

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

М.Сыркин

Адрес электронной почты: msyrkin@hotmail.com

Настоящая версия: 10 февраля 2025

АННОТАЦИЯ

Обсуждаются основы квантовой теории и сопутствующие тонкости, игнорируемые, как правило, частично или целиком в современной литературе, что способствует возникновению обескураживающих парадоксов. Основные темы: общая схема квантовой механики как "диффузии" в поле квантового вакуума; суперпозиция / интерференция амплитуд вероятностей, а не частиц; Статистическая в противовес Копенгагенской интерпретации квантовой механики; квантовые измерения как отображение амплитуд в вероятности; ансамблево-волновое соответствие вместо корпускулярно-волнового дуализма; квантовая запутанность как элементарное следствие законов сохранения, и "таинственное действие на расстоянии" как маскировка простых относительных вероятностей; квантовая теория поля как возбуждение квантового вакуума и идеи большого квантового канонического ансамбля.

Ключевые слова: Классическая механика, квантовая механика, волновые функции, принцип суперпозиции, амплитуды вероятностей, условные вероятности, корпускулярно-волновой дуализм, ансамблево-волновое соответствие, квантовая теория поля, кванты поля

"Я должен определённо высказаться в пользу наиболее успешной физической теории нашего времени, именно, статистической квантовой теории"

А. Эйнштейн

Введение. Первые сто лет с квантовой механикой.

Почти ровно 100 лет тому, Луи де Бройль провидчески развернул вспять логику, впервые проторённую Планком и Эйнштейном для безмассовых квантов электромагнитных волн - фотонов, постулировав некую "волнообразную структуру" для частиц с ненулевой массой покоя. Вскоре, Геттингенская группа (Борн, Гейзенберг и Йордан) и Шредингер придумали матричную и волновую механики соответственно, быстро слившихся в то, что именуется теперь квантовой механикой, и которая начала свой триумфальный путь в науку и технологии XX века.

Сразу же после гипотезы де Бройля возник т.н. корпускулярно – волновой дуализм: одна из самых противоречивых концепций нашего времени, ставшая предметом бесчисленных публикаций и таинственным символом квантовой механики.

Интуитивный дискомфорт от концепции дуализма ясно проистекает из несоответствия локальной природы корпускул пространственной неограниченности волн. Не в последнюю очередь именно это и стало причиной того, что Квантовая Механика приобрела репутацию наиболее противоречащей здравому смыслу и запутанной концепции современности. Её начальная формулировка, с небольшими вариациями, гласила, что, в зависимости от обстоятельств, микрочастицы могут проявлять либо корпускулярные, либо волновые свойства. И если дифракционные проявления (в основном, обнаружение следов частиц на экране в области геометрической тени) ещё не ведут к немедленным противоречиям, то уже интерференцию пространственно локализованных объектов / корпускул совершенно невозможно себе представить. Под давлением таких очевидных трудностей формулировка дуализма начала эволюционировать, например, к такой: квантовые частицы не являются ни волнами, ни классическими частицами, они есть нечто другое. Несомненно, это уже определённо лучше, чем просто наивный дуализм, но, по-прежнему, основано исключительно на отрицании, и не вносит какого-либо положительного содержания.

Другим классическим парадоксом стал пресловутый "коллапс" волновой функции, часто приписываемый (хотя и не вполне справедливо) репутации великого Н. Бора и его Копенгагенской школы. И хотя "Копенгагенская интерпретация" никогда не была чётко сформулирована как "официальная" концепция, влияние её было настолько глубоким, что даже в 90х годах XX столетия вполне уважаемые журналы публиковали работы известных учёных, моделировавшие статистику "коллапсов" волновых функций (например, по типу диффузии Фоккера-Планка).

В сообществе квантовых парадоксов по-прежнему популярен Кот Шредингера: по иронии судьбы, не кто иной, как сам отец-основатель Шредингер, упомянул этот парадокс в одной из своих основополагающих статей как "весьма странную возможность".

Хронологически, последним пополнением впечатляющей галереи квантовых парадоксов стала т.н. "квантовая нелокальность", непосредственно связанная с современными исследованиями в области квантовых компьютеров. Этому заблуждению в значительной мере способствовала эпическая - но давно объяснённая - статья Эйнштейна, Подольского и Розена от 1936г (ЭПР) и, косвенно, основательные работы Дж. Белла в поисках скрытых параметров квантовой теории. Как бы то ни было, но этот парадокс по-прежнему часто встречается в литературе, обескураживая даже опытных специалистов, не говоря уже о широкой публике.

И хотя все упомянутые противоречия были давно и исчерпывающе разъяснены, история квантовых парадоксов весьма поучительна в том, насколько могут быть устойчивыми стереотипы и ошибки мышления, если им не уделять должного и своевременного внимания.

Можно понять сременных студентов: объём публикаций по интерпретации квантовой механики и сопутствующим парадоксам напроць исключает возможность хотя бы их просмотреть, не говоря уже о том, чтобы переварить и понять.

В связи с этим, квантовые парадоксы не следует воспринимать легкомысленно и недооценивать их потенциальное влияние, в особенности, на студентов и неопытных специалистов (недавних студентов): они могут создавать существенные концептуальные препятствия и затруднять эффективную самостоятельную работу. Важны поэтому сжатые обзоры, развивающие, помимо прочего, интуитивную логику и качественные методы в этой области.

Список литературы дан в алфавитном порядке для удобства цитирования. В интересах возможно более широкой аудитории, настоящий текст включает некоторые значительно переработанные и существенно сокращённые материалы из (Syrkin, [viXra:2410.0187](https://arxiv.org/abs/2410.0187)), где можно найти дальнейшие технические детали.

1. Статистическая формулировка квантовой механики.

