

Квантовая механика и ее основные принципы



Александр Михальчев,
старший научный сотрудник
Центра «Квантовая оптика
и квантовая информатика»
Института физики НАН
Беларуси, кандидат физико-
математических наук

К началу XX в. накопился ряд несоответствий между предсказаниями классической физики и экспериментально наблюдаемыми эффектами [1, 2]. В частности, традиционная теория предвещала бесконечно большую мощность излучения энергии нагретым телом, не могла объяснить, почему существует красная граница фотоэффекта, и предложить реалистичную модель атома, в которой бы электроны не падали на ядро. Результатом работы над возникшими противоречиями стало переосмысление основ физики и зарождение квантовой механики. Если прежние каноны строились последовательно и на каждом этапе были интуитивно понятны, то квантовая идея зародилась в значительной мере постулативно – на основе подбора математических конструкций, которые позволят воспроизвести наблюдаемые свойства реальности. Только в дальнейшем (параллельно с выработкой математического аппарата квантовой механики и даже с запозданием) появилась глубокая физическая интерпретация используемых математических объектов.

Практически с момента своего возникновения (в 1920–30-е гг.) квантовая механика начала приводить исследователей к нетривиальным и неожиданным предсказаниям: был сформулирован ряд квантово-механических парадоксов, включая широко известные – кота Шредингера [3] и Эйнштейна-Подольского-Розена [1]. В то время существовали значительные сомнения в корректности квантовой механики и области ее применения, причем даже среди основоположников этой теории. Например, критике подвергалось предсказание существования так называемых перепутанных

состояний, обеспечивающих сильные корреляции между квантовыми системами, сохраняющиеся даже на больших расстояниях, и высказывались предположения о неприменимости квантовой теории для описания нелокальных систем.

Некоторые из обнаруженных парадоксов лишь указывали на неприменимость классических принципов в отношении квантовых систем и их большую сложность, в то время как другие представляли собой предсказание важных эффектов, подтвержденных экспериментально через полвека и используемых сейчас для решения практических задач. Например, перепутанные состояния стали эффективным инструментом квантовой коммуникации и микроскопии. В настоящее время корректность предсказаний не вызывает сомнений благодаря многократным экспериментальным подтверждениям, однако по-прежнему остаются актуальными некоторые вопросы интерпретации квантовых принципов.

Квантовые состояния

При построении аксиоматики квантовой механики ключевую роль играет состояние рассматриваемой системы, неразрывно связанное с процессом его приготовления и информацией об этом процессе, которая доступна наблюдателю. Квантовое состояние имеет принципиальное отличие от состояния в классической физике: оно является неотъемлемой частью описания и предсказания наблюдаемых эффектов, но недоступно для непосредственного измерения само по себе. В классической механике состояние материальной точки естественным образом определяется

ее положением и скоростью (импульсом): данные величины одновременно наблюдаемы и достаточны для предсказания последующей динамики системы. Для аналогичного квантового объекта не удается выбрать переменные, которые были бы достаточны для полного задания его состояния и одновременно наблюдаемы.

Из-за невозможности непосредственного измерения квантового состояния существует множество равноправных и эквивалентных методов описания таких систем. Например, чистое состояние материальной точки (процедура приготовления которого известна наиболее полно) может описываться волновой функцией $\Psi(\vec{r})$ в координатном или $\Psi(\vec{p})$ в импульсном представлении, а также абстрактным вектором $|\Psi\rangle$ в линейном (гильбертовом) пространстве. Смешанное состояние (известное с некоторой долей неопределенности) моды электромагнитного поля описывается как оператором плотности ρ , так и функцией Глаубера-Сударшана $P(\alpha)$.

