

Можно ли в принципе предсказать исход каждого измерения?

50. Интуитивно ясно, что об элементах чистого ансамбля известно больше, нежели об элементах смешанного ансамбля. Рассмотрим наш пример источника света с двумя лампами. Очевидно, что, когда включены обе лампы, нам меньше известно о свойствах индивидуальных фотонов, чем при работе одной лампы. В частности, мы меньше знаем о «цвете» фотонов.

Чтобы приготовить чистый ансамбль, следует осуществить полный контроль над стадией приготовления: мы должны подавить все источники статистических флуктуаций, которые в принципе могут быть подавлены.

Теперь ясно, что, предпринимая измерения, желательно приготовить ансамбль таким образом, чтобы он был настолько чист, насколько это технически возможно. Поступая таким образом, мы уменьшаем статистический разброс наших данных, что означает возрастание точности результата. Далее следует сказать, что теоретическая интерпретация результатов опыта проще и яснее для чистого ансамбля, чем для смешанного. В чистом ансамбле можно изучать поведение системы в наилучших возможных условиях, невозмущенных «шумами», которые *можно избежать*.

51. Теперь возникает вопрос фундаментальной важности. Можно ли утверждать, что чистые состояния характеризуются полным отсутствием статистического разброса всех физических переменных? Иными словами: полностью ли предсказуем исход каждого измерения для чистых состояний?

Следует понять, что этот вопрос касается основных свойств нашего мира, и ответ может быть дан лишь на базе *экспериментального* исследования. Чистая логика вряд ли поможет нам ответить на этот вопрос.

Классические теории основаны на предположении, что на поставленный вопрос следует *положительный* ответ. Квантовая теория отвечает на этот вопрос *отрицательно*. (Чтобы избежать недоразумений, заметим, что квантовая механика — это одна из возможных теорий, которая отвечает на наш вопрос отрицательно.) Принимая в качестве теории квантовую механику, мы вводим непредсказуемость в наше описание природы. Эту непредсказуемость следует понимать в том смысле, что, как бы мы ни приготавливали чистый ансамбль, всегда останутся измерения, исход которых в каждом конкретном случае непредсказуем. (Характер этих непредсказуемых измерений зависит от природы ансамбля.) Все это не значит, что квантовая механика предсказывает «хаос и неопределенность». Эта теория в состоянии делать точные количественные утверждения о *вероятностях* или о *средних значениях* физических переменных.

52. Для заданного нами вопроса характерно, что его нельзя окончательно решить с помощью определенного ряда опытов. Столкнувшись с явлением, для которого мы вынуждены дать отрицатель-

ный ответ, всегда можно попытаться спасти положение, сказав, что, если бы измерения были выполнены «в лучших условиях», выводы были бы иными. Другими словами: всегда можно сказать, что непредсказуемость возникает потому, что эксперимент выполнен не самым лучшим образом. Такую аргументацию трудно отвергнуть в абсолютном смысле. С другой стороны, уместно спросить защитника детерминистической теории в классическом смысле: как конкретно должны быть выполнены измерения, чтобы индетерминистический характер квантовой механики исчез?

Отрицательный ответ основан на двух типах доказательств. Во-первых, это подробный анализ большого разнообразия опытов, в которых учтены наблюдаемые свойства частиц. Во-вторых, это предсказания, основанные на квантовомеханической теории, краеугольным камнем которой является *отрицательный* ответ. Эти предсказания оказываются в прекрасном согласии со всеми опытными фактами; *отрицательный* ответ на поставленный вопрос никогда не приводит к противоречию с опытом.

53. В гл. 4 и 5 были приведены весьма убедительные доводы в пользу *отрицательного* ответа. Реальные частицы распространяются подобно волнам в пространстве. Эти волны разделяются полупосеребренным зеркалом, двойной щелью и дифрагируют на препятствиях. С другой стороны, наблюдая за частицами с помощью фотоэлемента или другого детектора частиц, мы никогда не обнаружим «доли фотона» или «доли электрона». Для согласованного описания всех этих явлений мы должны перейти к вероятностной интерпретации *интенсивности* волны: величины, пропорциональные квадрату абсолютного значения волновой функции, соответствуют *вероятностям*. Мы можем знать только вероятность срабатывания счетчика, но никогда не сможем сделать такой счетчик, относительно реакции которого в каждом данном опыте мы были бы полностью уверены.

Рассмотрим, например, опыт с двумя щелями. Если он должен быть выполнен с определенным импульсом падающих частиц, то следует осуществить такую схему опыта, чтобы импульс был определен как можно точнее. Когда такой пучок падает на экран с двумя щелями, мы наблюдаем характерную дифракционную картину. Эта картина возникает, лишь когда обе щели открыты, т. е. если частица проходит через обе щели. Если мы, однако, попытаемся регистрировать частицу счетчиком, помещенным за одной из щелей, то никогда не обнаружим половины частицы, а всегда частицу целиком. В каждом одиночном опыте счетчик может либо сработать, либо не сработать, и невозможно знать заранее, что произойдет. Мы можем знать лишь вероятность срабатывания счетчика. Читатель спросит: может быть, это происходит потому, что ансамбль не является чистым? Но что он может предложить, чтобы сделать ансамбль более чистым?