“Таким образом. если спрашивается об основном элементе квантовой механики, то теперь я склонен ответить, что это - не некоммутативная алгебра. Это существование амплитуд вероятностей, лежащих в основе всех атомных процессов”.
П. Дирак

Наиболее согласованный логически и простой технически путь к Квантовой Механике, подчёркивающий её статистическую природу, вытекает из классической диффузии, аналитически продолженной в область мнимого времени. Действительно, как нетрудно убедиться, замена в классическом уравнении диффузии $t \rightarrow it$ немедленно воспроизводит уравнение Шредингера (с квантовым коэффициентом диффузии $D_Q = \hbar/(2m)$, $\hbar$ – приведённая постоянная Планка, m – масса микрочастицы), и все количественные соотношения для волновой функции. При этом вещественная вероятность классической диффузии превращается в комплекснозначную амплитуду вероятности диффузии квантовой, а волновая функция, тем самым, выступает как комплексно-значная функция распределения этих квантовых амплитуд Фейнмана (дальнейшие детали могут быть найдены в Roepstorf, 1994, и Nagasawa, 2000). Это краткое введение полностью согласуется с гениальной гипотезой Борна о вероятностной интерпретации волновой функции.

В связи с этим: концептуально, квантовая диффузия - случайное поведение квантовых объектов, взятых по отдельности - возникает под действием квантового вакуума, который, согласно квантовой теории поля (см. ниже раздел 5), выступает как огромный термостат с бесконечной энергией. Квантовый вакуум действует на все элементы квантового ансамбля / пучка частиц (выглядающего в этом контексте как большой квантовый канонический ансамбль) единообразно, формируя, таким образом, "когерентную" - и полностью детерминированную! - волновую функцию распределения амплитуд, вытекающую из детерминистского-же уравнения Шредингера. Именно эта функция и служит источником волнообразного распределения интенсивности, делая ненужным наивный корпускулярно-волновой дуализм (см. ниже, раздел 4).

Далее, согласно вышесказанному, волна де Бройля есть не что иное, как волновая функция пучка свободных частиц с импульсом $\mathbf{p}$ в координатном представлении. Она идентична фейнмановской амплитуде (Фейнман, Хиббс, 1965) $\exp[(i/\hbar)S(a,b)] \sim \exp(i\mathbf{x}/\lambda)$, где $S(a,b)$ – переменная классического действия, $\mathbf{x} = \mathbf{a} - \mathbf{b}$, и приведённая де Бройлева длина волны $\lambda = \hbar/p$.

В этом контексте де Бройлева длина λ есть шкала осцилляций амплитуд вероятностей, т.е. область, в которой волновые аспекты квантовых амплитуд вероятностей оказываются существенными. Сюда относятся классические примеры из

волновой оптики: осцилляции интенсивности на краю непроводящей полуплоскости, диффракция на одной и двух щелях, и т.д. (более подробно - в разделе 2)

Переходим теперь к Принципу Суперпозиции.

2. Принцип Суперпозиции.

*"То, что интерферирует в квантовой механике
- это не частицы. Это амплитуды вероятностей
определённых событий"*

Р. Глаубер

Из всех линейных уравнений математической физики, удовлетворяющих принципу суперпозиции, уравнение Шредингера было, и по сей день служит, наиболее обильным источником бесчисленных и мистических чудес, вытекающих из ошибочных интерпретаций. Достаточно вспомнить ответ поисковика Google на запрос "Квантовая Суперпозиция": "Квантовая суперпозиция есть способность квантовых систем находиться одновременно в различных состояниях, пока не произведено измерение". Здесь мы обсудим только одну, наиболее типичную формулировку, а именно: В состоянии суперпозиции частица "одновременно" находится во всех участвующих в суперпозиции состояниях (по поводу других проблем мы отсылаем читателя к классическим работам Д.И. Блохинцева, 1976, 1987 и 1988).

На самом же деле, 1) согласно принципу суперпозиции, интерферируют не сами частицы, а амплитуды вероятностей, участвующих в суперпозиции состояний, и 2) эта интерференция совершенно не означает какую-либо "одновременность", а вытекает просто из перекрытия амплитуд вероятностей.

Прежде всего, мы хотели бы напомнить читателю об эпохальном 2-х щелевом эксперименте Тономуры (Tonomura *et al.*, 1989) (Рис 2.1) по электронной дифракции, который отчётливо продемонстрировал, что интерференционная структура возникает в результате накопления отпечатков на фотопластинке только при длительных экспозициях, в то время как при коротких экспозициях наблюдаются совершенно бессистемные случайные отпечатки.

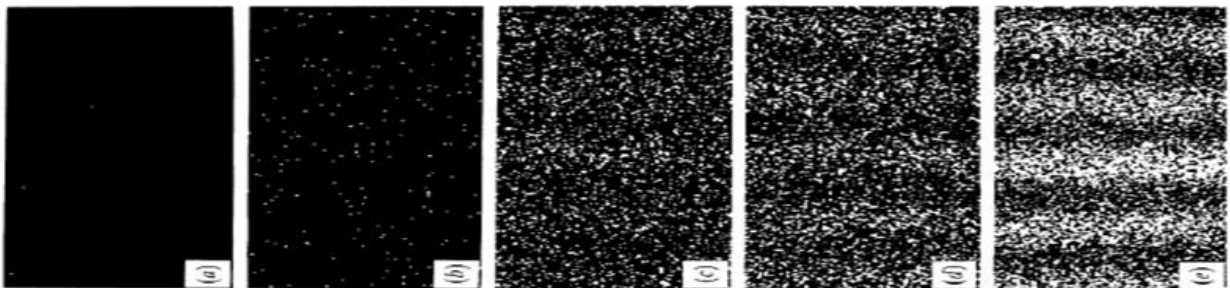


Рис. 2.1 Результирующие картины, возникшие от "само-интерференции" электронов, пролетающих по одному через двух-щелевой интерферометр.

Количество электронов: а) 10, b) 100, c) 3000, d) 20 000, e) 70 000 (согласно Tonomura *et al* (1989)).

Поскольку результаты Тономуры с соавторами для электронов были также известны для фотонов уже со времён экспериментов Тэйлора (Taylor, 1904), то накопительная природа дифракционных картин становится очевидной как для массивных, так и

безмассовых частиц, и даёт непосредственное подтверждение интерференции амплитуд вероятностей, а не интерференции самих частиц.

