

Л. Аккарди

ДИАЛОГИ О КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

**Гейзенберг, Фейнман, Академус,
Кандидо и хамелеон на ветке**



**R&C
Dynamics**

Luigi Accardi

**URNE
E CAMALEONTI**

**Dialogo sulla realtà, le leggi del caso
e l'interpretazione
della teoria quantistica**



il Saggiatore

ЛУИДЖИ АККАРДИ

ДИАЛОГИ О КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

*Гейзенберг, Фейнман, Академус, Кандидо
и хамелеон на ветке*

Перевод с итальянского А. Я. Арефьевой

Под редакцией А. А. Баранова и И. В. Воловича



Москва ♦ Ижевск

2004

Интернет-магазин

MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
 - математика
 - биология
 - нефтегазовые технологии
-

Аккарди Л.

Диалоги о квантовой механике. Гейзенберг, Фейнман, Академус, Кандидо и хамелеон на ветке / Пер. с итальянского. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. — 448 с.

В книге обсуждаются две интерпретации квантовой теории — традиционная и новая, призванная объединить науку и культуру и направленная на решение важных и глубоких концептуальных проблем. Автор сознательно отказался от использования в книге математических формул: представление данных на концептуальном уровне — это возврат к обычному языку после периода абстрактных представлений. Книга строится на интересных полемиках, аналогиях и критических рассуждениях.

Для широкого круга читателей.

ISBN 5-93972-226-1

© Л. Аккарди, 2004

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»,
Институт компьютерных исследований, 2004

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие	7
Предисловие автора к русскому изданию	11
ГЛАВА I.	13
I.1. Фундаментальные основы? Кто ими интересуется?	13
I.2. Четыре причины неудовлетворенности	27
I.3. Что говорят физики?	42
ГЛАВА II.	57
II.1. Почему они говорят: эксперименты и суперпозиция	57
II.2. Волны или частицы?	63
II.3. Измерения, объективизация, исчезновения	78
II.4. Процесс измерения	83
II.5. Статистическая интерпретация	89
II.6. Парадоксы?	93
II.7. Кошка Шрёдингера	96
II.8. Макрореализм или микронереальность?	101
II.9. Нелокальность	107
II.10. Парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена	118
ГЛАВА III.	129
III.1. Экспериментальная метафизика	129
III.2. ψ для психологии	140
III.3. Наука и здравый смысл	148
III.4. Квантовое состояние	157
III.5. Принцип неопределенности	163
III.6. Возражения Эйнштейна	176
III.7. Физические основы принципа неопределенности	179
III.8. Индетерминизм или неопределенность?	181
ГЛАВА IV.	186
IV.1. Математические модели, физическая реальность и полнота	186

ГЛАВА V.	196
V.1. Вероятностные корни проблем	196
V.2. Ортодоксальное решение	211
V.3. Решение квантовой логики	217
ГЛАВА VI.	224
VI.1. Решение, предложенное квантовой вероятностью	224
VI.2. Статистический инвариант двух отверстий	240
VI.3. Электроны и бильярдные шары	246
VI.4. Квантовый парадокс Зенона	257
ГЛАВА VII.	263
VII.1. Сравнение различных решений	263
VII.2. Критика квантовой вероятности	270
VII.3. Верните нам траектории	287
VII.4. Скрытые параметры в роли паразитических теорий	294
ГЛАВА VIII.	311
VIII.1. Белл и скрытые параметры	311
VIII.2. Различные понятия локальности	322
VIII.3. Локальность Белла по Беллу	326
VIII.4. Неравенство Белла	337
VIII.5. Существенное предположение	342
VIII.6. Приложение: доказательство неравенства Белла	352
ГЛАВА IX.	355
IX.1. Реализм черного ящика	355
IX.2. Реализм хамелеонов	362
IX.3. <i>Natura facit saltus</i>	372
IX.4. Мечь детерминизма	375
IX.5. Интуитивность квантовой теории	386
IX.6. Выводы	398
IX.7. Приложение: реалистичная теория измерения	406
Послесловие	424
Дискуссия « <i>in puse</i> » (о сути проблемы)	433
Именной указатель	443

Предисловие

Существует ли объективная реальность? Этот традиционный философский вопрос был в центре жарких дебатов о квантовой механике, проходивших на протяжении всего XX века. Данная книга содержит богатейший материал по истории подобных дебатов, в ней можно найти также и оригинальные идеи самого автора.

Удивительно, но в последние десятилетия вопрос об объективной реальности превратился из чисто теоретического в объект экспериментальных исследований. Более того, новейшие технологические разработки по квантовой криптографии, квантовой телепортации и квантовым компьютерам имеют к нему самое непосредственное отношение.

Автор книги — профессор Римского университета Луиджи Аккарди — один из ведущих европейских ученых, создатель ряда фундаментальных работ по квантовой вероятности, стохастическому пределу и многих других, сумел провести обсуждение принципиальных вопросов квантовой механики в общем контексте мировой культуры.

Научные открытия совершаются в определенных исторических и культурных условиях и, в свою очередь, сами оказывают значительное влияние на культуру. Более того, наука играет важную роль в обосновании различных идеологий. Например, постулат либерализма о существовании отдельного свободного индивидуума, так же как и идея прогресса, связаны с представлениями классической механики о движении материальных точек, а надежду на возможность управления глобальными социальными и экологическими процессами пытаются обосновать в теории систем и кибернетике.

