
МНОГОГРАННОСТЬ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

М.Л. Фильченков, Ю.П. Лаптев

*Институт гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов*

Рассмотрено современное состояние квантовой теории и основные этапы её создания. Проанализированы интерпретации и формулировки квантовой механики, мысленный эксперимент Эйнштейна–Подольского–Розена, неравенства Белла, запутанные состояния, скрытые параметры, квантовая нелокальность и квантовая телепортация.

Ключевые слова: квантовая теория, квантовая механика, квантовая теория поля, интерпретации, формулировки, ЭПР, неравенства Белла, запутанные состояния, скрытые параметры, квантовая нелокальность, квантовая телепортация.

Введение

Начало квантовой теории положила работа М. Планка [1], согласно которой чёрное излучение испускается и поглощается дискретно, то есть порциями – квантами. А. Эйнштейн отождествил кванты света [2] с частицами, которые позднее стали называть фотонами. Следующим шагом явилась модель водородоподобного атома, предложенная Н Бором [3] на основе планетарной модели Э. Резерфорда. Она позволила объяснить формулу И. Ридберга для частот излучения атома водорода. Завершением старой квантовой теории стал корпускулярно-волновой дуализм Л. Де Бройля [4].

Математический аппарат квантовой механики был создан в 1925–1928 гг. трудами В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера, П.А.М. Дирака, В. Паули, М. Борна, которым, так же как Н. Бору и А. Эйнштейну, были присуждены нобелевские премии, и окончательно сформулирован И. фон Нейманом в 1933 г. [5].

На базе релятивистской квантовой механики, завершённой Дираком [6], был построен формализм квантовой теории поля. Квантовая электродинамика, описывающая электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами, была завершена в 1950-х гг.

Дальнейшее развитие квантовой теории поля, связанное с физикой элементарных частиц и высоких энергий, привело к созданию в 1980-х гг. Стандартной модели элементарных частиц, основанной на теории векторных калибровочных полей. Электромагнитное взаимодействие описывается с помощью абелевых калибровочных полей, а сильное и слабое взаимодействия – с помощью неабелевых калибровочных полей Янга–Миллса. Сильное взаимодействие рассматривается в рамках квантовой хромодинамики, а электрослабое – в рамках теории Вейнберга–Салама.

Объединение электрослабых и сильных взаимодействий привело к теории Великого объединения, а затем к идее глобальной суперсимметрии, позволяющей устранить расходимости за счёт компенсации вкладов калибровочных полей и полей материи. Гравитационное взаимодействие включалось в рамки моделей супергравитации, являющихся низкоэнергетическим пределом теорий суперструн, претендующей на описание всех элементарных частиц и взаимодействий.

После того как аппарат нерелятивистской квантовой механика был построен [5], продолжались дискуссии, касающиеся её интерпретаций и формулировок, которые привели сначала к обсуждению мысленного эксперимента Эйнштейна–Подольского–Розена [7], доказательству нарушения неравенств Белла [8; 9; 10; 11], интерпретируемому как отсутствие скрытых параметров, а затем к выводу о квантовой нелокальности [12; 13] и возможности квантовой телепортации [14; 15; 16].

Интерпретации и формулировки квантовой механики

Мы не ставим перед собой цель рассмотреть все существующие интерпретации и формулировки квантовой механики. Остановимся лишь на трёх интерпретациях [17; 18; 19] – копенгагенской, статистической и многомировой и на трёх формулировках [20; 5; 21] – матричной механике, волновой механике и на формализме интегралов по путям.

Все интерпретации, указанные выше, основаны на вероятностной интерпретации волновой функции и предположении, что описание микромира возможно только в терминах макроскопических величин. Различие между ними состоит в интерпретации измерений физических величин квантовых объектов [22]. Копенгагенская интерпретация под макроскопическим описанием микромира предполагает наличие прибора и наблюдателя с часами, то есть, по существу, наличие системы отсчёта для измерения физических величин микрообъектов.

