

Модальная интерпретация квантовой механики как «анти-коллапсовская» интерпретация*

1. Предварительные замечания

Впервые термин «модальная интерпретация квантовой механики» употребил американский философ Б. ван Фраассен, назвавший таким образом выдвинутую им в 1973 г. интерпретацию¹. Эта интерпретация была им подробно изложена в 1991 г.² После этого термин «модальная интерпретация» был распространен на некоторые интерпретации, выдвигавшиеся ранее: на интерактивную интерпретацию Р.А.Хилея, на «новую» интерпретацию С.Кохена³. В девяностые годы модальная интерпретация становится достаточно популярной: ее поддерживает ряд физиков и философов науки, она излагается в авторитетных книгах по философии физики⁴. Модальная интерпретация занимает свое место в ряду неортодоксальных интерпретаций квантовой механики, т.е. интерпретаций, выдвинутых в противовес ортодоксальной интерпретации, развитой создателями этой теории (В.Гейзенберг, М.Борн, В.Паули, П.А.М.Дирак) и изложенной в основных учебниках⁵.

В настоящей статье модальная интерпретация квантовой механики рассматривается как одна из «антиколлапсовских интерпретаций», т.е. интерпретаций, преодолевающих представление о редукации волнового пакета, поддержанное многими из создателей квантовой теории и прочно вошедшее в ортодоксальную интерпретацию. *При этом мы избегаем абстрактной алгебраической терминологии, бытующей в современных работах по философии*

* Статья представляет результаты исследования, поддержанного РФФИ (проект No: 99-06-80224).

квантовой механики. В следующем параграфе формулируется проблема квантовомеханической теории измерений, стоящая за представлением о редукции волнового пакета и делящая интерпретации на «коллапсовские» и «антиколлапсовские». В третьем параграфе излагается основная идея модальной интерпретации и обозначается ее вклад в «антиколлапсовское движение».

2. «Коллапсовские» и «антиколлапсовские» интерпретации

Идея редукции волнового пакета была высказана В.Гейзенбергом в 1927 г. при обсуждении измерения координаты электрона⁶. Эта идея была затем развита им же, а также П.А.М.Дираком и И. фон Нейманом в понятие некаузального изменения (коллапса) состояния системы при осуществлении измерения. Упрощая существо дела и представляя измерительный прибор как «идеальный фильтр», редукцией волнового пакета называют переход суперпозиции $\Psi = \sum c_n \varphi_n$, где φ_n — собственные состояния измеряемой величины, в одно из этих собственных состояний φ_n . Гейзенберг, Дирак и фон Нейман таким образом выделяют, наряду со стандартным каузальным изменением состояния системы (например, электрона) в соответствии с уравнением Шредингера, «некаузальный прыжок» этого состояния, приходящийся на акт измерения. Исходя из суперпозиционного состояния нельзя предсказать то «редуцированное» состояние, в которое эта суперпозиция перейдет в результате редукции, можно лишь вычислить вероятности переходов в различные возможные «редуцированные» состояния.

В квантовомеханической теории измерений, принимающей во внимание взаимодействие с измерительным прибором, редукция волнового пакета выглядит следующим образом. Пусть физическая система I , у которой мы измеряем некоторую величину Q , первоначально находилась в состоянии $\| I, \psi \rangle$, представимом в виде суперпозиции собственных состояний соответствующего оператора, т.е. в виде $\sum c_n \| I, q_n \rangle$. Пусть прибор Π первоначально находился в состоянии $\| \Pi, 0 \rangle$. В соответствии с законами квантовой механики измерение описывает следующая формула:

$$U \| I, \psi \rangle \| \Pi, 0 \rangle = \sum c_n \| I, q_n \rangle \| \Pi, a_n \rangle \quad (1)$$

где U — оператор взаимодействия микросистемы с измерительным прибором, a_n — показания прибора (непосредственные результаты измерения).