Квантовая механика, созданная в 1924–1925 годах Гейзенбергом, Шрёдингером и Дираком, принадлежит к числу величайших достижений человеческого гения. Эта физическая теория описывает элементарные частицы, атомы и молекулы, из которых состоит материя. Квантовая механика и теория относительности составляют фундамент современного физического мировоззрения, которое коренным образом отличается от предшествующих ему, так называемых «классических» представлений.

Согласно традиционным классическим представлениям окружающая нас природа существует как объективная реальность, и задача научного исследования заключается в том, чтобы создавать модели, как можно более полно описывающие эту реальность. Именно эти, казалось бы, совершенно очевидные и незыблемые представления об объективной реальности, а также о причинности, были подвергнуты решительному пересмотру творцами квантовой теории.

Постановка проблемы такова: обладает ли электрон некоторыми характеристиками (например, местоположением, или ориентацией спина) сам по себе, объективно, до того как мы измеряем эти характеристики? Ортодоксальная копенгагенская интерпретация квантовой теории не дает нам положительного ответа на этот вопрос. Утверждается, что свойства электрона фактически порождаются процедурой взаимодействия с измерительным прибором. Поскольку мы полагаем, что вселенная состоит из электронов и других элементарных частиц, то вопрос заключается в том, существует ли вообще объективная реальность, и если да, то в каком смысле?

Проблемы, поднятые квантовой механикой, обсуждались все прошлое столетие. Доминировала прагматическая точка зрения копенгагенской интерпретации о том, что нет смысла говорить об объективных свойствах микрочастиц, и что квантовая механика в принципе способна давать лишь статистическое описание результатов наблюдений. Эта прагматическая позиция, иногда с привкусом идеализма, ярко выражена в работах Бора, Гейзенберга, Паули. Считалось, что ее поддерживает «молчаливое большинство» работающих физиков. Другая точка зрения, представленная Эйнштейном, де Бройлем, Шрёдингером, заключалась в необходимости углубления физического и методологического анализа основ квантовой механики для того, чтобы выявить существующие, вероятно, элементы объективной реальности. Своеобразный промежуточный подход разрабатывался советскими физиками В. А. Фоком и Д. И. Блохинцевым.

Эйнштейн, Подольский и Розен (ЭПР) в работе 1934 г. рассмотрели пару частиц, находящихся в некотором, так называемом зацепленном (entangled) состоянии, и привели аргументы, доказывающие, что квантовомеханическое описание экспериментальной ситуации не может считаться полным, что есть элементы реальности, не вписывающиеся в квантовомеханическую картину.

Хотя доказательства ЭПР не были признаны большинством физиков достаточно убедительными, их работа продолжает вызывать огромный интерес специалистов. Понятие зацепленных ЭПР-состояний находится в цен-

тре внимания активных теоретических и экспериментальных исследований целого ряда разделов квантовой оптики и физики элементарных частиц, оно является основным квантовомеханическим ресурсом для квантовой телепортации и квантовой криптографии.

Джон Белл в 1964 г. вывел определенные неравенства для спиновых корреляционных функций, описывающих состояния типа ЭПР. Неравенства Белла были интерпретированы как выражения, дающие математическую формулировку понятия локального реализма (т. е., по существу, локальной объективной реальности). Было показано, что в квантовой механике неравенства Белла нарушаются, если сделать некоторые дополнительные предположения. Провели ряд экспериментов, которые, также при некоторых дополнительных предположениях, продемонстрировали нарушение неравенств Белла и соответствие результатов квантовомеханическим вычислениям. Отсюда многие специалисты сделали вывод о том, что локальный реализм должен быть решительно отброшен.

Однако не все согласились с этим выводом. Было указано на важную роль дополнительных предположений в квантовомеханических вычислениях Белла и в соответствующих экспериментальных работах. Было установлено, что учет пространственных характеристик квантовых состояний принципиально меняет всю картину и позволяет показать, что квантовая теория согласуется с неравенствами Белла (см. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0108073>).

Следует отметить «ноу-хау» этой книги — остроумную метафору с хамелеоном, придуманную Л. Аккарди и проливающую новый свет на понятие объективно существующих свойств предметов. Как известно, хамелеон **меняет цвет в зависимости от окружающей среды**. На стволе дерева он становится **коричневым**, а когда он сидит на зеленой ветке — зеленым.

Зададимся вопросом — каков же цвет хамелеона на самом деле, объективно? Очевидно, что этот вопрос не имеет ответа, он некорректно поставлен. Точно так же, предлагает автор книги, некорректно спрашивать, какова на самом деле проекция спина электрона или его траектория. Пример хамелеона показывает, что странные адаптивные свойства не являются специфическими для микрообъектов, ими обладают и некоторые хорошо нам знакомые макроскопические объекты. Поэтому методы квантовой вероятности, одним из создателей которой является автор книги, могут, согласно его предположению, использоваться и для описания ряда макроскопических явлений. Эта интересная идея вызвала оживленную полемику в научной литературе.

Согласно автору книги, характеристики электрона, такие как ориентация спина, положение в пространстве, импульс, существуют как объективная реальность, но это адаптивная реальность переменного цвета хамелеона, а не механическая реальность раскрашенных шариков.