Для более глубокого понимания вопроса, рассмотрим классический аналог эксперимента Тономуры, а именно: вертикальную классическую диффузию от двух хорошо разъединённых источников одинаковых частиц, в присутствии горизонтального ветра, сносящего частицы направо (Рис 2.2).

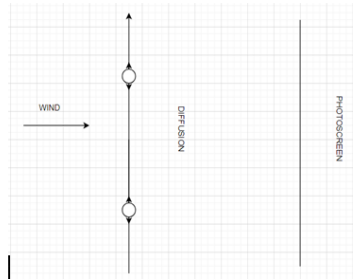


Рис. 2.2 Двух-щелевой опыт: классическая аналогия

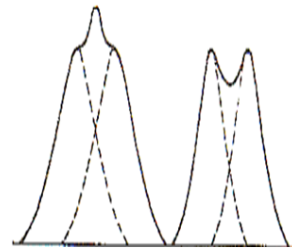


Рис. 2.3 (а,б) Плотность на экране: а) близкие источники, б) удалённые источники

В начале наблюдений, т.е. при коротких экспозициях, пятнышки на экране располагаются совершенно случайно / бессистемно - совершенно идентично результатам квантового эксперимента Тономуры. Но по мере увеличения времени наблюдения, распределение пятнышек будет всё более и более демонстрировать наложение двух распределений (Рис. 2.3, а и б). Единственное отличие квантовых результатов Тономуры будет в ясной осцилляционной интерференции в квантовом случае (напомним, в квантовом случае аддитивны комплексные амплитуды вероятностей, в то время как в классическом - сами вещественные вероятности!). Мы, тем самым, приходим к выводу, что именно короткие экспозиции помогают выявить истинный источник интерференции, а именно: перепутывание случайных способов достижения конечного состояния, не позволяющее отследить предысторию путешествия частиц (если только не приняты специальные меры, возможные в классическом случае - мы не имеем возможности здесь вдаваться в эти подробности). Подчеркнём, что обсуждаемый эффект имеет место как в классическом, так и квантовом случае, с той лишь разницей, что в квантовом случае суммарная интенсивность осциллирует из-за наложения комплексных, а не вещественных амплитуд вероятностей (т.е. $|a + b|^2$ вместо $|a|^2 + |b|^2$).

Перефразируя: квантовая суперпозиция есть просто воплощение перекрытия амплитуд вероятностей, т.е. тривиальное наложение распределений (гладких - в классическом случае), сопровождаемое осцилляциями, вытекающими из комплексной природы налагающихся амплитуд. Это ясно демонстрирует, что "волны" интенсивности есть не что иное, как эффект накопления элементарных событий в ансамблях, которые распределены волнообразным образом. И конечно, как и подсказывает здравый смысл, не существует какой-либо "интерференции" пространственно локализованных частиц. Это окончательно закрывает парадокс принципа суперпозиции, как и любые чудеса, возникающие в связи с пресловутой "одновременностью" в принципе суперпозиции. Это же является причиной, по которой квантовые измерения нуждаются в максимально возможном - совместимым с экспериментальным оборудованием - разделении пучков, участвующих в суперпозиции, а именно:

подавлении интерференции в измеряемом пучке (более подробно об этом - см. ниже, в разделе 3).

Далее, хорошо известные из классической (световой) оптики дифракционные картины отчётливо демонстрируют результат суперпозиции квантовых амплитуд в пределе длительных экспозиций в виде волнообразных структур, а именно: а) дифракционную картину и осцилляции интенсивности на краю полубесконечного непрозрачного экрана (Зоммерфельд, 1954), б) дифракцию на щели (кстати, любая щель есть комбинация краёв двух полуплоскостей, и, в зависимости от расстояния между краями - ширина щели! - по сравнению с длиной волны де Бройля, наблюдается плавный переход распределения интенсивности от геометрической к волновой оптике), в) легендарную дифракционную картину от 2х щелей, ставшую — с лёгкой руки Фейнмана — символом "непостижимости квантовой механики", и т.д.

Эти фундаментальные примеры иллюстрируют качественные особенности дифракционных картин и их изменение в зависимости от соотношения де бройлевой длины с другими характерными параметрами задачи.

В частности, при дифракции на полуплоскости распределение интенсивности (Рис 2.4) зависит только от одного параметра - де бройлевой длины.

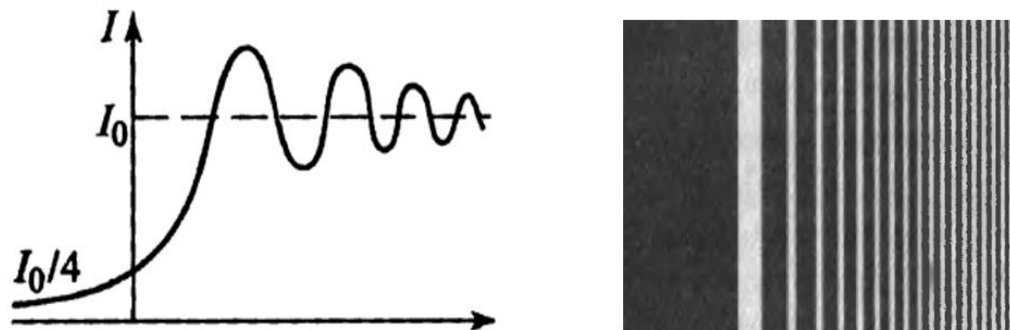


Рис. 2.4 Дифракция на полуплоскости: распределение интенсивности и фотография

При дифракции на двух полуплоскостях (Рис 2.5, щель шириной D) распределение интенсивности зависит уже от двух параметров: де бройлевой длины и ширины щели D .