Согласно копенгагенской и многомировой интерпретациям волновая функция полностью определяет состояние единичного микрообъекта, которому приписываются статистические свойства. В статистической интерпретации волновая функция описывает квантовый ансамбль одинаково приготовленных микрообъектов [23; 24]. Различие между копенгагенской и статистической интерпретациями проявляется также в объяснении двухщелевого эксперимента по дифракции поочерёдно летящих электронов [25]. Копенгагенская интерпретация этого эксперимента состоит в том, что один электрон, описываемый дебройлевской волной, проходит сразу через две щели, интерферируя сам с собой [26; 27]. Его статистическая интерпретация сводится к образованию дифракционной картины по мере накопления электронов. Таким образом копенгагенская и статистическая интерпретации неразличимы на опыте [28].

Согласно копенгагенской и статистической интерпретациям при измерении происходит редукция волнового пакета. До измерения волновая функция описывается нестационарным уравнением Шрёдингера (детерминированная U-процедура для временной эволюции), а при измерении (вероятностная R-процедура для случайных величин, квантовых скачков) – уравнением на собственные функции и собственные значения оператора измеряемой величины, вероятность регистрации которых определяется коэффициентами в суперпозиции собственных функций этого оператора [26; 29].

В качестве парадокса, к которому приводит принцип суперпозиции состояний, часто используется мысленный эксперимент с «котом Шрёдингера» [30], согласно которому в закрытом ящике имеет место суперпозиция живого и мёртвого кота (кот может быть отравлен в результате случайного процесса). Только после открытия ящика можно определить, жив кот или мёртв. Разрешение парадокса состоит в том, что принцип суперпозиции не применим к макрообъектам или субъектам, к которым относится кот.

В многомировой интерпретации [31; 32] всегда справедлив принцип суперпозиции, то есть при измерении происходит ветвление волновой функции. Возможные результаты измерений соответствуют отдельным мирам, составляющим мультиверс. Волновая функция всегда описывается уравнением Шрёдингера. Многомировая интерпретация применима к квантовой космологии, где трудно ввести понятие классического наблюдателя [18].

Различие между формулировками квантовой механики состоит в том, что в матричной механике, разработанной В. Гейзенбергом, М. Борном и П. Йорданом [33; 34; 35], основой является матричное представление операторов физических величин, а в волновой механике Э. Шрёдингера – волновая функция [36; 37; 38; 39; 40].

В формализме интегралов по путям, предложенном Р. Фейнманом [41; 21; 22], вычисляется вероятность перехода, исходя из классических путей между начальным и конечным состояниями. Путям сопоставляются амплитуды перехода, которые суммируются. Квадрат модуля интеграла по путям даёт искомую вероятность перехода. Фейнмановский интеграл по путям (континуальный или функциональный интеграл) широко используется в квантовой теории поля.

Мысленный эксперимент Эйнштейна–Подольского–Розена

Критике копенгагенской интерпретации квантовой механики посвящена известная статья А. Эйнштейна, Б. Подольского и Н. Розена [7], в которой предлагается мысленный эксперимент, подвергающий сомнению соотношение неопределённостей.

Суть этого эксперимента сводится к тому, что предлагается способ определить одновременно координату и импульс частицы, образовавшейся в результате распада (на две частицы) покоящейся квантовой системы. Сначала измеряется импульс первой частицы p_1 , затем измеряется координата

второй частицы x_2 . Поскольку импульс второй частицы известен из закона сохранения импульса и равен $p_2 = -p_1$, то делается вывод о том, что можно одновременно определить координату и импульс второй частицы, что противоречит соотношению неопределённостей.

По мнению авторов статьи, отсюда следует, что квантовая механика, не допускающая нарушения соотношения неопределённостей, не даёт полного описания физической реальности, критерием которой является возможность достоверного предсказания значения физической величины.