Квантовый принцип суперпозиции

Важную особенность квантовой механики определяет принцип суперпозиции: для любых двух допустимых состояний системы линейная комбинация также является допустимым физическим состоянием. Например, квантовый бит (с двумя базисными состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$, аналог классического бита) может быть представлен в следующем виде (рис. 1А):

$$|\psi(\theta, \varphi)\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle. \quad (1)$$

Произвольное состояние, описываемое формулой (1), можно отобразить в виде точки на сфере Блоха, откладывая угол θ от оси z , а угол φ от оси x . Каждая ее точка задает некоторое допустимое состояние квантового бита. Классическому биту доступны лишь базисные состояния «0» и «1», соответствующие полюсам сферы Блоха (рис. 1А).

Наличие квантовых суперпозиций указывает на возможность интерференционных эффектов, подобных интерференции классических волн (примером может служить дифракция электронов [4]). Однако у квантовых объектов и классических волн есть ряд фундаментальных отличий. Во-первых, возможность суперпозиционных состояний и квантовой интерференции присуща любым квантовым объектам, в том числе не обладающим волновыми свойствами в классическом понимании (например, частицам). Во-вторых,

классическая суперпозиция волн соответствует их одновременному воздействию на объект (измерительный прибор) и сложению соответствующих им комплексных амплитуд, в то время как квантовое суперпозиционное состояние указывает на параллельное существование нескольких возможностей, которые могут совместно (интерферируя) влиять на динамику квантового объекта, но при измерении реализуется только одна из них.

Квантовые измерения

Поскольку наблюдаемые экспериментально величины и состояние квантовой системы не тождественны друг другу, важную роль в аксиоматике квантовой механики занимает подробное описание *квантового измерения* и его взаимосвязи с состоянием [5]. Этот процесс обусловлен двумя составляющими: измеряемой величиной и квантовым состоянием объекта. Возможные результаты (допустимые показания прибора) предопределяются самой измеряемой величиной, причем для многих (включая энергию) квантовая механика предсказывает дискретный спектр доступных значений. Квантовое состояние системы конкретизирует вероятности получения различных вариантов измерения (рис. 2). Если достоверно известен его исход, говорят, что оцениваемая величина имеет определенное значение в данном квантовом состоянии. В противном случае результат обладает *случайностью*.

Воспроизводимость идеального измерения (получение тех же показаний прибора при повторе) указывает на неизбежность изменения квантового состояния: при первом замере вероятны различные исходы, при последующих –

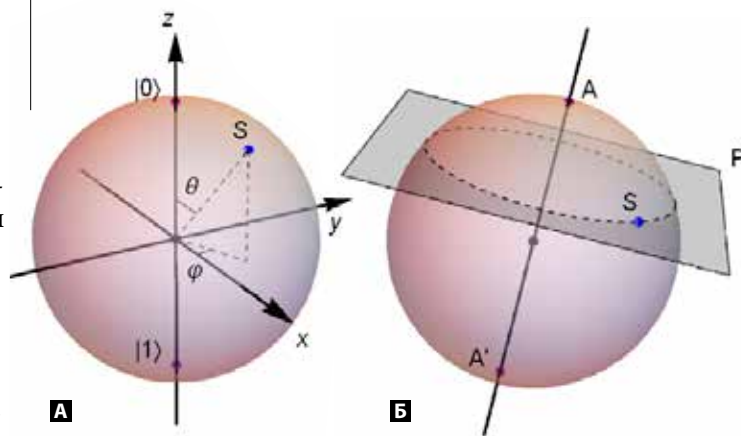


Рис. 1. Представление состояний квантового бита на сфере Блоха

результат известен с достоверностью. Таким образом, из ряда доступных возможностей, определяемых входным квантовым состоянием, выделяется и фиксируется одна, соответствующая полученному показанию прибора. Редукция состояния (коллапс волновой функции) является фундаментальной особенностью квантового измерения в копенгагенской интерпретации квантовой механики [6].