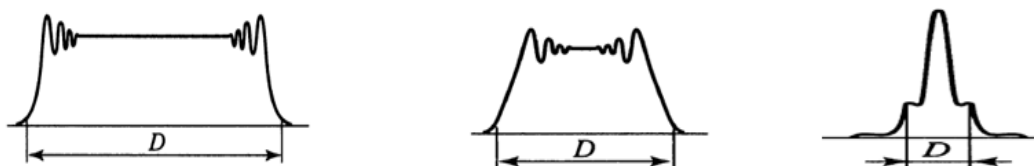


Рис. 2.5 Дифракция на щели: а) $D \gg \lambda$, б) $D > \lambda$, в) $D < \lambda$

При дифракции на двух идентичных щелях (Рис 2.6) дифракционная картина определяется де бройлевой длиной и двумя размерами: шириной щелей и расстоянием между щелями.

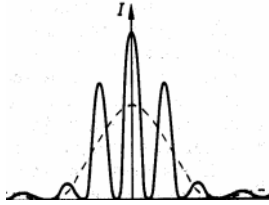


Рис. 2.6 Двух-щелевая дифракция (сплошная линия), пунтирная - картина от одной щели

Во всех этих случаях дифракционная картина происходит от интерференции падающей плоской волны $\exp(ikx)$ с волной, рассеянной препятствием. Однако - и это архиважно! - при достаточно коротких экспозициях (насколько коротких - зависит от интенсивности) на экране наблюдаются только случайные точки, без какого-либо намёка на систематическое распределение. Интерференционные картины на Рис. 2.4-2.6 становятся видны только при достаточно длительных наблюдениях / экспозициях. Это ясно показывает, что волны (т.е. волновые функции) в квантовой механике есть не что иное, как ансамбли случайных элементарных событий, распределение которых промодулировано волновыми профилями, и недвусмысленно свидетельствует в пользу Статистической интерпретации квантовой механики, и указывает на волновые функции, как на ансамблевую меру, а не на меру, связанную с индивидуальной частицей (фон Нейман, 1964; Блохинцев, 1963 и 1976; Ballentine, 1970). И далее, в контексте статистической гипотезы Борна, амплитуды вероятностей (т.е. волновые функции) перебрасывают "мостик" от волны к отдельной частице, а именно: амплитуда, будучи типичным атрибутом волны, даёт амплитуду вероятности обнаружить отдельную частицу, принадлежащую ансамблю подобных частиц.

В заключение, остановимся на некоторых деталях в связи с переходом от классической механики к квантовой. Технически, такой переход описывается т.н. квазиклассическим приближением, т.е. когда механика уже не совсем классическая, но ещё и не вполне квантовая. При этом, с одной стороны, волновые функции выражаются через переменную классического действия (Фейнман, Хибс, 1965), а с другой - классические траектории (а с ними - и классические частицы) "разпухают / размазываются", заполняя трубки / каналы, центрированные вокруг классических путей. Ширина этих трубок - порядка де Бройлевой длины λ (Мигдал, 1975). Таким образом, в этом приближении классические частицы / корпускулы, в известной мере делокализируются и могут, грубо говоря, интерферировать подобно амплитудам вероятностей. Такой подход приближённо сочетает классические и квантовые свойства в одном квазиклассическом объекте, но при неосторожном обращении может приводить к парадоксальным утверждениям, типа, "при 2х щелевой дифракции частица проходит одновременно через обе щели, и затем интерферирует сама с собой", или "полупрозрачное зеркало делит частицу на две части, которые затем, после прохождения плеч интерферометра, интерферируют друг с другом". И в том же духе, любые фразы, вроде "фотоны могут / не могут интерферировать друг с другом или даже сами с собой" или "одно- или двух- фотонная интерференция" есть не более, чем рудимент классического мышления, пытающийся перенести классические образы и логику в квантовую область, и, не имеющий, строго говоря, никакого смысла в квантовой теории. И хотя такой язык может создавать, до поры, до времени, иллюзию понимания, следует помнить об его ограниченной применимости.

В этой связи уместно вспомнить знаменитое утверждение великого П. Дирака: "фотон интерферирует только с самим собой, и больше ни с чем" (Дирак, 1958). Это - типичный псевдо-классический язык, применимый только в рамках квазиклассики, но никоим образом за её пределами.

3. Основы квантовых измерений.

"Разделяя пространственно пучки с различными импульсами p , дифракционная решётка подавляет интерференцию между ними..."

Д.И. Блохинцев

Принцип суперпозиции недвусмысленно подсказывает стратегию квантовых измерений: нужно подавить интерференцию в измеряемом ансамбле / пучке, а с ним и перекрёстные члены в интенсивности рассеянного пучка. Сделать это можно либо непосредственно (прямое (статическое) измерение), либо косвенно (динамическое измерение). Для сохранения простоты изложения, ниже мы лишь кратко обрисуем оба подхода, отсылая за всеми техническими деталями к классическим работам Д.И. Блохинцева (Блохинцев, 1987, 1988) и Лондона и Бауера (London, Bauer, 1939, 1982)

Прямые (статические) измерения. В этом случае измеряемый пучок пропускают через дифракционную решётку (например, измерение импульса), или, через магнитное поле (например, измерение спина) – (см. Рис. 3.1)

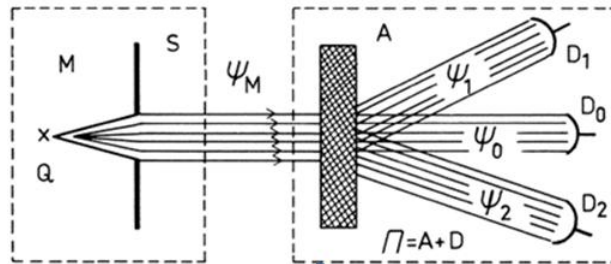


Рис. 3.1 Принципиальная схема прямых измерений

В результате пучок расщепляется на несколько слабо перекрывающихся "рукавов", в значительной степени подавляя интерференцию в интенсивности, что и даёт возможность идентифицировать показания детекторов с состояниями в исходном ансамбле. При этом, чем сильнее расхожимость рукавов, тем меньше интерференция в выходной интенсивности. Это, фактически, и определяет точность измерения.

