

Член-корреспондент АН СССР А. Д. АЛЕКСАНДРОВ

О СМЫСЛЕ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ

1. В вопросе о смысле ψ -функции имеются три точки зрения (для краткости мы говорим об электроне):

1) ψ характеризует объективное состояние электрона.

2) ψ есть «запись сведений о состоянии»; само состояние «сливается с понятием: сведения о состоянии» (7).

3) ψ относится не к электрону, а к «ансамблю» (9, 10).

Цель настоящей заметки: углубить первую точку зрения и указать ложность двух других, которые мы называем, соответственно, «копенгагенской» и «статистической». Волновая функция определяется «полным набором величин» и сама определяет вероятность получить при измерении данное значение данной величины. Поэтому вопрос о ее смысле приводит к вопросу о смысле понятий измерение, физическая величина, вероятность.

2. Первая точка зрения не должна пониматься так, что электрону самому по себе всегда соответствует некоторая, хотя бы и неизвестная ψ -функция. Согласно квантовой механике, одному электрону в сложной системе, вообще говоря, не отвечает никакая ψ -функция. Следовательно, для того, чтобы электрон находился в состоянии, представимом ψ -функцией, необходимы известные условия. Состояние электрона не есть нечто определенное само по себе; оно обусловлено отношением электрона к другим объектам. Описание состояния ψ -функцией относится к соответствующим условиям: «неабсолютное описание» (3). Безотносительно к условиям понятие о ψ превращается в бессмыслицу. Это легко понять в свете общего положения И. В. Сталина: «...любое явление в любой области природы может быть превращено в бессмыслицу, если его рассматривать вне связи с окружающими условиями...» ((1), стр. 101).

Но для того, чтобы сами условия могли считаться определенными, они должны быть в достаточной мере выделенными, так что для них «квантовые эффекты» несущественны, т. е. условия должны быть «классическими». (Нельзя, конечно, сказать, что это положение не может измениться с развитием теории, но таково положение в квантовой механике.) Таким образом, ψ описывает состояние электрона в соответствующих «классически» определенных условиях.

3. Распространенное утверждение, что «всякое описание состояния (или даже само состояние) электрона возникает в результате некоторого измерения» (см. например (6), стр. 15), неверно. Состояние «возникает» в результате соответствующих условий, а описание состояния возникает обычно либо из теоретических предположений, либо в результате фиксации условий, что, конечно, связано с измерением, но, как

правило, над условиями, а не над электроном. Например, в опытах с дифракцией непосредственно задается и измеряется ускоряющее поле (условия), но не импульс электронов. Измерение же импульса его нарушает (см. например (9, 10)).

В обсуждении экспериментов и роли прибора нужно различать: а) «приготовление объекта» и создание условий, б) эффект (например, попадание электрона на фотопластинку) (5), в) наблюдение. Первые две части объективны и могут осуществляться в природе независимо от человека; к ним и относится физическая теория. Поэтому под «результатом измерения» в квантовой механике нужно понимать объективный эффект взаимодействия электрона с подходящим объектом. Разговоры о наблюдателе нужно исключить и иметь дело с объективными условиями и объективными эффектами. Физическая величина есть объективная характеристика явления, а не результат наблюдения.

4. В копенгагенской точке зрения все это спутано. Зависимость состояния от условий подменяется зависимостью его от наблюдения; не абсолютное, относительное понимается как субъективное. Объективные эффекты спутываются с наблюдением и физическая величина понимается не как объективная характеристика явления, но как результат наблюдения. Электрон мыслится, собственно, как классическая частица, сведения о которой ограничиваются «принципом дополнительности», поэтому ψ лишается физического смысла, сохраняя только роль символической записи этих сведений или «возможных предсказаний» (7). Таким образом, копенгагенское понимание ψ -функции основано, не считая прочего, на элементарной путанице понятий (ср. критику в (4-6, 11)).