Нельзя ли использовать метафору с хамелеоном для того, чтобы продемонстрировать у макроскопических объектов специфическое поведение, подобное квантовомеханическому? Автор книги утверждает, что это возможно, и что неравенства Белла нарушаются в некоторых компьютерных опытах. Этот вопрос продолжает обсуждаться в многочисленных научных статьях и заметках, так что читатель может составить свое собственное мнение о том, насколько убедительны эти утверждения, получив информацию из первых рук.

Книга необычна: она написана в форме диалогов реальных лиц, таких как Бор, Эйнштейн, Гейзенберг, известных философов и журналистов, причем все, что говорят данные лица — цитаты из их подлинных высказываний. В обсуждении участвуют также два вымышленных персонажа — Кандидо (традиционный для европейской культуры образ «простодушного») и Академус. Нетрудно видеть, на чьей стороне симпатии автора книги.

Автору удалось из разноголосицы мнений и высказываний о квантовой механике создать стройное литературное и научное произведение. Книга читается как увлекательная пьеса о драматических приключениях научной мысли XX века. Диалоги об устройстве мироздания ведутся на протяжении тысячелетий. Они будут продолжены и в наступившем XXI веке, и за его пределами.

И. В. Волович

Предисловие автора к русскому изданию

Публикации русского издания этой книги вызывает у меня чувство глубокого удовлетворения. Не только в силу личных и сентиментальных причин — я защищал кандидатскую диссертацию в Москве в 1974 году и «московский» период с 1970 по 1974 годы представляется мне наиболее важным с точки зрения моего научного становления. Существует и более глубокая причина, которая появилась из-за стремительного развития классической теории вероятностей всех уровней: от фундаментальной теории до продвинутых технических приложений, в том числе и новых приложений в области физики.

Квантовая вероятность — это младшая сестра классической теории вероятностей, она открывает классической вероятности огромное поле новых приложений, которые многие десятилетия оставались на довольно низком количественном уровне: приложения классической вероятности к квантовой физике. Это также дает отдачу во все более и более растущее ныне множество квантовых теоретических подходов к классическим вероятностным понятиям. Вероятно с концептуальной точки зрения наиболее интригующим фактом является возможность экспериментально доказать необходимость выхода за рамки обычной колмогоровской модели классической вероятности.

А. Н. Колмогоров сделал для теории вероятностей то же, что Евклид для геометрии. Более того, евклидово пространство до сих пор является базисом для построения неевклидовых геометрий: фактически они «локально моделируются» в евклидовом пространстве. Подобное утверждение справедливо и для не-колмогоровских вероятностных моделей, которые «локально моделированы» классическими вероятностными моделями, где термин «локальный» подразумевает ограничение на совместные наблюдаемые.

Это перекидывает мостик между не-колмогоровскими вероятностными моделями и квантовой теорией. Фактически разница между «совместными» и «несовместными» наблюдаемыми — это характерная особенность квантового мира: в классической физике все наблюдаемые могут быть измерены

одновременно и с произвольной точностью. Знаменитый принцип Гейзенберга утверждает, что в квантовой физике это не так.

Поэтому мы можем рассматривать квантовую теорию в качестве первого примера не-колмогоровской вероятностной модели. Один из главных тезисов данной книги заключается в том, что существуют и другие модели такого рода (по аналогии с геометрией), и что это естественным образом проявляется всякий раз, когда возникает ситуация «несовместности».

Осознание того, что квантовая теория — это не-колмогоровская вероятность, произошло только через много десятилетий после создания математического формализма теории. Формализм отлично самосогласован, но когда новая вероятностная модель входила в контакт со старой (особенно часто это происходило при обсуждении процессов измерения), некоторые из правил классической теории применялись к новой модели неправильно и возникали парадоксы. Главный тезис этой книги — абсолютно все «парадоксы» квантовой теории возникают по этой причине.

После публикации итальянского издания данной книги основная идея «эффекта хамелеона» (см. главу IX) была конкретизирована путем построения локальной, адаптированной, классической, детерминистической динамической системы, которая воспроизводит ЭПР-корреляции и потому нарушает неравенство Белла. Локальная эволюция этой динамической системы экспериментально реализована с помощью трех независимых и пространственно разделенных компьютеров (см. <http://www.arxiv.org/abs/quant-ph/0112067>).

В заключение мне приятно поблагодарить прежде всего Игоря Воловича, с которым мы в течение многих лет обсуждали фундаментальные проблемы квантовой физики, и чьи обширные знания и глубокая интуиция всегда являлись для меня источником вдохновения. Я также благодарен Ирине Арефьевой, Александру Чеботареву, Сергею Козыреву, Александру Печеню за многочисленные обсуждения, и Анне Арефьевой и Андрею Баранову за существенный вклад в перевод этой книги.

Луиджи Аккарди

ГЛАВА I

I.1. Фундаментальные основы? Кто ими интересуется?

КАНДИДО

Состояние современной физики меня не удовлетворяет.

АКАДЕМУС

Почему?

КАНДИДО

Потому что она не в состоянии превратиться в *культуру* в широком смысле этого слова. Она полностью игнорирует проблему трансформации знаний, накопленных наукой, в представления об окружающем мире.