Косвенные (динамические) измерения. Этот подход применяют, если прямые измерения затруднительны. Измеряемый пучок (система I) рассеивают на классической мишени (система II). В результате, ввиду классичности мишени, полная волновая функция (система (I + II)) распадается на асимптотически (по времени столкновения) неинтерферирующие слагаемые, что и подавляет перекрёстные члены в интенсивности. При этом, классическая мишень служит как бы "стрелкой" измерительного прибора.

Оба метода богаты физической интуицией и чрезвычайно поучительны методически: мы горячо рекомендуем их читателю.

4. Волновые проявления в микромире: "коллапс" волновой функции, корпускулярно-волновой дуализм и другие головоломки.

*"Квантованная система есть, в то же время,
квантованный колеблющийся континуум,
и квантованный **коллектив** частиц"*
Дж. Макки

Настоящий раздел посвящён "коллапсу" волновой функции, и, более общо, корпускулярно-волновому дуализму. У обоих парадоксов общая причина, а именно: приписывание волнового характера не ансамблю частиц в целом, а только одной, отдельно взятой частице. Ниже, для краткости, мы будем именовать такую интерпретацию "примитивной". Заметим, что ввиду близости идей, материалы настоящего, и следующего раздела, 5, в значительной мере перекрываются, что оказывается полезным также и методически.

Начнём с "коллапса" волновой функции.

"Коллапс" волновой функции.

Поначалу, волна де Бройля рассматривалась как вполне материальный процесс, да к тому же относящийся к отдельно взятой частице, т.е. имеем примитивную интерпретацию. (Впоследствии, эта наивная идея оказала значительное влияние на "Копенгагенскую интерпретацию", что стоило последней больших трудностей - см. ниже).

Однако, после того, как М. Борн выдвинул Статистический постулат, волновая функция превратилась в странный гибрид 1) материальной волны, связанной с индивидуальной частицей, и 2) волны, обладающей вероятностными свойствами. Нечего и говорить, что комбинация 1) и 2) создала много затруднений для Копенгагенской интерпретации. В частности, это породило несколько парадоксов, наиболее известным из которых стал "коллапс" волновой функции. Действительно, если волновая функция рассматривается как динамическая переменная одной частицы, то тогда "коллапс" представляет очевидную проблему и парадокс для Копенгагенской интерпретации. Однако, с течением времени, стало понятно (что всегда и подчёркивалось М. Борном), что волновая функция не есть материальная волна, а скорее волна вероятности, точнее - волна амплитуд вероятностей¹. Но вероятностная интерпретация предполагает множество реализаций, т.е. ансамбль, и именно таким образом появилось понятие ансамбля. (В этом и суть концепции "квантового ансамбля", которую Д.И. Блохинцев неустанно отстаивал). Другими словами, таинственный "коллапс" превращается в тривиальное изменение от априорных к постериорным величинам (т.е. очевидное различие вероятности до и после измерения), как и полагается в элементарной теории вероятности. Это и

¹ В этом контексте неудивительно, что Р. Фейнман сделал амплитуду вероятности (комплексно-значную функцию, квадрат модуля которой даёт "нормальную" классическую вероятность) центральным понятием своей формулировки квантовой механики. Чрезвычайно интересное также то, что на фейнмановском языке амплитуд вероятностей, сумма по траекториям есть не что иное, как Центральная Предельная Теорема (ЦПТ) для сумм комплексных случайных переменных.

закрывает парадокс "коллапса". Нечего и говорить, что в экспериментальном контексте постепенное "накопление" интерференционной картины для пучков слабой интенсивности в комбинации с постулатом Борна является прямым аргументом в пользу интерпретации волновой функции как функции распределения амплитуд.

Корпускулярно-волновой дуализм.

Теперь становится ясно, что корпускулярно-волновой дуализм есть естественное продолжение концепции "коллапса" к более общей ситуации.

Как только что отмечено, ключевой ошибкой начальной наивной концепции корпускулярно-волнового дуализма была "примитивная" интерпретация (см. выше). Но ошибка эта оказалась исключительно влиятельной: широко распространённая Копенгагенская (т.е. школа Бора) интерпретация недвусмысленно приписывала волновую функцию отдельной частице. Ввиду исключительной - и совершенно заслуженной! - репутации Бора, Копенгагенская интерпретация стала - и по-прежнему остаётся - неисчерпаемым источником противоречий и парадоксов.

Исторически, начальная формулировка корпускулярно-волнового дуализма утверждала, что, в зависимости от обстоятельств, отдельная микрочастица демонстрирует либо корпускулярные, либо волновые свойства, т.е. ведёт себя либо как частица, либо как волна. Однако, очень трудно представить, как пространственно локализованный объект приводит к интерференции во всём координатном пространстве. Под давлением такого рода трудностей и экспериментальных фактов, концепция дуализма эволюционировала к, например, такой: микрочастица не является ни волной, ни корпускулой, это нечто иное. Это уже звучит лучше, хотя по-прежнему расплывчато и неясно. И только Статистическая интерпретация расставила всё по своим местам: волновые свойства характерны для всего пучка / ансамбля частиц, а не для одной отдельной частицы. У одной частицы нет и не может быть волновых свойств. И обратно, предвосхищая обсуждение в следующем разделе 5 (переход к квантовой теории поля): волна, рассматриваемая квантовомеханически, может восприниматься как набор (ансамбль) частиц / квантов, в зависимости от степени возбуждения и количества квантов поля, соответствующих этому возбуждению, и демонстрирующих свойства частиц. В этом и состоит современное понимание соответствия волн и ансамблей частиц, заменяющее наивный корпускулярно-волновой дуализм.

Резюмируя: волновые структуры возникают только через накопление и объединение частиц в ансамбли, и, обратно, квантование волновых полей приводит к ансамблям частиц. Эти две независимые, но в равной степени справедливые концепции, тесно переплетаются в квантовой теории поля, которая рассматривает квантовые / квантованные поля как источник всех частиц, существующих во Вселенной.