Формула (1), однако, не описывает всего процесса измерения. Всякий раз с прибора снимают какое-либо одно показание a_n и по нему определяют значение измеряемой физической величины q_n . На языке редукции волнового пакета это означает переход суперпозиции, стоящей в правой части равенства (1), в один из ее членов, содержащий то значение a_n , которое действительно наблюдалось. Иными словами, постулируется следующее:

$$\sum c_n |I, q_n\rangle |II, a_n\rangle \Rightarrow |I, q_n\rangle |II, a_n\rangle \quad (2)$$

В отличие от формулы (1), формула (2) выражает некаузальный скачок, про который мы можем лишь сказать, что его вероятность равна $|c_n|^2$.

Формулы (1) и (2) не просто повторяют приведенную перед ними схему $\sum c_n \varphi_n \Rightarrow \varphi_n$. В них обозначен тот факт, что система I, над которой производится измерение, попадает, провзаимодействовав с прибором, в так называемое спутанное состояние, отображенное в правой части формулы (1) и в левой части формулы (2). Иными словами, в них находит свое выражение то обстоятельство, что взаимодействие физической системы с измерительным прибором порождает комплекс, в котором уже нет в чистом виде ни системы, ни прибора. В свою очередь формула (2) показывает, что представленная в ней редукция волнового пакета означает факторизацию: вместе с выделением из суперпозиции одного из ее слагаемых, само это слагаемое превращается в произведение двух чистых состояний, представляющих по отдельности систему I, над которой производится измерение, и измерительный прибор.

Хотя редукция волнового пакета выпадает из числа динамических процессов, подчиняющихся законам квантовой механики, сам факт этой редукции учитывается в математической схеме этой теории. Сформулируем, следуя И.фон Нейману, понятие проекционного оператора. Это оператор, выделяющий из суперпозиции $\Psi = \Psi \sum c_n \varphi_n$, один из ее членов. В случае формулы (2) это будет оператор $P_{|I, q_n\rangle}$, равный $|I, a_n\rangle \langle I, a_n|$, $|II, a_n\rangle \langle II, a_n|$. Формула (2) превращается в следующую формулу, выражающую проекционный постулат фон Неймана:

$$P_{|I, q_n\rangle} |I, a_n\rangle \sum c_n |I, q_n\rangle |II, a_n\rangle = |I, q_n\rangle |II, a_n\rangle^8 / \quad (3)$$

«Редукция волнового пакета» сразу же встретила оппозицию. Именно против этого понятия выступил А.Эйнштейн на 5-ой Сольвеевской конференции (1927 г.), предложив статистическую (ансамблевую) интерпретацию волновой функции⁹. «Скачком

теории» иронически называл «редукцию» Э.Шредингер, также выступивший со своей «антиколлапсовской» интерпретацией (1950 г.)¹⁰. Одним из резких критиков «редукции волнового пакета» был американский физик и философ Г.Маргенау¹¹. Против этого понятия выступал и советский физик Л.И.Мандельштам¹². Тем не менее многие из классиков квантовой механики продолжали свободно оперировать понятием редукции. Более того, это понятие заняло важное место в таких авторитетных руководствах по квантовой механике, как двухтомник А.Мессиа и учебник Д.И.Блохинцева.

Как справедливо заметил Дж. Буб, «редукция волнового пакета» предполагает отсылку собственных значений, наблюдаемых при измерении, к собственным состояниям физических систем, так называемую линию связи «собственные значения — собственные состояния» («eigenvalue — eigenstate link»). Иными словами, при формировании этого понятия неявно предполагается, что наблюдаемые при измерении собственные значения физических величин характеризуют не то состояние системы, в котором она была до измерения, а то собственное состояние, в которое она перешла в результате измерения. «Антиколлапсовские» интерпретации, в свою очередь, разрывают «eigenvalue — eigenstate link». В них, как правило, выделяются некоторые «предпочтительные» динамические переменные, измерение которых непосредственно характеризует физическую систему, над которой производится это измерение.