В ответ Н. Бор опубликовал статью [42], в которой он разъясняет, что критерий физической реальности, предложенный в [7], не имеет отношения к одновременному измерению координаты и импульса, поскольку измеряются не величины x_2 и p_2 , относящиеся к одной и той же частице, а величины p_1 и x_2 , относящиеся к разным частицам, а величина p_2 вычисляется, а не измеряется.

Частицы, на которые распадается квантовая система, обладают единой волновой функцией, даже если между ними нет взаимодействия. В этом проявляется нелокальность квантовой механики [12; 13]. Координата и импульс одной и той же частицы не могут быть одновременно измерены, то есть $[q_i, \hat{p}_i] \neq 0$, поскольку для этого требуются экспериментальные установки, взаимно исключающие друг друга. Однако коммутатор $[q_1 - q_2, \hat{p}_1 + \hat{p}_2] = 0$, даже если $p_1 + p_2 \neq 0$. Поэтому разность координат и сумма импульсов частиц, образовавшихся в результате распада единой квантовой системы, могут быть одновременно измерены [19].

Неравенства Белла. Скрытые параметры

Нелокальность демонстрируется на примере квантовой системы, состоящей из двух частиц, которые находятся в запутанном состоянии [43], то есть описываемом единой волновой функцией, симметричной для бозонов и антисимметричной для фермионов.

Для полного (а фактически классического) описания физической реальности пытались ввести т. н. скрытые параметры, с помощью которых объяснялось бы взаимодействие между частицами, находящимися в запутанном состоянии. Попытки введения локальных скрытых параметров оказались безуспешными [5, 44, 23], что было доказано как теоретически, так и экспериментально. Опровержением гипотезы о скрытых параметрах явилось нарушение неравенств Дж. Белла [8].

Для того чтобы ввести неравенства Белла, не предполагающие априори справедливость квантовой механики, рассмотрим квантовую систему, характеризующуюся одновременно существующими величинами A, B, C , принимающими значения ± 1 , которым соответствуют, вообще говоря, некоммутирующие операторы. Тогда для N таких систем выполняются соотношения [11, 29]:

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-),$$

$$N(B^-C^+) = N(A^+B^-C^+) + N(A^-B^-C^+),$$

$$N(A^+C^-) = N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-),$$

из которых следует неравенство Белла

$$N(A^+B^-) \leq N(B^-C^+) + N(A^+C^-).$$

В квантовой теории неравенства Белла должны нарушаться, поскольку они противоречат соотношениям неопределённостей. Это нарушение и было обнаружено экспериментально [9; 10], что подтвердило справедливость квантовой механики и исключило возможность введения локальных скрытых параметров.

Квантовая телепортация

Оказалось, что запутанные состояния можно использовать для передачи на расстояние неизвестного квантового состояния, используя классический канал связи. Этот процесс принято называть квантовой телепортацией [14; 15; 16]. Квантовое состояние разрушается в точке отправления и восстанавливается в точке приёма.

Протокол квантовой телепортации фотона схематически может быть описан следующим образом. Пусть имеется отправитель фотона (Алиса), его получатель (Боб), ЭПР – пара, то есть два фотона в запутанном состоянии со спинами $s = \pm 1$, и классический канал связи между Алисой и Бобом. Один фотон из ЭПР-пары со спином $s = +1$ летит к Алисе, другой со спином $s = -1$ – к Бобу.

Кроме того, к Алисе летит третий фотон с неизвестным спином s_0 . Алиса производит измерение суммы спинов двух фотонов $s_0 + 1$ и передаёт Бобу по классическому каналу связи результат своего измерения.

После получения сообщения от Алисы Боб совершает такое преобразование над своим фотоном из ЭПР-пары со спином $s = -1$, в результате которого он восстанавливает исходное состояние фотона с неизвестным Алисе спином s_0 , являющимся суммой спина $s_0 + 1$, полученного от Алисы по классическому каналу связи, и спина $s = -1$ фотона из ЭПР-пары.

Таким образом, фотон с неизвестным квантовым состоянием передаётся от Алисы к Бобу в результате измерений, проводимых Алисой и Бобом, с использованием ЭПР-пары и классического канала связи.