Принципиальная особенность квантового описания – существование *несовместных* наблюдаемых величин, то есть таких физических характеристик объекта, которые не могут одновременно иметь определенные значения ни в одном его квантовом состоянии. Типичный пример – пара «координата материальной точки» и «её импульс» (точнее, его проекция на соответствующую координатную ось) – величины, связанные соотношением неопределенностей Гейзенберга [6]. Логично предположить, что, проведя достаточно большое количество различных идеальных измерений, можно получить исчерпывающую информацию о системе и результирующее чистое квантовое состояние будет соответствовать нашему максимально подробному знанию. С другой стороны, согласно соотношению неопределенностей, даже в таком состоянии мы не можем с достоверностью предсказать результат некоторых измерений. Таким образом, даже максимально точное задание состояния системы не приводит к четкому знанию



Рис. 2. Возможные результаты измерения и их вероятности. Схематично представлено измерение энергии E некоторой модельной квантовой системы. Набор допустимых результатов (показаний прибора) E_1, \dots, E_6 определяется свойствами исследуемого объекта и прибора (измеряемой величины), в то время как конкретное квантовое состояние несет в себе информацию о вероятностях различных результатов. В состояниях 1 и 3 присутствует неопределенность энергии, а в состоянии 2 энергия имеет определенное значение $E = E_4$ и результат измерения известен заранее

всех ее наблюдаемых свойств. Так проявляется вероятностный характер квантовой механики.

В классической физике (например, в статистической физике или термодинамике) некоторые физические величины также могут быть определены не точно и описываться распределением вероятностей. Причина тому – неполнота нашего знания, устраняемая (в идеальном случае) путем получения дополнительной информации при измерениях. В квантовой же физике неопределенности носят фундаментальный характер. Они проявляются даже при наличии максимальной информации о системе. Попытка избавиться от неопределенности одной физической величины (например, координаты) путем ее измерения приводит к редукции состояния и увеличивает неопределенность других величин, несовместных с данной – например, импульса [5].

Проблемы и интерпретации квантовой механики

Соотношения неопределенностей, фундаментальная случайность при квантовых измерениях, необходимость разделения понятий истинного состояния и наблюдаемых характеристик квантовой системы, существование суперпозиций – не просто следствия произвольно выбранного для описания математического аппарата. Необходимость введения определенных свойств в математические модели квантовой механики была продиктована результатами экспериментов, необъяснимыми более привычным для классической физики образом. Например, уже ранние эксперименты по наблюдению интерференции электронов указывали на проявление несовместимых с классической точкой зрения свойств [7]: детектирования в виде локализованных частиц и интерференции в пространстве (рис. 3). Такое поведение квантовых объектов (получившее название корпускулярно-волнового дуализма), как и другие законы, не совпадает с привычными правилами, «здоровым смыслом». Как следствие, квантовая теория, описывающая эффекты микромира, вынуждена строиться противоречащим нашей интуиции образом и требует дополнительного философского осмысления и интерпретации ее постулатов и предсказаний [2].

Мы не в состоянии точно представить, что есть квантовые объекты на самом деле, поскольку не встречаемся с характерными для них свойствами в обычной жизни, однако можем проводить аналогии их поведения с тем, что знаем: с волнами и части-

цами. Доступная информация о квантовых объектах ограничивается результатами экспериментов, которые, в свою очередь, зависят от типов проводимых измерений – «вопросов», которые мы задаем исследуемой системе. Согласно копенгагенской интерпретации квантовой механики, именно выбор измерительной установки определяет те черты, которые квантовая система проявит при наблюдении.