Сказанное целесообразно проиллюстрировать на материале дискуссий внутри копенгагенской школы, объединившей большую часть физиков, внесших решающий вклад в создание квантовой теории. Выше было сказано, что понятие редукции волнового пакета прочно вошло в ортодоксальную интерпретацию квантовой механики. Это фраза не означает, что оно господствует среди копенгагенских авторов: определения «копенгагенский» и «ортодоксальный», хотя и близки, но не совпадают. Большинство сторонников копенгагенской интерпретации действительно принимало «редукцию волнового пакета», означающую, как писал В.Паули, «общение с иррациональным»¹³. Однако, самый первый «копенгагенец» Н.Бор не признавал «редукцию волнового пакета» и, как подчеркивает К.Хукер, не пользовался языком, в котором могло бы возникнуть это понятие¹⁴. Хотя разногласия между Бором и другими сторонниками копенгагенской интерпретации не следует преувеличивать (на чем настаивал, в частности, И.С.Алексеев¹⁵), с точки зрения современных проблем философии кванто-

вой механики они оказываются все же существенными. Н. Бор видел в формулах типа формул (1), (2) и (3) лишь «символические приемы». Он считал крайне неудачными выражения «наблюдение возмущает явление» и «измерение создает физические атрибуты объектов», часто используемые вместе с «редукцией волнового пакета», и отрицал существование в квантовой механике особой проблемы измерения¹⁶.

В качестве «предпочтительных» (по Бубу) динамических переменных, у Бора выступают обычные классические динамические переменные, связанные отношением дополнительности. Это следует из его основных постулатов: 1) целостности «квантового явления», объединяющего физическую систему и прибор, используемый для измерения у этой системы какой-либо динамической переменной, и 2) необходимости классического языка для описания прибора и результата измерения. «Квантовые явления» дополнительные, поскольку дополнительные приборы и, соответственно, классические динамические характеристики физических систем. Вместе с тем измерение не означает перехода физической системы в какое-либо иное состояние. В квантовой механике физические системы рассматриваются лишь как «квантовые явления», т.е. в единстве с тем или иным измерительным прибором. Показания приборов (которые непременно должны быть выражены на языке классической физики) непосредственно характеризуют физические системы, над которыми производятся измерения, а не их состояния, возникающие в результате измерений.

Не только копенгагенская интерпретация распадается на «коллапсовскую» и «антиколлапсовскую» версии. Такие две версии присутствуют в статистической (ансамблевой) интерпретации, выдвигавшейся как антитеза копенгагенской. Как было отмечено выше, с «антиколлапсовской» статистической интерпретацией» выступил в 1927 г. А.Эйнштейн. Эйнштейн, правда, лишь намечил контуры своей интерпретации. Статистическая интерпретация в антиколлапсовском варианте была сформулирована позднее философом К.Поппером и физиком Л.Баллентайном¹⁷. Распространяя на интерпретацию Поппера-Баллентайна термин «предпочтительные динамические переменные», мы можем сказать, что таковыми в ней являются статистические свойства коллектива (ансамбля) одинаково приготовленных систем (например, отфильтрованных при помощи прибора Штерна-Герлаха). Вспомним, что всякая статистическая интерпретация рассматривает в качестве объекта квантовой механики не одну систему, а такой

ансамбль. Поэтому статистические свойства ансамбля непосредственно характеризуют квантово-механическое состояние. При «антиколлапсовской» статистической интерпретации, кроме того, предполагается, что физически осмысленным является лишь «коллективный эксперимент» и, соответственно, лишь статистика показаний приборов, которая непосредственно вытекает из правой части формулы (1). Формулы (2) и (3) оказываются не у дел.

«Коллапсовский» вариант статистической интерпретации (Д.И.Блохинцев) немногим отличается от «коллапсовской» версии копенгагенской интерпретации. Он возникает, если предается физический смысл единичному измерению и, соответственно, процедуре, посредством которой статистика результатов измерения составляется из единичных измерений: мы, скажем, отбираем измерения, дающие импульс p_1 , затем измерения, дающие p_2 , затем измерения, дающие p_3 , затем p_3 и т.д. Чтобы получить статистику, характеризующую ансамбль, мы, стало быть, совершаем совокупность редукций исходного состояния: к состоянию с импульсом p_1 , к состоянию с импульсом p_2 и т.д. Эти «редукции» означают отбор подансамблей. Хотя такая терминология, по-видимому, более рациональна, чем «общение с иррациональным» (Паули), она не меняет существа дела. Принимая «редукцию», мы принимаем некаузальное изменение состояния системы, описываемое формулами (2) и (3).