АКАДЕМУС

Я и не знал, что такая проблема существует. В чем же она состоит?

ШРЁДИНГЕР

Физика, целью которой является не только выдумывание новых удивительных экспериментов, но также и получение понятных результатов исследования, как мне кажется, подвергается в настоящее время большой опасности **быть отрезанной от своих исторических корней** . . . Теоретическая наука, не осознавая того факта, что ее построения, считающиеся наиболее замечательными и важными, предназначены для внедрения в концепции, которые воздействуют на сообщество образованных людей и становятся неотъемлемой частью общего взгляда на мир; теоретическая наука, говоря я, в которой это предано забвению, и где эксперты продолжают держаться стайкой, используя термины, которые в лучшем случае понятны лишь небольшой группе ученых, неизбежно будет отрезана от остальной образованной части человечества¹.

МАГРИС

... Раньше, примерно до момента появления физики Эйнштейна, существовало соответствие, хотя и приблизительное, несовершенное и зачастую неточное между научным знанием и возможностью для простого человека

¹E. Schrödinger, *Are there quantum jumps?*, British Journal for the Philosophy of science, 3 (1952), pp. 109–123.

мысленно представить себе это знание. Научное знание влияло на восприятие мира, способ видения и представления и, следовательно, — для писателя или художника — изображение его... После Эйнштейна, похоже, возник непреодолимый разрыв между современной физикой (особенно, но не только, квантовой механикой) и пониманием (и поэтому восприятием и воображением) ее простым человеком²...

ШРЁДИНГЕР

То, каким образом мы воспринимаем мир в определенный период, вовсе не является заслугой лишь объективной науки: кроме нее на наше восприятие мира влияют философия, идеология, модные идеи и, особенно, господствующие научные школы, которые устанавливают условия для сравнения, посредством коих *vox populi*³ распознает, какие идеи верны, а какие нет.

ПОППЕР

Почему Шрёдингер отвечал на критику, используя аргументы, которые ни на одну секунду нельзя воспринимать серьезно? Мне кажется, причина в том, что в изысканной критике в его адрес нет никакой серьезной аргументации. Если бы Шрёдингер до сих пор удивлял их новым формализмом, они уделили бы ему значительно больше внимания. Но простые слова больше не интересуют наших специалистов, даже если они исходят от человека, который сделал в области их исследований не меньше любого другого. Если так обращаются с личностью столь высокого уровня как Шрёдингер (с Эйнштейном обращались так же скверно), чего может ожидать такой любитель, как я, осмелившийся отойти от позиции профессионалов⁴?

БАФИКО

... Это только на уровне эпистемологического отражения — когда человек сталкивается с ограничением познания, присущим человеческой природе, — научное знание становится научной культурой и может произойти слияние этих двух культур⁵...

АКАДЕМУС

Я не вполне понимаю все эти намеки на восприятие мира, его представление, слияние двух культур... они кажутся мне довольно туманными...

²Claudio Magris, *Linguaggi Letterari e Linguaggi Scientifici*, programma provvisorio del Laboratorio interdisciplinare per le Scienze Naturali ed Umanistiche, Settembre 1990.

³Глас народа. — Прим. перев.

⁴К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 163.

⁵R. Bafico, M. Parodi, *La Rivoluzione Probabilistica nella Scienza Moderna*, Genova, 1991.

КАНДИДО

Это немного напоминает разницу между культурой и специальными техническими знаниями: отсутствует четкая граница, но существуют некие идеи или некие *работы-символы*, которые соответствуют определенной культуре, определенному периоду времени; существуют и другие, которые успешно проникли более чем в одну культуру, более чем в один период времени; наконец, существуют и третьи, которые постоянно присущи человечеству. Люди обладают чем-то вроде инстинктивного восприятия этих идей, внутренней способностью ощущать их присутствие в воздухе, а также желанием, стремлением отыскать их. Одна из наиболее глубоких причин неудовлетворенности квантовой теорией заключается в том, что она, по-видимому, уничтожает эту способность образованных людей, не являющихся специалистами в данной области, понять глубокую концепцию, историческое изменение. Люди не понимают, сталкиваются ли они с изменением концепции или с техническим прогрессом, и приходят в замешательство . . .

МАГРИС

. . . Отвергает ли гуманитарий, изолированный от современной науки, очень важные, но специальные знания, которые никогда не будут каким-либо образом влиять на его работу, интеллектуальную или художественную, или же он отвергает фундаментальные знания о мире, которые, если овладеть ими, радикально изменят и обогатят как его взгляд на мир, так и его художественное творчество⁶?

АКАДЕМУС

Наш взгляд на мир, безусловно, меняется: подумайте хотя бы о принципе неопределенности, или о новой вероятности . . .

КАНДИДО

Я думаю о них, но я также думаю и о парадоксах, о некоторых весьма неправдоподобных утверждениях, о дискуссиях, которые очень далеки от восприятия простыми людьми . . . все это должно способствовать стремлению предпринять очередную попытку все разяснить, которая, в свою очередь, может быть осуществлена только путем рассмотрения концептуальных проблем и фундаментальных основ науки.

АКАДЕМУС

Парадоксы, неправдоподобность, дискуссии . . . что Вы имеете в виду?