Описание процесса измерения – ключевого элемента квантовой механики – также сопряжено с рядом сложностей. Если применимость квантовой теории не ограничивается объектами микромира, то и измерительный прибор, и даже наблюдатель, также должны подчиняться ее законам. Тогда процедура оценки сведется к взаимодействию нескольких квантовых систем: микроскопического объекта и макроскопических прибора и наблюдателя. Если состояние исследуемого объекта было суперпозиционным, то прибор и наблюдатель также окажутся в таком состоянии, его редукция не произойдет, и останутся доступными все присутствующие возможности. Это категорически противоречит нашему восприятию мира – ожиданию увидеть вполне определенное показание прибора (реализацию лишь одной из возможностей). Для разрешения данного противоречия в традиционной копенгагенской интерпретации постулируется, что измерение происходит скачкообразно, не подчиняется уравнениям непрерывной квантовой динамики и вызывает редукцию состояния (переход от возможного, заложенного в квантовом состоянии, к действительному – результату измерения). Более убедительное обоснование такого процесса можно дать, если принять во внимание необратимость динамики сложных макроскопических систем и процесс декогеренции, описанный ниже. Существуют и альтернативные трактовки. Например, согласно одной из интерпретаций, все возможности, заложенные в суперпозиционном состоянии наблюдателя после измерения, продолжают существовать, порождая отдельные версии Вселенной, в которых наблюдатель будет обладать различным опытом (записями о результатах эксперимента) [8].

Еще более сложным для понимания процесс измерения оказывается при рассмотрении составных квантовых систем: например, двух частиц, родившихся при распаде исходной элементарной частицы и разлетевшихся на достаточно большое расстояние. Сильные корреляции характеристик (энергий, импульсов, положений в пространстве) не позволяют описывать их квантовые состояния отдельно, требуя введения коллектив-



Рис. 3. Схема экспериментов по наблюдению интерференции электронов. Одиночные частицы – электроны – проходят через щели и регистрируются на экране. Каждая из них детектируется в некоторой вполне определенной точке, то есть проявляет привычные для частиц свойства. Однако рисунок, возникающий на экране при накоплении большого количества зарегистрированных электронов, имеет вид, характерный для интерферирующих волн. Такой эффект сохраняется, даже если электроны летят по одному (следующий вылетает не раньше, чем произошло детектирование предыдущего). Это позволяет предположить, что способность интерферировать, «чувствуя» одновременно обе щели, – не коллективный эффект (как в случае волн на поверхности водоема или звуковых волн), а свойство каждой отдельной частицы

ного нелокального (перепутанного) квантового состояния. Измерение одной частицы приведет к редукции нелокального состояния и, следовательно, дистанционно повлияет на вторую, причем мгновенно. Хотя такой процесс и не может служить для обмена полезной информацией (коммуникации) со скоростью, превышающей скорость света, мгновенное воздействие на расстоянии значительно расходится с основными принципами, заложенными А. Эйнштейном в начале XX в. Физики неоднократно пытались построить альтернативные теории, однако работа Дж. Белла и последующие эксперименты (в том числе с расстояниями между фотонами в перепутанном состоянии более 100 км) убедительно показали, что любая идея, не противоречащая реальным экспериментальным данным, обязана содержать некоторый элемент нелокальности [9].

Особенности одиночных квантовых объектов

Существенный нюанс работы с одиночными квантовыми объектами задается теоремой о запрете квантового клонирования [10, 11].

Имея в наличии одиночный квантовый объект в заранее не известном состоянии, невозможно создать его клоны – другие квантовые объекты, гарантированно находящиеся в таком же состоянии. Попытка предварительно узнать состояние объекта с помощью измерения также обречена на неудачу: одиночное наблюдение не дает полной информации, но разрушает (изменяет) данное состояние. Таким образом, квантовая информация имеет скрытый характер: для точного задания квантового состояния нужно определить значения большего числа параметров, чем можно узнать в результате измерений, проводимых над одиночным объектом. Например, чистое состояние квантового бита (1) определяется двумя параметрами θ и φ , в то время как одиночное измерение, проводимое над объектом, дает не более одного бита информации. На рис. 1Б проходящая через центр сферы Блоха прямая AA' задает идеальное измерение, проводимое над квантовым битом. Здесь возможны лишь два исхода, переводящие квантовый бит в состояния A и A' . При этом реализуется одна из двух возможностей, что соответствует получению 1 бита информации. Повторное измерение для ансамбля одинаковых квантовых объектов позволяет оценить вероятности двух исходов и определить плоскость P , в которой лежит характеризующая состояние квантового бита точка S . Чтобы найти ее положение (определить состояние квантового бита) необходимо провести повторные измерения как минимум 2 типов и получить 2 пересекающиеся плоскости.