Заключение

Многогранность квантовой теории проявляется в том, что она допускает различные интерпретации и формулировки, в отличие, например, от общей теории относительности, которая не существует вне геометрической трактовки гравитации. Кроме того, квантовая теория содержит дуалистические понятия, такие как «частица – волна» в квантовой механике и «частица – по-

ле» в квантовой теории поля, которые позволяют сопоставить физическим величинам операторы, а для систем с переменным числом частиц ввести операторы рождения и уничтожения. Важной особенностью квантовой механики является описание процесса измерения физических величин с помощью недетерминированной R-процедуры, в отличие от детерминированной U-процедуры для волновой функции, удовлетворяющей принципу суперпозиции до и после измерения. Наконец, современное понимание квантовой механики базируется на интерпретации мысленного эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена и неравенств Дж. Белла в рамках квантовой нелокальности.

Более того, оказалась возможной и была осуществлена экспериментально квантовая телепортация фотона с неизвестным квантовым состоянием, которая сводится к передаче результатов измерений, проведённых одним наблюдателем, к другому с использованием ЭПР-пары и классического канала связи между ними.

Несмотря на, казалось, столь противоречивый и разнородный инструментарий, квантовая теория остаётся одной из фундаментальных теорий, наиболее полно подтверждённых экспериментально, исключая некоторые новейшие разделы квантовой теории поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Planck M.* Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum // *Ann. d. Phys.* – 1900. – Bd. 1. – S. 99.
2. *Einstein A.* Über einen Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // *Ann. d. Phys.* – 1905. – Bd. 17. – S. 132–143.
3. *Bohr N.* On the constitution of atoms and molecules // *Phil. Mag.* – 1913. – Vol. 26. – P. 1–24.
4. *Broglie L. de.* On ondeset quanta // *Compt. Rend.* – 1923. – Vol. 177. – P. 507.
5. *Нейман И. фон.* Математические основы квантовой механики / пер. с нем., под ред. Н.Н. Боголюбова. – М.: Наука, 1964. – С. 368.
6. *Дирак П.* Принципы квантовой механики / пер. с англ., под ред. В.А. Фока. – М.: Наука, 1979. – с. 480.
7. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* – 1935. – Vol. 47. – P. 777–780.
8. *Bell J.S.* On the Einstein–Podolsky–Rosen Paradox // *Physics.* – 1964. – Vol. 1. – P. 195–200.
9. *Aspect A., Grandier P. and Roger G.* Experimental realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedanken experiment: A new violation of Bell's inequalities // *Phys. Rev. Lett.* – 1982. – Vol. 49. – P. 91–94.
10. *Aspect A., Dalibard J. and Roger G.* Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // *Phys. Rev. Lett.* – 1982. – Vol. 49. – P. 1804–1807.
11. *Гриб А. А.* Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // *УФН.* – 1984. – Т. 142. – С. 619–634.
12. *Спасский Б. И., Московский А.В.* О нелокальности в квантовой физике // *УФН.* – 1984. – Т. 142. – С. 599–617.
13. *Grib A.A., Rodrigues W.A.Jr.* Nonlocality in Quantum Physics. – N.Y.: Kluwer–Plenum, 1999. – P. 226.
14. *Bennett C.H., et al.* Teleportating an unknown quantum state via classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels // *Phys. Rev. Lett.* – 1993. – Vol. 70. – P. 1895.