⁶Claudio Magris, *Linguaggi letterari e Linguaggi Scientifici*, programma provvisorio del Laboratorio Interdisciplinare per le Scienze Naturali ed Umanistiche, Settembre 1990.

КАНДИДО

Мне почти стыдно спрашивать об этом, поскольку мне кажется, что здесь имеется противоречие в терминах. Разве не правда, что в течение десятилетий физики продолжают утверждать, будто *ненаблюдаемые объекты не существуют?*

АКАДЕМУС

О нет! Не говорите мне, что Вы хотите порассуждать о проблемах интерпретации квантовой теории.

КАНДИДО

Как Вы об этом догадались?

АКАДЕМУС

Но, Кандидо, кто вбил эти идеи в Вашу голову? Ни один солидный физик в наше время не интересуется такими вещами. Мы оставляем их гуманитариям и даже смеемся над ними по этому поводу.

КАНДИДО

Что Вы имеете в виду под *смеемся над ними*?

АКАДЕМУС

Только вспомните о мистификации, устроенной философам одним физиком⁷, который с успехом опубликовал в философском журнале статью, полную нонсенсов. Затем, в другой статье, опубликованной в *Lingua Franca*, в которой был сделан обзор состояния науки, он разоблачил обман, высмеивая бесхитростных гуманитариев.

КАНДИДО

Что за чепуха была в этой статье?

АКАДЕМУС

Бессмыслица вроде *мир не существует* и прочая ерунда... настолько абсурдная, что позабавила даже такую солидную газету как «International Herald Tribune», которая по этому случаю опубликовала комментарий на первой странице⁸.

СОКАЛ

Есть ученые, которые прилипли к догме, навязанной длительной пострационалистической гегемонией западным интеллектуалам, каковую кратко можно сформулировать следующим образом: существует внешний мир, свойства которого не зависят от человека и, конечно же, от всего человечества.

⁷Alan Sokal, *Social Text*, Duke University Press, spring-summer issue (1996).

⁸International Herald Tribune, 18–19.5.1996.

INTERNATIONAL HERALD TRIBUNE

Другими словами, есть какие-то тупые ученые, которые действительно думают, что мир существует⁹.

КАНДИДО

Но эти рассуждения о мире, который не существует, если никто на него не смотрит, о создании бесчисленных вселенных в момент наблюдения... Я видел их в физических обзорах, я слышал их на конференциях физиков; я даже наблюдаю, как их преподают в университетах в курсах квантовой физики...

АКАДЕМУС

Так что же? Это дело техники, определяемое наличием надежной теории и в еще большей степени надежными экспериментальными данными.

КАНДИДО

Давайте разграничим существование во времени фактов и мотиваций. Факт, похоже, действительно существует, и физик не только говорит об этом, но и учит этому.

АКАДЕМУС

Вы не хотите поддерживать такой антинаучный иррационализм, который в настоящее время становится все более распространенным, не так ли?

КАНДИДО

Я не думаю, что наилучший способ противостоять антинаучному иррационализму заключается в противопоставлении ему научного иррационализма.

АКАДЕМУС

О чем Вы говорите? Научный иррационализм содержит противоречие в самом термине. Наука — это сфера разума, и, следовательно, по определению, наука не может способствовать возникновению иррациональных отношений.

КАНДИДО

Я думаю, Вы правы, однако предмет нашего обсуждения, на мой взгляд, не может считаться доказанным, особенно если мы проводим различие между локальной рациональностью, состоящей в дедуктивном связывании каждого шага в последующим и предыдущим, и глобальной рациональностью, которая касается глобального взгляда. Мне кажется, что ученые сейчас достаточно хорошо справляются с первым, в то время как для второго, на мой взгляд, они, как правило, не имеют доказательств лучших, чем те, которые можно найти в других областях интеллектуальной деятельности. Владение

⁹См. предыдущую ссылку.

технической терминологией или ее элементами само по себе не является гарантией рациональности. Сейчас настало время, когда наука, сохраняя и укрепляя свой контроль над локальной рациональностью, начинает уделять больше внимания и рациональности глобальной.

АКАДЕМУС

Я не доверяю этим притязаниям на загрязнение науки философскими рассуждениями. Результаты, измерения, машины, способность влиять на мир и изменять его — вот что составляет основу науки, а вовсе не праздные разговоры.

Мы должны решить проблему создания дешевой и чистой энергии, понять механизмы работы мозга, иммунной системы, передачи генетической информации, научиться использовать математику для научного управления экономикой. . .

Это грандиозные проблемы! Руббин даже составил их перечень. Если какая-либо проблема отсутствует в нем, значит она не грандиозная. Или, скорее всего, это вовсе не проблема. Вопрос понимания того, о чем говорят все модели, столь успешно используемые учеными, и на какой эмпирической и рациональной основе они покоятся, а также вопрос отделения фактов и взглядов от предположений и предубеждений в этом списке отсутствует. Поэтому, как Вы думаете, кто захочет терять время, посвящая себя изучению основ науки?

КАНДИДО

Ясно, что под грандиозной проблемой Вы подразумеваете большой вложенный капитал. Я думаю, что, вместо этого, действительно большая проблема должна определять основы отдельных наук, отбирать те утверждения, опираясь на которые можно возвести все здание какой-либо научной дисциплины, точно определять содержание теории и объяснять совместимость различных теорий, участвовать в создании глобального взгляда на мир, который будет характерен для нашего времени и цивилизации.

