановке задачи об измерении. Этот вопрос неоднократно разъяснялся Бором, который указывал, что все, в том числе и чисто квантовые, свойства объекта познаются через посредство прибора, описываемого классически. Таким образом, в акте измерения мы имеем дело со взаимодействием двух систем: микрообъекта, описываемого квантовомеханически, и прибора, описываемого классически. В этом — особенность акта измерения. Объект в процессе измерения нельзя отделить от прибора: между ними существует и физическая и логическая связь¹.

Выражаемые через волновую функцию вероятности суть вероятности того или иного результата взаимодействия микрообъекта с прибором (того или иного отсчета на приборе). Сама волновая функция может быть истолкована как отображение потенциальных возможностей такого взаимодействия микрообъекта (определенным образом приготовленного) с приборами различного типа.

Квантовомеханическое описание объекта посредством волновой функции отвечает требованию относительности к средствам наблюдения. Эта относительность расширяет понятие относительности к системе отсчета, известное и в классической физике.

Зависимость волновой функции от времени (по уравнению Шрёдингера) описывает изменение во времени прогнозов, относящихся к измерениям. Именно это понимается в квантовой механике под изменением состояния системы во времени. Само же акт измерения волновая функция описывать не может*). В результате акта измерения волновая функция, служившая для прогнозов, становится недействительной (вычеркивается). Измерение не обязательно может служить основанием для новых прогнозов; более того, в результате измерения объект измерения (например, фотон) может даже прекратить свое существование (поглотиться). Но не исключается и тот случай, когда измерение может быть поставлено так, что оно является вместе с тем и «приготовлением» объекта, т. е. что оно приводит к новым прогнозам. Тогда оно может дать новую волновую функцию, но только эта волновая функция пишется заново, а не получается из старой по уравнению Шрёдингера. Это явствует уже из того, что новые прогнозы не являются простым развитием старых, а составляются заново на основе данных, характеризующих новое приготовление объекта.

*) Это не значит, что взаимодействие между объектом и телом, служившим как прибор, не может описываться квантовомеханически; но такое описание подразумевает, что это тело включено в квантовомеханическую систему. А в таком случае взаимодействие между телом и первоначальным объектом уже не может рассматриваться как измерение: для измерений над усложненной системой, включающей и тело и объект, требуется новый прибор, действие которого опять-таки должно описываться классически.

С этими особенностями акта измерения связано то, что этот акт представляет собой нечто цельное, и его нельзя детализировать, вставив в данное измерение еще ряд других. На такую неделимость неоднократно указывал Бор.

2. ОТВЕТ ААРОНОВУ И БОМУ

В статье, опубликованной в 1964 г. под заглавием «Ответ Фоку по вопросу о соотношении неопределенности для энергии и времени»², Ааронов и Бом пытаются ниспровергнуть соотношение неопределенности Гейзенберга — Бора, повторяя свою попытку 1961 г.³ Как видно уже из заголовка, авторы полемизируют главным образом с нами (с нашими работами 1947 г.⁴ и 1962 г.⁵), хотя мы и не являемся единственными защитниками квантовой механики; это обстоятельство побуждает нас дать на этот раз Ааронову и Бому ответ.

Авторы полностью игнорируют в своей статье гносеологическую постановку задачи об измерении в квантовой механике, изложенную в предыдущем параграфе. Они подразделяют измерение на стадии и считают возможным говорить о результатах каждой стадии измерения в отдельности. При этом они, по-видимому, считают, что параллельно ходу измерения меняется по уравнению Шрёдингера и волновая функция. Все это представляет такое явное непонимание основ квантовой механики, что для опровержения рассуждений авторов было бы достаточно на него указать. Мы разберем, однако, эти рассуждения несколько подробнее.

В соотношении неопределенности Гейзенберга — Бора $\Delta(E' - E) \Delta t > \hbar$, составляющем предмет дискуссии, речь идет об обмене энергией между объектом и прибором и о моменте времени, когда этот обмен произошел. Предпосылкой для возможности судить об изменении энергии объекта является применение закона сохранения энергии к системе объект — прибор. Поэтому нельзя, как это делают авторы, отказываться в данной задаче от применения закона сохранения энергии. Нельзя также вводить отдельно время объекта и время прибора и считать их разными динамическими переменными (авторы делают это, чтобы обойти тот факт, что энергия и время являются канонически сопряженными переменными). Время является общим для объекта и прибора и отсчитывается по часам лаборатории.