И далее: поскольку волновая функция определена для всех точек пространства, её можно рассматривать - хотя и в известной степени формально - как комплексное волновое поле (именуемое обычно шредингеровским). А это, в свою очередь, служит удобной отправной точкой для перехода к идеям квантовой теории поля.

Историческое отступление.

История наивного восприятия корпускулярно-волнового дуализма служит полезным уроком против чрезмерного внимания формальным техническим операциям при отсутствии достаточного понимания сути используемого математического аппарата (в учебниках - в значительной мере), что и послужило одной из главных причин распространения известных парадоксов.

Тот факт, что волновые проявления характерны именно для ансамблей, а не отдельных частиц, было осознано довольно давно, почти одновременно с созданием квантовой механики, но очень часто забывалось в течение XX века.

Например, ещё в 1935г., в лекциях на физфаке МГУ, Ю.Б. Румер отмечал (Румер, 1935): *"Никакой аналогии между движением одной частицы и волны не существует. Между тем, очень часто по неосторожности говорят о волновой природе электрона, в то время как следовало бы говорить о волновой природе пучка электронов"*. Аналогично, в 1960г., в лекциях в Гарварде, Дж. Макки указывал (Макки, 1960, см. также эпиграф к этому разделу): *"Таким образом, эта математическая система включает и волновые, и корпускулярные свойства электромагнитного излучения, и парадокс возникает только из-за попытки слишком примитивно представить себе физическую картину"*. Наконец, Д.И. Блохинцев, подчёркивал в классическом труде (Блохинцев, 1976): *"Следовательно, состояние частицы с определённой волновой функцией следует интерпретировать как принадлежность к определённому квантовому ансамблю"*.

5. От квантовой механики к квантовой теории поля.

"Делается предположение, что каждому сорту элементарных частиц соответствует поле, квантами которого они являются"
Э. Ферми

Мы на время отвлечёмся от истории квантовых парадоксов, чтобы уделить внимание идеям квантовой теории поля, как естественного расширения квантовой механики. Соответственно, мы кратко обрисуем несколько фундаментальных концепций квантовой теории поля, которым обычно не уделяется достаточно внимания в стандартных текстах.

Как было отмечено в предыдущем разделе, в обычной квантовой механике волновая функция может рассматриваться как поле шредингеровских амплитуд вероятности. Однако, это всё ещё классическое поле, т.е. комплексно-значная функция, существующая либо во всех точках конфигурационного пространства, либо пространства импульсов, и т.п., в зависимости от выбранного представления. Подчинение этого поля требованиям релятивистской инвариантности и вторичного квантования открывает путь к последовательной квантовой теории поля, и, в частности, воспроизводит все её технические результаты. Однако, полноценная квантовая теория поля замахивается на гораздо большее, а именно: проследить истоки возникновения всех элементарных частиц и объяснить последние как возбуждения / кванты изначального вакуумного поля, как источника всего сущего.

Исторически, первая версия квантования поля, известная теперь как каноническое квантование, была сформулирована Гейзенбергом и Паули (Heisenberg, Pauli, 1929, см. также Вентцель, 1949) всего через три года после основополагающих статей

Шредингера. Соответственно, обычная волновая функция (в координатном представлении) и её Фурье-компоненты (импульсное представление) становились операторами (точнее, операторно-значными функциями координат или импульсов), действующими на вектора состояний.

Подчеркнём ещё раз фундаментальную разницу между классическими и квантованными (квантовыми) полями. В то время как первые являются обычными вещественно-значными функциями, удовлетворяющими уравнениям классической математической физики, последние есть операторно-значные функции, собственные состояния которых материализуют различные наборы квантов / частиц, соответствующих этому полю.¹

На "повседневном языке", квантовая теория поля развивает идеи традиционной квантовой механики, в которой волны де Бройля и волновые функции не соответствуют каким-либо материальным волнам, а просто обозначают распределения (хорошо известные из статистической физики) амплитуд вероятностей. Эти распределения и дают статистику микрочастиц в квантовых ансамблях. Аналогично, квантованные поля не есть поля в смысле классической физики: это операторы, создающие шредингеровские поля / волновые функции. Более точно, эти операторы действуют в функциональном пространстве волновых функций, и, тем самым, создают поля амплитуд вероятностей (т.е. волновые функции) - в точном соответствии с идеями вторичного квантования. И далее следует (как недвусмысленно указал Ферми) основное предположение квантовой теории поля: частицы каждого типа возникают как кванты своего специфического поля.

Соответственно этому, в первые мгновения жизни нашей Вселенной, всепроникающее пра-родительское поле распалось с образованием множества суб-полей, возбуждения которых и породили всю палитру известных элементарных частиц. (Поскольку это очень сложный процесс, о котором трудно судить с определённой ясностью в настоящее время, мы не будем в него здесь углубляться). Однако простейшая концепция, базирующаяся на квантовании Гейзенберга-Паули, даёт качественную картину упругой субстанции, малые колебания которой вокруг равновесия квантуются с образованием собственных состояний глобального гармонического осциллятора. (Напоминаем: гармонический осциллятор обладает эквидистантным спектром $E = n\hbar\omega$, где n - номер уровня, а $\hbar\omega$ - минимальная энергия кванта).

Далее, n -ый уровень, или n -ая мода, рассматривается как ансамбль n элементарных квантов энергии / элементарных возбуждений (аналогично фоонам в упругой среде, плазмонам в плазме, магнонам в ансамбле спинов, и т.п.). Это критически важный момент: он знаменует фазовый переход от пра-родительского поля к современному состоянию мира. Технически это осуществляется преобразованием Гейзенберга - Паули: волновая функция $\Psi(x)$ становится операторной функцией $\hat{\Psi}(x)$ (и, соответственно, импульсная волновая функция $\Psi(p) \rightarrow$ оператором $\hat{\Psi}(p)$). При этом глобальный гармонический осциллятор заменяется - как только что указывалось - на ансамбль локальных осцилляторов, возбуждённых в состояние $n = 1$, с минимальной энергией $E_1 = \hbar\omega$. Это и объясняет, почему квантованное поле можно рассматривать и как поле гармонических осцилляторов, см. предыдущую сноску. (Эта простейшая механистическая картина даёт кванты/частицы только с нулевой массой покоя -

¹ По этой причине квантованные поля часто именуют "полями квантов / частиц" (Абрикосов и др, 1962), или, несколько вольно, "полями гармонических осцилляторов", элементарные возбуждения которых и есть частицы (Поляков, 1999).