Процесс формирования науки становится все более и более масштабным и важным для нашего общества, но его население, похоже, все меньше и меньше интересуется использованием ее фундаментальных основ и не заботится об их упрочнении.

АКАДЕМУС

Нет, большинство людей не интересуется фундаментальными основами. Наука со всеми достигнутыми ею практическими успехами, конечно же, не нуждается в каком-либо теоретическом узаконении. Несколько десятилетий назад по этому поводу происходила жаркая дискуссия, но затем эти

исследования стали вырождаться просто в формальную игру, или даже болтовню, совершенно изолированную от реальных физических явлений, так же как и от подлинного философского понимания. Дискуссия почему-то ушла в себя, ограничившись в качестве участников маленькой группой экспертов, которые продолжают повторять одни и те же вещи самим себе в течение ряда лет, в результате чего люди стали относиться ко всему этому с подозрением.

Некоторые мои коллеги, несмотря на то, что они достигли определенного возраста и положения, консолидировались таким образом, чтобы снять с себя подозрения, окружающие тех, кто посвятил себя подобным вещам и пытается объяснить гуманитариям, как много глубоких идей они могут извлечь из физики или математики.

КАНДИДО

Но высказывал ли кто-нибудь когда-нибудь предположение, что обучение гуманитарным идеям может быть очень полезно для ежедневной обработки данных естественно-научного исследования?

АКАДЕМУС

Я должен сказать, что в течение последних сорока лет имелись явные признаки движения в противоположном направлении. В настоящее время мы учим молодых людей держаться подальше от туманных болот философии и болтовни и быть как можно ближе к практическим вещам, таким как числа, формулы, машины.

ПОППЕР

Мы не должны позволить формулам победить нас: это путь к гибели. Восхищение непостижимыми заключениями экспертов обусловлено просто сложностью выражения и ведет нас к тому, что мы ошибочно принимаем неясность за глубину. Мы должны настаивать на понятном осмыслении, простоте и интеллектуальной ответственности в обсуждении предметов, которые, в конечном счете, должны быть интересны всем¹⁰.

КАНДИДО

Был исторический период, когда некоторые люди хотели свести науку к *ancilla theologiae* (служебной теологии), так не рискуем ли мы в настоящее время с отношением, подобным Вашему, свести науку к *ancilla technologiae*?

АКАДЕМУС

Я не вижу такого риска. Кроме того, почему отказ тратить время на философскую болтовню нужно сравнивать с порабощением науки техникой?

¹⁰К. Popper, *Poscritto alla logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 163.

КАНДИДО

Это неправильно — проводить четкую границу между наукой и техникой. Техника является той особой частью науки, которая пытается использовать знание для того, чтобы изменить мир. Это симпатичная и интересная область, и я не думаю, что смогу различить в одной и той же области исследований науку и применение, науку и технику: часто, пытаясь создать прибор, ученый вынужден задавать себе теоретические вопросы. С другой стороны, абстрактное изучение проблемы требует изобретения или усовершенствования инструментов.

Существует, однако, то, что я бы назвал технической идеологией, которая интересуется знанием постольку, поскольку последнее может привести к так называемым практическим достижениям. Мне не нравится эта идеология и я считаю ее опасной.

АКАДЕМУС

Но вы неизбежно столкнетесь с проблемой, состоящей в том, что максимальный интерес наука представляет для пользователей и в технической сфере. Никто на самом деле не знает, чем является сама наука, и никто не желает это знать.

КАНДИДО

Может быть, это происходит оттого, что люди начинают удивляться, до какой степени те, кто провозглашает, что действуют во имя исключительно высококачественного исследования, на самом деле прилипли к тем ценностям, которые, по их же мнению, имеются в ежедневной конкретной практике.

АКАДЕМУС

Современное исследование является наиболее важной созидательной силой человечества. Совершенно очевидно, что в массовой индустрии должна превалировать ментальность, ориентированная на бизнес. Вы к этому выскнете.

КАНДИДО

Высочайшая традиция научного исследования часто сопровождалась интересом к философии природы. Те, кто своей целью ставит получение знаний, находится обычно в независимом положении, что плохо подходит этой ориентированной на бизнес логике, о которой вы говорите.

АКАДЕМУС

Именно поэтому философия природы в настоящее время считается, в основном, чем-то старомодным, чем-то вроде игры ума, хотя и очаровательной, но все же игры, предназначенной для тех, кто больше не находится в центре активных исследований, или же никогда там и не был.

ПОППЕР

Мы слышим, как повсюду говорят: «Чего мы хотим, так это фактов и цифр, а не философских дискуссий». Некоторые интенсивно работающие физики нынешнего поколения, кажется, вовсе не заинтересованы в этих дискуссиях, или же они оставляют их Нильсу Бору. В чем они действительно заинтересованы, так это в (i) формализме, (ii) его применении и больше ни в чем. Но этот инструментализм, эта модная позиция играть жестко и не допускать нонсенса — особенно философских — сама по себе является очень старой философской теорией, сколь бы современной она не казалась¹¹.