К числу «антиколлапсовских» интерпретаций относится также интерпретация Д.Бома, прибегающая к «скрытым переменным». В ней «предпочтительной динамической переменной» оказывается пространственная координата микросистемы. Эта координата подчиняется причинному закону (уравнению), формулируемому при помощи волновой функции, играющей роль «ведущего поля» (guidance field).

Настоящая статья не нацелена на сравнительный анализ «антиколлапсовских» интерпретаций квантовой механики и даже на их полный обзор. Наша задача здесь очертить «антиколлапсовское» движение и охарактеризовать модальную интерпретацию как одну из «антиколлапсовских» интерпретаций.

3. Основная идея модальной интерпретации

Основная идея модальной интерпретации — это идея особого *динамического состояния* физической системы, называемого иногда также состоянием значений динамических переменных (value state). Иными словами, кроме обычного *квантового состояния*, представляемого волновой функцией (если это состояние

чистое), вводится еще динамическое состояние, определяемое через значения динамических переменных, характерных для данной системы. При модальной интерпретации квантовая механика рассматривается как теория, приписывающая определенные значения этим динамическим переменным. В отличие от ортодоксальной интерпретации, эта интерпретация допускает, что динамическая переменная имеет определенное значение, даже если физическая система не находится в собственном состоянии соответствующего оператора. Иными словами, динамические переменные могут иметь определенные значения независимо от того, проводится ли измерение этих динамических переменных. Динамическая переменная становится объективной характеристикой состояния системы, правда, не квантового состояния, а динамического состояния, дающего более тонкое описание системы.

Модальная интерпретация не предполагает чего-либо нового относительно квантовых состояний. Она лишь подчеркивает тот факт, что эти состояния определяют лишь вероятностные диспозиции значений динамических переменных (отсюда само название «модальная интерпретация»). Это означает, что динамические состояния, вводимые при модальной интерпретации, не полностью определены квантовыми состояниями и не выводятся из них. Вместе с тем квантовые состояния, изменяющиеся в соответствии с уравнением Шредингера, накладывают статистические связи на изменения динамических состояний. «Состояние системы описывает то, что может случиться со значениями физических величин, — пишет о квантовом состоянии ван Фраассен, — то же, что реально происходит с ними, лишь возможно по отношению к состоянию физической системы и не может быть дедуцировано из этого состояния»¹⁸.

Мы сказали, что динамические состояния, вводимые при модальной интерпретации, дают более тонкое описание физической системы, нежели квантовое состояние. Эта тонкость, однако, не переходит в ту тонкость, которая отличает интерпретации, допускающие «скрытые переменные». Модальная интерпретация учитывает известные ограничительные теоремы: от теоремы фон Неймана до теоремы Кохена-Шпекера¹⁹. При модальной интерпретации допускается только ограниченный набор динамических переменных, имеющих точные значения, однако эта интерпретация, в отличие от копенгагенской интерпретации, допускает, что эти переменные имеют точные значения во всякое время (а не только тогда, когда производится измерение).

Согласно модальной интерпретации, измерение открывает нам динамическое состояние системы. Пользуясь терминологией Буба, мы можем сказать, что динамическое состояние описы-

вают «предпочтительные динамические переменные». Если фиксируется какое-либо значение такой динамической переменной, то это не означает, что система переходит в соответствующее квантовое собственное состояние, т.е. это не означает, что происходит редукция волнового пакета. Это означает, что система обладает одним из тех значений динамической переменной, которому квантовое состояние, в котором находится система, приписывает определенную вероятность.

Выше в связи с формулами (1) и (2) отмечалось, что система I, над которой производится измерение, провзаимодействовав с измерительным прибором, оказывается, как и измерительный прибор, в спутанном состоянии. Модальная интерпретация, тем не менее, позволяет приписать (с учетом различных предосторожностей) системе одно из значений q_n , а прибору одно из значений a_n . В таком случае формулы (2) и (3) теряют физический смысл: измерение дает значение a_n , которое позволяет непосредственно судить о q_n .