5. Физическая величина есть объективная характеристика объекта или явления. Поскольку при измерении над электроном в данном состоянии могут получаться разные значения одной и той же величины L , т. е. разные объективные эффекты, постольку нельзя считать, что это состояние характеризуется определенным значением величины L . Поэтому, вообще говоря, величина должна рассматриваться не как характеристика электрона в данном состоянии, но как характеристика соответствующего взаимодействия электрона с другим объектом. От этого величина не перестанет быть объективной, но она не принадлежит электрону самому по себе. При таком понимании нет ничего удивительного в том, что в данном состоянии не всякая величина имеет определенное значение и не любые две величины измеримы совместно.

Однако, если при измерении над данным объектом в данных условиях всегда обнаруживается один и тот же эффект, то мы должны заключить, что объекту присуще соответствующее свойство. Это есть одна из основных теоретико-познавательных предпосылок естествознания.

Если функция φ является собственной функцией оператора какой-либо физической величины L , то при измерении обнаруживается всегда одно и то же значение L , и мы должны поэтому отнести электрону в таком состоянии соответствующее свойство, что и выражают, говоря, что электрон имеет, например, определенный импульс и т. п.

Таким образом, ψ -функция характеризует свойства, присущие электрону в данном состоянии. (Заметим, что для любой данной ψ можно подобрать операторы L , выраженные через операторы координат и импульса и такие, что $L\psi = \lambda\psi$. В этом смысле всякая ψ определяется значениями некоторых величин L и сама их вполне определяет. Т. е., подобно случаю классической механики, состояние однозначно определяется достоверными значениями не-

которых величин, хотя вместе с тем в отличие от классики не все возможные для электрона величины имеют одновременно определенные значения.)

6. Однако имеется еще возможность таких измерений (взаимодействие с «классическими» объектами), результат которых не определен однозначно. Здесь ψ определяет вероятность результата. Но так как ψ отражает состояние электрона, то и вероятность должна иметь смысл в отношении к одному электрону. Оно так и есть в действительности, что выясняется, если определять вероятность, исходя из диалектической категории реальной возможности.

Вероятность данного эффекта — результата данного явления — есть мера его возможности в данных условиях; она есть объективная характеристика связи явления с условиями. Реальные возможности присущи явлению в данных условиях. При воспроизведении явлений в тех же условиях эти возможности претворяются в действительность и вероятность проявляется в частоте появления того или иного эффекта.

Вероятность не сводится к частоте события в «ансамбле» или «коллективе», но проявляется в частоте и измеряется частотой. (Аналогично, например, энергия не сводится к работе, но проявляется в работе и измеряется ею.) Неограниченный «коллектив» есть совокупность явлений, возможных в данных условиях; и, стало быть, мы неизбежно приходим к тому, что вероятность есть численная характеристика некоторых возможностей, присущих данному типу явления в данных условиях. Например, энтропия есть логарифм вероятности. Но она имеет смысл, например, для данного газа независимо от того, осуществляется ли ансамбль всевозможных его микросостояний или нет (он и не может осуществиться сколько-нибудь полно в короткий срок). Следовательно, здесь ансамбль есть совокупность возможных состояний, а энтропия (вероятность) есть объективная характеристика газа в данных макроусловиях p, T по числу возможных в этих условиях микросостояний. Таким образом, вероятность есть мера возможности, а ансамбль есть результат выявления или, в другом смысле, теоретическое средство предоставления разных возможностей.

7. Итак, φ - функция есть характеристика состояния электрона в определенных, макроскопически определяемых условиях; она характеризует свойства, присущие электрону в этом состоянии, через реальные возможности результатов взаимодействия электрона с другими объектами. Особая форма сочетания этих возможностей в одном состоянии выражается принципом суперпозиции. Разложение ψ по собственным функциям оператора L есть абстрактное выявление таких возможностей, а измерение величины L есть реальное их выявление, в чем и состоит роль измерительного прибора. Электрон, как и всякий объект, вполне характеризуется его возможными взаимодействиями (⁽²⁾, стр. 407, (^{3, 4})).