КАНДИДО

Однако в прошлом довольно часто абсолютно умозрительные исследования, такие как, например, изучение фундаментальных основ науки, играли важную роль в научном прогрессе.

АКАДЕМУС

Действительно, и в наше время имеются специалисты в области фундаментальных основ. У них мало общего с активными учеными: они пишут разные обзоры, читают лекции на различные темы . . . , но они существуют и создают незначительное количество статей каждый год.

КАНДИДО

Я думаю, что умозрительные вопросы могут помочь отдельным ученым, да и вообще любому человеку, преодолеть узкие границы специализации. Но наше общество создало специалистов по умозрительным проблемам для того, чтобы уберечь других специалистов от рассмотрения концептуальных проблем . . . !

ЭЙНШТЕЙН

Эпистемология без контактов с наукой становится пустым шаблоном. Наука без эпистемологии — хотя и такое можно себе представить — примитивна и бесформенна¹².

АКАДЕМУС

Я Вам говорил. Вы, может быть, и найдете кого-нибудь, кто на словах допускает, что это очень интересные вещи, но на самом деле это будет лишь дань вежливости, отклонение от его основного пути. Вы обнаружите какого-нибудь знаменитого ученого, желающего принять участие в обсуждении еще и еще раз, возможно с популярной статьей. Но это не означает, что он когда-либо уделял фундаментальным основам столько же времени, за-

¹¹К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 112.

¹²Цитата из Gerald Holton, *Gli Scienziati hanno bisogno di una filosofia?*, Il Mulino, 335, Maggio-Giugno, 1993.

трачивал столько усилий и брал на себя столько обязательств, количество которых можно сопоставить с тем, что было затрачено им в так называемом активном исследовании.

КАНДИДО

Но если этот предмет их так мало интересует, что же они не написали ни одной научной статьи по этому поводу, почему они пишут популярные статьи о вещах, которые не изучали досконально? Разве они не рискуют этими сырыми соображениями напустить еще больше тумана?

АКАДЕМУС

Они, вероятно, полагают, и я согласен с ними, что для того, чтобы говорить о фундаментальных основах, достаточно здравого смысла и опыта. Каждому хорошему физическому в какой-то момент приходилось сталкиваться с проблемами интерпретации квантовой теории и он должен был найти свое собственное решение, которое позволяло ему привести мысли в порядок. Ясно, что изложение этих персональных решений не может вызвать путаницы, наоборот...

КАНДИДО

Тогда почему же, несмотря на двусмысленное отношение академической общественности, поток работ, посвященных фундаментальным проблемам, не только не падает никаких признаков истощения, но, наоборот, иногда кажется, что он увеличивается?

АКАДЕМУС

Очевидно, существует определенная степень неудовлетворенности, в том числе и в научном мире, современной ситуацией в квантовой теории, но я никогда не понимал вполне, откуда она появилась.

ВЕЙЛЬ

Необходимо признать, что значение квантовой физики, несмотря на ее достижения, остается до сих пор полностью не ясным¹³.

ДЖЕЙНС

Я хотел бы подчеркнуть нашу мотивацию: если бы квантовая теория не имела успеха с прагматической точки зрения, мы бы не интересовались ее интерпретацией. Именно из-за огромного успеха математического формализма квантовой механики становится крайне необходимо понять, что означает вся эта математика. Нахождение рациональной физической интерпретации формализма квантовой механики должно рассматриваться в каче-

¹³Н. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton University Press, Princeton, 1949; ит. тр. Boringhieri, 1967, p. 332.

стве наиболее приоритетной проблемы в исследованиях по теоретической физике¹⁴.

КАНДИДО

Я хотел бы понять причину этой неясности, этой неудовлетворенности...

АКАДЕМУС

Но если вы не являетесь экспертом ни в физике, ни в математике, как Вы себе представляете возможность понять дискуссию, которая проникает в самое сердце современной философии природы? Вы не боитесь технических препятствий, научного жаргона, формул...?

КАНДИДО

Я всегда думал, что действительно важные и глубокие концепции не могут быть слишком тесно связаны с научно-техническим жаргоном, или слишком уж специальными элементами, или даже формулами.

Можно сказать, что, по определению, чем большее число людей, имеющих только среднее образование, способно понять определенную идею без изучения специальных, технических или лингвистических элементов, тем более глубокой и важной является эта идея. Очевидно, это не означает, что усердие, концентрация и, особенно, искреннее стремление для понимания не обязательны. Выдвигая такие предпосылки (что совсем не просто), любой человек со средним образованием будет способен следить за анализом подобных идей.

АКАДЕМУС

Все зависит от того, что Вы имеете в виду под пониманием.

КАНДИДО

Понимание похоже на получение денег, т. е. того, что Вы можете превратить во что-то другое. Не важно, превращается ли одна научная идея в другую научную же идею, в патент или в инвестицию в промышленность. Она может точно так же превратиться в сказку, фантазию или даже мечту...

В квантовой теории, мне кажется, проявляется чувство некоей собственности, которая нетрансформируема в смысле этой *обратимости*. Я считаю, что трудно приспособляться к этому обмену и процессу передачи, в котором нечто становится чем-то еще. Поэтому сие остается вне меня.

АКАДЕМУС

Я не понимаю Вашу настойчивость в отношении квантовой физики. Вы полагаете, что понимаете классическую физику?