Было выдвинуто несколько версий модальной интерпретации. Ван Фраассен называет свою версию копенгагенской: это, так сказать, самая слабая версия модальной интерпретации. Динамическое состояние характеризуется тем значением динамической переменной, которым система обладала бы, если она была бы в собственном состоянии этой динамической переменной. В этой версии «редукция волнового пакета» элиминируется путем переформулировки: вместо суммы детерминированного и индетерминированного событий (взаимодействия с прибором и редукции) предполагается сумма индетерминированного и детерминированного событий (реализации одного из значений динамической переменной и взаимодействия с прибором).

Другие версии модальной интерпретации не принимают того ограничения, к которому прибегает ван Фраассен, и, более того, постулируют особую стохастическую динамику для динамических состояний.

4. Заключение

Выше модальная интерпретация квантовой механики рассматривалась с точки зрения ее «антиколлапсовских» возможностей. Сторонники модальной интерпретации, однако, указывают на преимущества этой интерпретации, проявляющиеся при осмыслении принципов работы квантовых компьютеров и квантовой телепортации. Эти вопросы выходят за пределы настоящей статьи.

Примечания

- 1 **Van Fraassen B.** Semantic Analysis of Quantum Logic // C.A. Hooker (ed.) Contemporary Research in the Foundations and Philosophy of Quantum Mechanics. Dordrecht, 1973. P. 80-113.
- 2 **Van Fraassen B.** Quantum Mechanics: An Empiricist View. Oxf., 1991.
- 3 **Kohlen S.** A New Interpretation of Quantum Mechanics // P.Lahti, P.Mittelstaedt (eds.) Symposium on the Foundations of Modern Physics. Singapore, 1985. P. 151-169; **Healey R.A.** The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive Interpretation. Camb., 1989.
- 4 **Bub J.** Interpreting the Quantum World. Camb., 1997; **Dickson M.** Quantum Chance and Nonlocality. Camb., 1998; The Modal interpretation of Quantum Mechanics. D.Dieks and P.Vermass (eds.). Dordrecht, 1998.
- 5 **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика. Ч. 1. М.—Л.: ОГИЗ, 1948; **Мессиа А.** Квантовая механика. В 2 т. М., 1978.
- 6 **Тейзенберг В.** О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики // Успехи физических наук. Т. 122, вып. 4. 1977. С. 622.
- 7 Спутанное состояние передается так называемой несобственной матрицей плотности, показывающей, что это состояние вдвойне смешанное: оно не может быть представлено в виде смеси чистых состояний.
- 8 Термин «проекционный постулат фон Неймана» ввел Г.Маргенау.
- 9 **Эйнштейн А.** Собр. науч. тр. Т. 3. М., 1966. С. 528-530.
- 10 **Schroedinger E.** Space-time Structure. Camb., 1950.
- 11 **Шредингер Э.** Избр. тр. по квантовой механике. М., 1976. С. 261-284.
- 12 **Мандельштам Л.И.** Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М., 1972. С. 348.
- 13 **Паули В.** Физические очерки. М., 1975. С. 62.
- 14 **Hooker C.A.** The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein Versus Bohr // Paradigms and Paradoxes. R.G.Golodny (Ed.). Pittsburgh, 1972. P. 205.
- 15 **Алексеев И.С.** Концепция дополнителности. Историко-методологический анализ. М., 1978. С. 150-161.
- 16 **Бор Н.** Избранные научные труды. Т. 2. М., 1971. С. 391, 531.
- 17 Ссылки см. в моей статье: **Печенкин А.А.** Статистическая интерпретация квантовой механики: достигнут ли прогрессивный сдвиг проблемы? // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 7: Философия. 1997. № 5. С. 26-41.
- 18 **Van Fraassen B.C.** The Labyrinth of Quantum Logic // Logical and Epistemological Studies in Contemporary Physics/Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. 13. Dordrecht, 1974. P. 300-301.
- 19 Теорема Кохена-Шпекера указывает, что предположение о том, что функциональные отношения между наблюдаемыми отображаются в функциональные отношения между точными значениями этих наблюдаемых, ведет к противоречию даже в том случае, если эти наблюдаемые совместны.