8. Согласно статистическому воззрению, « когда говорят, что частица находится в состоянии, характеризуемом волновой функцией ψ , то следует представлять себе большее число таких частиц, которые независимо друг от друга находятся в том же состоянии и поэтому могут служить для воспроизведения большого числа тождественных опытов. Такой набор частиц называется чистым ансамблем... Стало быть, состояние частицы, характеризуемое волновой функцией, следует понимать как принадлежность частицы к определенному чистому ансамблю» (⁽⁹⁾, стр. 54—55). Это определение содержит порочный круг, так как определяет состояние через принадлежность к «ансамблю», а «ансамбль» — через одинаковость состояний. В действительности же состояние электрона определяется условиями. В (^{9, 11}) говорится о том, что ансамбль определяется

макроскопическими условиями. Но тип частицы и условия в каждом отдельном элементе ансамбля одни и те же, так что эти данные, а вместе с тем и определяемое ими состояние (ψ) тем самым относятся к элементу ансамбля, т. е. к одной частице в данных условиях.

Далее, в одной ψ , так сказать, заключен континуум возможностей для разных величин в разных сочетаниях; например, можно измерять импульс и координату по любой паре взаимно перпендикулярных осей. Поэтому для теоретического представления или опытного выявления разнообразных возможностей, отображаемых в ψ , следовало бы представлять себе или иметь в опыте громадное множество огромных «наборов» частиц. Поэтому «ансамбль», т. е. набор большого числа частиц, который «следует представлять себе», есть мысленная конструкция, недостаточная для охвата содержания, заключенного в понятии ψ -функции. Если же иметь в виду не ансамбль частиц, а ансамбль — коллектив тождественных опытов, то содержание ψ не исчерпывается одним таким коллективом, так как включает возможность измерения разных величин, которым отвечают разные статистические коллективы возможных опытов.

Связывать ψ обязательно с ансамблем частиц имело бы смысл, если бы имелись «скрытые параметры», относящиеся к одной частице и определяющие результат одного измерения. Однако известно и легко показать (см. например ⁽¹¹⁾), что предположение о таких скрытых параметрах противоречит квантовой механике; все равно, результат измерения должен определяться, вообще говоря, не только состоянием частицы с учетом скрытых параметров, но и состоянием прибора. Следовательно, состояние частицы (даже дополненное новыми параметрами) определяет именно возможность того или иного результата. Словом, понять смысл ψ без понятия возможности нельзя, и ансамбль заменить его не в состоянии.

Утверждение, будто ψ -функция и вообще квантовая механика относятся только к ансамблям, ошибочно. Из этого утверждения необходимо должно следовать, например, что законы сохранения энергии и импульса (которые органически входят в квантовую механику) тоже относятся только к ансамблям, что, как известно, неверно. Далее, ψ может определяться одной величиной (или несколькими), например, как собственная функция оператора энергии. В этом случае энергия принадлежит одному атому и ансамбль тут вообще не при чем. Статистическое же воззрение, относя ψ и даже физические величины ⁽¹⁰⁾ только к ансамблю, отрицает тем самым осмысленность понятия стационарного состояния для одного атома. Оно не принимает той посылки, что если при разных измерениях обнаруживается один и тот же эффект, то объект имеет соответствующее свойство. Предметом теории делается не объект, а коллектив опытов, не только квантовая, но даже классическая механика объявляется статистической теорией (⁽¹⁰⁾, стр. 355). В действительности же квантовая механика не сводится к статистике опытов, хотя и включает ее; она есть теория объективных процессов — и единичных и массовых.

В заключение автор рад поблагодарить В. А. Фока за обсуждение изложенных в этой заметке взглядов.

Поступило
20 V 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ История ВКП (б), Краткий курс. ² К. Маркс — Ф. Энгельс, Соч., 14.
³ В. А. Фок, Вестник Лен. ун-та, № 4 (1949). ⁴ А. Д. Александров, там же.
⁵ В. А. Фок, УФН, 45, в. 1 (1951). ⁶ А. Д. Александров, ДАН, 84, № 2 (1952).
⁷ В. А. Фок, А. Эйнштейн и Н. Бор, УФН, 16, в. 4 (1936). ⁸ Л. Ландау и Е. Лифшиц, Квантовая механика, 1948. ⁹ Д. И. Блохинцев, Основы квантовой механики, 1949. ¹⁰ Л. И. Мандельштам, Соч., 5, 1950. ¹¹ Д. И. Блохинцев, УФН, 45, в. 2 (1951).