например, фотоны, а для получения ненулевой массы существуют поправочные процедуры, которые выглядят, однако, несколько искусственно. В настоящее время существует, однако, более убедительный механизм генерации масс - спонтанное нарушение симметрии, см. Ченг, Ли, 1987).

Добавим, что, как было отмечено в Разд. 1, моды возбуждения и их кванты возникают из и в присутствии квантового вакуума, который, располагая бесконечным запасом энергии, играет роль глобального термостата (а сам ансамбль квантов выглядит как большой канонический ансамбль, хорошо известный из статистической физики) и обеспечивает случайное поведение микрочастиц в квантовой механике. Именно квантовый вакуум, воздействуя единообразно на все частицы ансамбля, формирует когерентное распределение амплитуд вероятностей и их волнообразную интерференцию. Другими словами, хотя кванты и не взаимодействуют друг с другом, квантовый вакуум является той общей причиной, которая обеспечивает когерентное распределение квантов. Кстати, рождение частиц как квантов волновых мод объясняет в качестве бесплатного приложения, почему поведение квантовых частиц описываются типично волновой характеристикой - амплитудой (вероятности).

В смысле аналогии, вакуум выполняет роль поверхностного натяжения в волнах на воде. Разница, однако, в том, что в воде все молекулы поверхности взаимодействуют посредством поверхностного натяжения "одновременно", что и делает их движение когерентным, точнее, ансамблево когерентным. В квантовом же случае микрочастицы пучка не взаимодействуют, их когерентность, так сказать, "растянута во времени", т.е. имеем временную когерентность. Можно сказать, осуществляется "эргодичность" когерентности: согласованность (напомним: когерентность и есть согласованность) в пучке невзаимодействующих квантов реализуется в виде единообразного поведения отдельных частиц пучка, что и даёт когерентную амплитуду вероятности.

Резюмируя: моды колебаний поля служат - в смысле механизма Гейзенберга-Паули - генераторами ансамблей квантов поля. Поэтому неудивительно и совершенно естественно, что волновые функции служат распределением (комплексно-значным) в таких ансамблях (Блохинцев, 1987). Всё это убедительно свидетельствует, что ансамбль квантов / частиц, возникающий при квантовании волновых мод поля, есть альтернативное, но совершенно эквивалентное представление эти мод / волн. Другими словами, имеет место соответствие волн именно ансамблям частиц (а не одной частице, что неявно предполагалось наивным корпускулярно-волновым дуализмом!), что и видно в волнообразных распределениях интенсивности.

Следует заметить однако, что поскольку классические поля сами оказываются скоплениями квантов / частиц, то объяснение квантования колебаниями полей классических выглядит как пример логически замкнутого круга, а посему и не вполне удовлетворительно. Гораздо последовательнее поэтому считать исходной субстанцией именно квантованное поле, являющейся источником квантов, которые затем и объединяются в поля классические.

6. Законы сохранения, дальние корреляции, и парадокс "таинственного действия на расстоянии".

"Не существует какой-либо связи между подсистемами-компонентами, разделёнными большими расстояниями. Однако, условная вероятность для одной компоненты зависит от того, какое состояние другой мы выбираем"

А.Б. Мигдал

По иронии судьбы именно Эйнштейн нарёк дальние корреляции "таинственным действием на расстоянии", что и стало нарицательным именем парадокса. А между тем, измерения в протяжённых квантовых системах (например, в когерентных парах фотонов) в сочетании с законами сохранения естественно ведут к понятию квантовой запутанности, но при этом никаких чудес, вроде "таинственного действия на расстоянии", совершенно не требуется. Нужно просто понимать роль условных, а не абсолютных, вероятностей, недооценка которых и провоцирует миф "квантовой нелокальности", который уже который год упоминается не только в популярной, но и в специальной литературе.

Более конкретно: рассмотрим возникновение когерентных пар фотонов в радиационном двойном распаде в атомах Ca или PRDC (parametric down-conversion) процессах. (Короткое пояснение: когерентная пара описывает оба фотона единой волновой функцией, так что состояния обоих фотонов в паре связаны, т.е. когерентны. Если пара находится например, в S - состоянии, то возможные состояния фотонных компонент ограничены условием: суммарный угловой момент пары всегда ноль.). Такие процессы наблюдались в известных экспериментах (Freedman and Clauser, 1972; Aspect, Dalibard, Roger, 1982, etc). Сходные условия реализуются в мысленных экспериментах Д. Бома (Бом, 1965, 2 изд.) со спинами и т.п.. Корреляция измеряемых значений для обеих компонент пары недвусмысленно указывает на сохранение суммарных величин, которое, в свою очередь, тривиально вытекает из общих законов сохранения. И тем не менее, эти результаты стали источником бесчисленных обсуждений пресловутой "нелокальности" квантовой механики, уходящих своими корнями в далёкий уже 1935г., когда Эйнштейн, Подольский, и Розен написали знаменитую ЭПР статью (Einstein et al, 1934), аргументируя своё недоумение результатами новой тогда квантовой механики.

После этого введения перейдём к делу, и сначала обсудим измерения скалярных величин (обобщение на векторные переменные производится тривиально просто).