Запрет получения полных данных о состоянии одиночного объекта в результате измерения, однако, не препятствует подробному анализу квантовых систем. Если существует ансамбль квантовых объектов в одинаковых состояниях (либо источник, позволяющий создавать их по требованию), можно провести специальную процедуру квантовой томографии – восстановления неизвестного квантового состояния по результатам нескольких типов измерения, повторяемых достаточно большое количество раз с одинаковыми объектами. Подобно классической томографии, каждый тип измерения задает некоторую «проекцию» пространства состояний квантовой системы на классическую наблюдаемую величину. Совместная математическая обработка таких проекций позволяет получить полную информацию об исходном квантовом состоянии рассматриваемых объектов.

Скрытый характер квантовой информации служит важным инструментом для защищенной коммуникации [11]. Данные (например, биты секретного ключа) можно кодировать в квантовых состояниях одиночных объектов: обычно для этого используются фотоны. Теорема о запрете квантового клонирования и редукция состояния при измерении запрещают полное и безошибочное считывание информации, закодированной в заранее не известном состоянии объекта, без ее повреждения. Вообще говоря, с данной проблемой сталкиваются как легитимный получатель сообщения, так и злоумышленник, пытающийся перехватить секретный ключ. Однако между ними есть принципиальное различие. Перехватчик, чтобы остаться незамеченным, должен корректно определять и воспроизводить квантовое состояние каждого отдельного объекта. Легитимный же получатель может отложить анализ наличия прослушки до накопления достаточной статистики (большого количества переданных битов) и сделать вывод о секретности передаваемого ключа с высокой точностью. Как следствие, методы квантовой криптографии обеспечивают защиту информации на основе фундаментальных физических принципов, гарантируя обнаружение перехвата ключей.

Квантовое измерение как инструмент для управления состоянием

Обратное воздействие квантового измерения на исследуемый объект не только усложняет считывание информации, но и может служить эффективным инструментом для управления квантовыми системами – целенаправленного изменения или сохранения их состояний. Яркий пример такого влияния измерения на динамику квантового состояния – квантовый эффект Зенона [12], названный в честь апории древнегреческого философа Зенона Элейского, гласящей, что движущаяся стрела покоится, поскольку в каждый момент времени находится в определенной точке пространства. Если для классических объектов данное утверждение было призвано указать на противоречивость философских представлений о движении, то квантовый эффект Зенона тщательно подтвержден экспериментально: частое наблюдение за квантовым состоянием может «замораживать» квантовую динамику, препятствуя его переходу в какое-либо другое.

Квантовое измерение может не только оставаться квантовой динамикой, но и направлять ее желаемым образом. В частности, существуют вероятностные методы преобразования квантовых состояний. Чтобы придать объекту целевые свойства, можно подобрать такое измерение, которое при получении одного из возможных результатов гарантированно переведет систему в требуемое состояние [13].

Открытые квантовые системы. Декогеренция

Реальные квантовые системы неизбежно взаимодействуют с окружением: макроскопическими объектами, обладающими большим числом степеней свободы. Возникают сильные корреляции (перепутанность) между состояниями квантового объекта и его окружения, а в дальнейшем – и всего мира. Хотя с теоретической точки зрения уравнения, описывающие такое взаимодействие, симметричны относительно прошлого и будущего, на практике обратить данный процесс невозможно. Чтобы наблюдать когерентные квантовые эффекты – интерференцию различных слагаемых квантовой суперпозиции – необходимо задействовать все описываемые данным состоянием квантовые объекты. После включения в коррелированное состояние окружения (и всего мира) такая интерференция становится невозможной. Таким образом, объект в результате взаимодействия с окружением теряет способность к проявлению когерентных свойств, и происходит *декогеренция* квантового состояния.