15. Белокуров В.В., Тимофеевская О.Д., Хрусталёв О.Ф. Квантовая телепортация – обыкновенное чудо. – Ижевск: РХД, 2000. – С. 256.
16. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика квантовой информации. Квантовая криптография. Квантовая телепортация. Квантовые вычисления / пер. с англ. – М.: Постмаркет, 2002. – С. 376.
17. Марков М. А. О трёх интерпретациях квантовой механики. – М.: Наука, ФМ, 1991. – С. 112.
18. Барвинский А. О., Каменщик А. Ю., Пономарёв В. Н. Фундаментальные проблемы интерпретации квантовой механики. Современный подход. – М.: МГПИ, 1988. – С. 115.
19. Бройль Л. де. Соотношения неопределённости Гейзенберга и вероятностная интерпретация квантовой механики / пер. с франц. – М.: Мир, 1986. – С. 344.
20. Гейзенберг В. Физические принципы квантовой теории / пер. с нем. – М.: РХД, 2002. – С. 148.
21. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям / пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – С. 382
22. Менский М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. – М.: Физматлит, 2001. – С. 232.
23. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. – М.: ФМ, 1966. – С. 160.
24. Блохинцев Д. И. Квантовая механика: Лекции по избранным вопросам. – М.: Атомиздат, 1981. – С. 96.
25. Биберман Л., Сушкин Н., Фабрикант В. Дифракция поочерёдно летящих электронов // ДАН СССР. – 1949. – Т. 66. – С. 185.
26. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики / Пер. с англ., под ред. В. О. Малышенко. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – С. 384.
27. Менский М. Б. Человек и квантовый мир. – Фрязино: Век2, 2007. – С. 320.
28. Рыбаков Ю. П., Терлецкий Я. П. Квантовая механика. – М.: Изд-во УДН, 1991. – С. 206.
29. Гриб А. А. Концепции современного естествознания. Физика. – СПб.: Изд. СПбГУЭФ, 2000. – С. 152.
30. Schrödinger E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik // Naturwissenschaften. – 1935. – Bd. 23. – S. 807–812, 823–832, 844–849.
31. Everett H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics // Rev. Mod. Phys. – 1957. – Vol. 29. – P. 454–462.
32. Wheeler J. A. Assessment of Everett's Relative State Formulation of Quantum Mechanics // Rev. Mod. Phys. – 1957. – Vol. 29. – P. 463–465.
33. Heisenberg W. Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen // Z. Phys. – 1925. – Bd. 33. – S. 879–893.
34. Born M. and Jordan P. Zur Quantenmechanik // Z. Phys. – 1925. – Bd. 34. – S. 858–888.
35. Грин Х. Матричная квантовая механика / пер. с англ., под. ред. А.Ф. Соколова. – Н: НФМИ, 2000. – С. 160.
36. Schrödinger E. Quantisierung des Eigenwert problem. I // Ann. Phys. – 1926. – Bd. 79. – S. 361–376.
37. Schrödinger E. Quantisierung des Eigenwert problem. II // Ann. Phys. – 1926. – Bd. 79. – S. 489–527.
38. Schrödinger E. Über das Verhältnis der Heisenberg–Born–Jordanischen Quantenmechanik zu der meinem // Ann. Phys. – 1926. Bd. 79. – S. 734–756.
39. Schrödinger E. Quantisierung des Eigenwert problem. IV // Ann. Phys. – 1926. Bd. 81. – S. 109–139.
40. Feynman R.P. Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics // Rev. Mod. Phys. – 1948. – Vol. 20. – P. 367–387.

41. *Bohr N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* – 1935. – Vol. 48. – P. 696–702.
42. *Schrödinger E.* Discussion of Probability Relations between Separated Systems // *Proc. Cambridge Philosoph. Soc.* – 1935. – Vol. 31. – P. 555.
43. *Ахиезер А.И., Половин Р.В.* Почему невозможно ввести в квантовую механику скрытые параметры // *УФН.* – 1972. – Т. 107. – С. 463 – 487.

MANYSIDEDNESS OF QUANTUM THEORY

M.L. Fil'chenkov, Yu.P. Laptev

The current state of art in quantum theory and the main stages of its creation have been considered. Interpretations and formulations of quantum mechanics, thought EPR experiment, Bell's inequalities, entanglement, hidden variables, quantum non-locality and quantum teleportation have been analyzed.

Key words: quantum theory, quantum mechanics, quantum field theory, interpretations, formulations, EPR, Bell's inequalities, entanglement, hidden variables, quantum non-locality, quantum teleportation.