Как в новой своей статье, так и в статье 1961 г. авторы рассматривают некоторый искусственно подобранный оператор Гамильтона, содержащий разрывную функцию $g(t)$, трактуемую как внешнее поле; эта функция предполагается отличной от нуля (и постоянной) только в течение короткого промежутка времени.

В нашей критической статье 1962 г. мы указывали, что введение в оператор Гамильтона разрывных функций от времени само по себе означает нарушение соотношений Гейзенберга. Справедливость этих соотношений отвергается, таким образом, а priori, что представляет логическую ошибку, известную под именем *petitio principii* (предвосхищение основания).

Признавая в какой-то мере справедливость нашего возражения, авторы пытаются лишить его убедительности путем следующих рассуждений. Они согласны с тем, что мгновенное включение и выключение взаимодействия вносит неопределенность (даже бесконечно большую) в энергию поля; авторы говорят о квантах поля бесконечно большой энергии. Однако они почему-то отрицают, что эти кванты могут передаваться частице. Но такое отрицание означает отрицание применимости закона сохранения энергии к системе объект — прибор (авторы говорят об этом и явно), между тем как закон сохранения энергии представляет, как мы упоминали, единственное средство для суждения об энергии объекта.

В дальнейших своих рассуждениях, относящихся уже к случаю плавного (за время порядка Δt) включения и выключения поля, авторы фактически отказываются от только что высказанного ими непризнания переноса энергии от поля к частице. Они признают, что после включения поля кинетическая энергия частицы становится неопределенной на величину $\Delta E > \hbar/\Delta t$. Но затем они делают предположение еще более странное, чем все предыдущие: они считают, что после выключения поля эта неопределенность исчезает. Как будто кванты поля, испущенные прибором при включении поля, могут при его выключении возвратиться обратно в прибор! По-видимому, это странное умозаключение связано с упомянутым выше совершенно неприемлемым представлением авторов о том, что ход измерения может быть прослежен во времени во всех подробностях и что параллельно ходу измерения продолжает существовать волновая функция, меняющаяся по уравнению Шрёдингера.

В конце статьи авторы делают еще одну попытку избежать неблагоприятных для их точки зрения выводов, — попытку, основанную на замене измерения времени t измерением координаты z вспомогательной тяжелой частицы. Однако здесь авторы не учитывают того обстоятельства, что соотношения неопределенности имеют место и для тяжелой частицы, причем соотношения для энергии и времени легко получаются в данном случае из признаваемых самими авторами соотношений для количества движения и координаты. В самом деле, если измерять время по пройденному тяжелой частицей

пути, то будет $\Delta t = (1/v_z) \Delta z$, и, с другой стороны, $\Delta E = v_z \Delta p_z$, где v_z и p_z — скорость и количество движения тяжелой частицы. Отсюда вследствие $\Delta p_z \Delta z > \hbar$ получается $\Delta E \Delta t > \hbar$. Поскольку система консервативна, последнее соотношение, выведенное для тяжелой (вспомогательной) частицы, справедливо и для легкой (исследуемой) частицы.

Разумеется, если отрицать соотношение неопределенности для вспомогательной частицы, то отсюда нетрудно вывести, что они не выполняются и для исследуемой частицы. Но такой способ рассуждения, исходящий из непризнания соотношений неопределенности для средств наблюдения, означает повторение той самой логической ошибки *petitio principii*, которая, как мы указывали, была сделана авторами в их первой статье (1961 г.).

Таким образом, приходится констатировать, что исходные положения Ааронова и Бома противоречат основам квантовой механики и что их рассуждения и выводы ошибочны. Соотношения неопределенности Гейзенберга — Бора являются органической составной частью квантовой механики, и непризнание их равносильно отрицанию всей квантовой механики в целом.

В. А. Фок

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Фок, Дискуссия с Нильсом Бором, Вопросы философии, № 8, 49 (1964).
2. Y. Aharonov and D. Bohm, Phys. Rev. **B134**, 1417 (1964).
3. Y. Aharonov and D. Bohm, Phys. Rev. **122**, 1649 (1961).
4. Н. С. Крылов и В. А. Фок, ЖЭТФ **17**, 93 (1947); V. Fock and N. Krylov, J. Phys. USSR **11**, 112 (1947).
5. В. А. Фок, ЖЭТФ **42**, 1135 (1962).