С одной стороны, именно воздействие окружения позволяет объяснить необратимое изменение состояния квантовой системы (редукцию) при измерении [2]. Взаимодействие с детектором приводит к декогеренции – превращению квантовой суперпозиции в смесь возможностей, не способных интерферировать между собой и полностью описываемых классическим распределением вероятностей. Считывание показания измерительного прибора наблюдателем лишь позволяет ему узнать, какая именно из данных возможностей реализовалась, подобно тому, как устраняется неопределенность знания о системе в классической физике. Важно отметить, что редукция состояния происходит фактически в результате взаимодействия с детектором и не требует дальнейшей регистрации его показаний мыслящим наблюдателем.

С другой стороны, декогеренция разрушает целевые суперпозиционные состояния квантовых объектов, препятствуя получению квантовых преимуществ в метрологии и обработке информации. Важно отметить, что разрушение квантовой когерентности может происходить значительно быстрее, чем изменение средней энергии квантового объекта. Например, если скорость затухания энергии оптической моды поля равна γ , суперпозиционное состояние может превратиться в смесь за время порядка $N\gamma$, где N – среднее число фотонов в данном состоянии. Именно этим эффектом обусловлены сложность работы с суперпозиционными квантовыми состояниями многочастичных систем и создание практических устройств, использующих квантовую интерференцию (например, квантовых компьютеров), не ранее, чем через 100 лет после появления квантовой механики.

Интересно отметить, что взаимодействие квантовой системы с макроскопическим окружением может не только разрушать ее квантовое состояние, но и обеспечивать полезные преобразования. Создавая резервуары (системы с большим числом степеней свободы) специальным образом, можно приводить квантовые объекты в целевые состояния, обеспечивая, например, уменьшение флуктуаций числа фотонов (дробовой шум) [14]. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бом Д. Квантовая теория / Д. Бом. – М., 1965.
2. Гриббин Дж. Шесть невозможностей: загадки квантового мира / Дж. Гриббин. – М., 2021.
3. Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике / Э. Шредингер. – М., 1976.
4. R. Bach. Controlled double-slit electron diffraction / R. Bach [et al.] // *New Journal of Physics*. 2013. Т. 15. №3. С. 033018.
5. Фон Нейман И. Математические основы квантовой механики / И. фон Нейман. – М., 1964.
6. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое / В. Гейзенберг. – М., 1989.
7. C. Davisson, L. H. Germer. Diffraction of electrons by a crystal of nickel / C. Davisson, L. H. Germer // *Physical review*. 1927. Т. 30. №6. С. 705.
8. Д. Дойч. Структура реальности. Наука параллельных вселенных / Д. Дойч. – М., 2014.
9. G. Brassard. Profile of John Clauser, Alain Aspect and Anton Zeilinger: 2022 Nobel laureates in Physics / G. Brassard // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023. Т. 120. №23. С. 2304809120.
10. С.Я. Килин. Квантовая информация / С.Я. Килин // *Успехи физических наук*. 1999. Т. 169. №5. С. 507–527.
11. Бауместер Д. Физика квантовой информации / Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. – М., 2002.
12. Л.А. Халфин. Квантовый эффект Зенона / Л.А. Халфин // *Успехи физических наук*. 1990. Т. 160, вып. 10. С. 185–188.
13. S. Ya. Kilin, A. B. Mikhalychev. Optical qudit-type entanglement creation at long distances by means of small cross-Kerr nonlinearities / S. Ya. Kilin, A. B. Mikhalychev // *Physical Review A*. 2011. Т. 83. №5. С. 052303.
14. M. Thornton. Coherent diffusive photon gun for generating nonclassical states / M. Thornton, A. Sakovich, A. Mikhalychev [et al.] // *Physical Review Applied*. 2019. Т. 12. №6. С. 064051.