Рассмотрим общую схему измерения зарядов в электрон-позитронной паре (возникающей в процессе, обратном двухфотонной аннигиляции электрон-позитронных пар). Поскольку пара возникает ($t = 0$) в точечном взаимодействии, последнее тривиальным образом (контактное взаимодействие!) обеспечивает корреляцию компонент пары. Однако измеряем мы соответствующую информацию только **позднее**, когда компоненты уже разлетелись на ощутимые расстояния. Именно это и создаёт впечатление "нелокальности". Количественно: до измерения заряды компонент неопределённые (точнее: случайны), т.к. произведения волновых функций свободных компонент не являются волновой функцией пары (последняя есть суперпозиция / когерентная смесь состояний $\psi^e_{\text{detector1}} \cdot \psi^p_{\text{detector2}}$ с $\psi^p_{\text{detector1}} \cdot \psi^e_{\text{detector2}}$

в пропорции 50/50 из-за взаимодействия, порождающего пару при $t = 0$). Соответственно, равновозможно обнаружение каждой из компонент в электронном или позитронном состоянии. Но как только измерение заряда на одной из компонент пары проделано, результат на другой компоненте становится известным мгновенно (100% корреляция!), и независимо от расстояния между компонентами. (На больших расстояниях кулоновским взаимодействием внутри пары можно пренебречь, так что корреляция возникает исключительно из-за законов сохранения). Именно эта ситуация создаёт иллюзию "нелокальности", которая и интерпретируется как "таинственное действие на расстоянии". Однако - что критически важно для разрешения парадокса! - эти рассуждения предполагают использование **УСЛОВНЫХ**, а не абсолютных вероятностей (или их амплитуд!), т.е. как только известен знак заряда на одной из компонент, скажем $-e(+e)$, **УСЛОВНАЯ** вероятность получить $+e(-e)$ для другой компоненты - немедленно 100%. Перефразируя: в пространственно протяжённых системах исход второго измерения всегда **УСЛОВЕН** по отношению к исходу первого, причём независимо от расстояния. Таким образом, именно условная вероятность является нелокальной, поскольку она имеет дело с пространственно разделёнными компонентами.

С равным успехом, мы могли бы обратить эту схему и рассмотреть корреляцию двух фотонов (возникающих вследствие аннигиляции пар) в терминах угловых моментов возникающих фотонов: совершенно аналогично, эти корреляции будут подчиняться **УСЛОВНЫМ** вероятностям. Та же самая логика приложима и к измерению других векторных динамических переменных (например, спинов, и т.д.) посредством добавления угловых аргументов в функции условных вероятностей.

Другими словами, именно наша схема измерений привносит ощущение нелокальности, а отнюдь не квантовая механика. Это и закрывает "парадокс", а с ним и волшебство "таинственного действия на расстоянии".

Благодарности

На прояснение фундаментальных основ квантовой механики исключительное влияние оказали замечательные исследования, педагогический талант и писательское мастерство Дмитрия Ивановича Блохинцева - имя в рекомендациях не нуждается. Автор глубоко убеждён, что основные разделы классических работ Д.И. Блохинцева (Блохинцев, 1987, 1988) должны стать обязательным элементом образования студентов-физиков, если мы хотим обеспечить профессиональное владение квантовой механикой и предотвратить появление новых таинственных парадоксов.

Мне приятно поблагодарить Л.Д. Блохинцева, И.Д. Блохинцева, С.В. Ганцевича и А.Е. Хренникова за многочисленные обсуждения, комментарии, и сотрудничество в последние годы.

Хочу добрым словом помянуть недавно ушедшего от нас профессора МГУ Д.А. Славнова, который интенсивно занимался основаниями квантовой теории.

Любые остающиеся в тексте недочёты - безусловно на совести автора.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрикосов, А.А., Горьков, Л.П., Дзялошинский, И.Е.**, Методы квантовой теории поля в статистической физике, 1962
- Блохинцев, Д.И.**, Основы квантовой механики, 4е изд., 1963; 5е изд., 1976
- Блохинцев, Д.И.**, Принципиальные вопросы квантовой механики, 2е изд., 1987
- Блохинцев, Д.И.**, Квантовая механика. Лекции по избранным вопросам, 2е изд., 1988
- Бом, Д.**, Квантовая теория. 2е изд., 1965
- Вентцель, Г.**, Введение в квантовую теорию волновых полей, 1947
- Дирак, П.А.М.**, Принципы квантовой механики, 4е изд, 1958
- Зоммерфельд, А.**, Лекции по теоретической физике: Оптика, т. IV, 1953
- Макки, Дж.**, Лекции по Математическим основам квантовой механики, 1960
- Мигдал, А.Б.**, Качественные методы в квантовой теории, 1975
- фон Нейман, Дж.**, Математические основы квантовой механики, 1964
- Поляков, А.М.**, Калибровочные поля и струны, 1999
- Румер, Ю. Б.**, Введение в волновую механику, 1935
- Фейнман, Р.Ф.**, Характер физических законов, 1964, 2е изд - 1987
- Фейнман, Р., Хибс, А.**, Квантовая механика и интегралы по траекториям, 1965
- Ченг, Т.-П., Ли, Л.-Ф.**, Калибровочные теории в физике элементарных частиц, 1987
- Aspect, A., Dalibard, J., Roger, J.**, Phys. Rev. Lett., **49**, 1804 (1982)
- Ballentine, L.**, Rev. Mod. Phys., **42**, 358 (1970)
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.** Phys. Rev., **47**, 777 (1935)
- Freedman, S, and Clauser, J**, Phys.Rev. Lett., **28**, 938 (1972)
- Heisenberg, W., Pauli, W.**, Z.Physik, **56**, 1 (1929)
- London, F., Bauer, E.**, The theory of observation in Quantum Mechanics, 1939 / In: J.Wheeler and W. Zurek, Quantum Theory and Measurement, Princeton University Press, 1982
- Nagasawa, M.**, Stochastic processes in quantum physics, Springer, 2000
- Roepstorff, G.**, Path Integral approach to quantum physics, Springer, 1994
- Taylor, G.**, Proc. Camb. Phil. Soc., **15**, 114 (1909)
- Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., Kawasaki, T.**, Am. J. Phys., **57**, 117 (1989)