54. Суть проблемы в том, можно ли найти способ более детального описания частицы, чем это делает волновая теория? Если волновое описание верно и, кроме того, частица обладает свойством

неделимости, так что нельзя получить «дробную частицу», то есть лишь один выход — интерпретировать интенсивность как вероятность. Вспомним наши рассуждения о принципе неопределенностей в начале этой главы. Если *импульс* частицы точно известен, ее следует описывать как распространяющуюся в пространстве волну, но в этом случае мы ничего не знаем о ее *положении*. Небольшой статистический разброс в измерениях импульса вызывает большой разброс измерений положения, и, пока мы принимаем волновое описание и интерпретируем интенсивность как вероятность, у нас нет возможности отказаться от принципа неопределенностей. С другой стороны, нет никаких экспериментальных данных, которые позволили бы предположить, что частицу можно описать более подробно, чем это позволяет волновое описание: нет абсолютно никаких указаний на какие-то «скрытые переменные».

Все сказанное приводит к следующему основному принципу квантовой механики: чистые состояния частицы описываются волнами. *Ансамбль состояний частицы является чистым тогда и только тогда, если каждый элемент ансамбля описывается одной и той же волновой функцией.* Если можно задать волновую функцию, которая описывает все частицы ансамбля, то имеется максимально возможный контроль над источником. Ничто не может быть более чистым, чем определенная волна.

55. Интересно сравнить некоторые аспекты классического мира фантазии и реального мира. Понятия статистического ансамбля, статистических смешанных и чистых состояний не чужды классической физике. Действительно, идея статистического ансамбля возникла в классической статистической физике задолго до открытия квантовой механики. Хорошая часть наших рассуждений о процессе измерения остается применимой в рамках классического описания. И здесь чистое состояние возникает в том случае, когда мы имеем полный контроль над стадией приготовления системы, тогда как статистическая смесь состояний проявляется тогда, когда наш контроль значительно менее совершенен. Решающее различие между классическим и квантовомеханическим описаниями заключается в природе чистого состояния. В классической теории свойства чистого состояния таковы, что исход любого одиночного измерения *точно* предсказуем. Если данный счетчик срабатывает в данном одиночном опыте, то он хорошо сработает и в каждом последующем. Каждый последующий опыт повторяет то же самое, что было в предыдущем. Чистое состояние не дает статистического разброса *любой* физической переменной.

Задолго до появления квантовой механики физики понимали, что происходящее в микроскопическом мире *практически* невозможно предсказать с неограниченной точностью. Тепловые шумы и многие другие всегда существующие «возмущения», над которыми у нас нет контроля в макроскопической ситуации, создают неопределенность в значениях физических переменных, которая полностью маскирует характерную для квантовой механики неопределенность. Классическая физика считала очевидным, что в чистых

состояниях у физических переменных нет статистического разброса. Критический анализ микроскопических ситуаций обнаруживает, что эта вера была заблуждением.

56. Установление статистического характера всех предсказаний, даже в случае чистого ансамбля, было существенным шагом в развитии физической теории. Возвращаясь к ранней истории квантовой физики, мы замечаем, что идея о вероятностном описании физических явлений была для физиков очень трудной и непривычной. Двойная природа света, который обнаружил свойства волны и частицы, казалась весьма смущающим открытием. Оно получило название «дуализма» волн и частиц. В гл. 4 мы показали, что этот дуализм может быть ясно понят, но на ранней стадии квантовой физики ситуация была иной. Никому не приходило в голову интерпретировать квадрат амплитуды волны в понятиях вероятностей, а без этой идеи, которая представляет собой радикальный отход от классической физики, «дуализм» света не может быть понят.

Существование *принципиального* предела для нашей возможности предсказать будущие явления было воспринято многими, особенно нефизиками, настроенными философски, как весьма глубокая и революционная идея. По этому поводу неизбежно было написано достаточно нелепостей (как и по поводу соотношения неопределенностей), авторы которых делали далеко идущие выводы о влиянии квантовой механики на человеческие дела вообще.

Нельзя отрицать, что вопрос о предсказуемости и непредсказуемости в принципе может вызывать большой интерес у философов. Следует, однако, заметить, что в настоящее время физики уделяют этой стороне дела очень мало внимания. Не будет ошибкой считать, что большинство из них возвращается к теории измерений в квантовой механике лишь при необходимости прочесть вводный курс на эту тему.

Поляризованный и неполяризованный свет

57. Поляризация света является прекрасной иллюстрацией различия между чистым состоянием и статистической смесью состояний в квантовой механике. Рассмотрим опыт, показанный на рис. 57А. Почти монохроматические фотоны (с частотой ω) проходят через поляризующий фильтр F_S и расположенную за ним щель в экране S . Таким образом, приготовление статистического ансамбля происходит слева от S . Фотоны регистрируются фотоэлементом P , перед которым помещен поляризующий фильтр F_P . Фотоэлемент совместно с этим фильтром можно считать измерительным прибором, измеряющим счетную переменную D .

Можно разработать поляризующие фильтры весьма высокого совершенства, пропускающие волны с определенным состоянием поляризации и полностью поглощающие волны с другим состоянием поляризации. Предположим, что фильтры F_S и F_P являются такими совершенными фильтрами, свойства которых мы можем подобрать по желанию.