¹⁴E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley (1990), p. 385.

КАНДИДО

Вы не можете отрицать, что классическая физика в значительно большей степени интуитивна, чем квантовая физика.

АКАДЕМУС

Вы так говорите, потому что привыкли к идеям классической физики, однако, чтобы убедить Вас в том, что классическая физика не настолько интуитивна, как кажется, я предлагаю Вам прочитать замечательную книгу Боцци¹⁵.

КАНДИДО

О, продолжайте! Если бы классическая физика была так же далека от интуиции, как квантовая, как бы Вы объяснили тот факт, что нельзя сравнивать количество публикаций, касающихся проблемы интерпретации квантовой теории, с количеством статей, касающихся той же проблемы в классической физике? Разве Вы не интерпретируете эту серьезную попытку трактовки классической механики как выражение столь же серьезной неудовлетворенности?

АКАДЕМУС

Я только имею в виду, что и в классической физике существуют парадоксы и другие вещи, которые с трудом укладываются в общие представления.

Например, Вы можете объяснить мне, как необратимость жизненного цикла живых существ совместима с обратимостью законов движения классической механики? Вы можете сказать, какова температура четырех атомов?

КАНДИДО

Существует недопонимание, которое просто является следствием недостатка осведомленности. Я вижу общую картину, детали ускользают от меня, но у меня такое чувство, что если бы я посвятил себя этому, то мог бы постепенно обогатить свое представление о глобальных качественных проблемах и сделать его более точным. Так бывает, например, когда врач объясняет мне, почему рано или поздно мы вынуждены сделать выбор между жирной пищей или вином и здоровьем: даже не вдаваясь в детали химии или физиологии, мне кажется, что я могу следить за его рассуждениями и что, приложив немного усилий, я мог бы также понять и технические аспекты. То же самое произойдет, если врач будет объяснять мне качественные стороны закона тяготения. Но когда тот же самый врач говорит мне, что электрон находится в двух различных местах в одно и то же время, у ме-

¹⁵Paolo Bozzi, *Fisica Ingenua*, Garzanti, 1990.

ня возникает чувство, как будто я столкнулся с чем-то, что отделено от всех мыслимых категорий, к которым я привык относить различные типы знаний.

АКАДЕМУС

Если под *пониманием* Вы подразумеваете *упрощение до категорий классической физики*, то я не удивлен, что Вы находите квантовую теорию, которая весьма далека от таких категорий, непостижимой.

КАНДИДО

Я не обращался к категориям классической физики, я обращался к категориям мышления. Беспокойство, на которое ранее указывали Шрёдингер и Магрис, исходит из ощущения столкновения *не с чем-то, чего я не знаю, а с чем-то несовместимым с моим образом мышления.*

АКАДЕМУС

Может показаться, что под *пониманием* какой-либо физической теории Вы имеете в виду сравнение ее познавательных возможностей для некоторых категорий человеческого знания. Должен сказать, что это кантианская точка зрения. Но Вы, конечно же, не можете построить связную физическую теорию так, чтобы она подчинялась категориям Канта.

КАНДИДО

Тем не менее Вы не можете отрицать, что физическую теорию, нарушающую один из основных законов мышления, такой как непротиворечивость, гораздо труднее понять, чем другие, которые зиждятся на традиционных категориях мышления.

БРАУН

Некоторые аспекты [квантовой] теории кажутся похожими на волшебство; они оспаривают справедливость не только законов классической физики, но даже и простой логики. В обыденном мире, например, существование является определенным понятием; предмет существует или не существует — либо одно, либо другое. Но квантовая теория утверждает, что нечто может существовать и не существовать в одно и то же время¹⁶.

АКАДЕМУС

Вы ведь не говорите, что квантовая теория или ее интерпретация противоречива?

КАНДИДО

Я говорю, что они хотят навязать мне противоречивый взгляд на объекты природы.

¹⁶Malcolm W. Browne, *Quantum Theory: disturbing questions remain unsolved.*

АКАДЕМУС

Мы предпочитаем говорить *комплиментарный* вместо *противоречивый*.

Но прежде, чем мы начнем анализ этого понятия, скажите, Вы уверены, что оно того заслуживает? Чего ради неспециалист должен тратить свое время на вопрос, который даже среди физиков и математиков интересует лишь незначительное меньшинство?

КАНДИДО

Дело в том, что для того, чтобы объяснить эту проблему, которая кажется частной, придется столкнуться с вопросами, которые являются гораздо более общими: как научные теории изменяют наш взгляд на мир? Разве возможно, чтобы профессия как таковая, вмещающая интеллект и компетентность, редко сочетавшиеся в истории человечества, оказалась полностью несостоятельной? Какова роль исторических предрассудков в образе действий ученого, пытающегося преодолеть концептуальные проблемы и противоречия, которые иногда возникают из его профессиональных исследований, и, если были ошибки, какие перспективы открывает их преодоление для науки и философии? Действительно ли мы уверены, что в своих популярных публикациях ученые не придерживаются строгого написания формул и изложения теорем, которые они соблюдают в профессиональных статьях? Правда ли, что современная наука страдает врожденной и опасной философской незрелостью? И правда ли, что философы, занимающиеся наукой, вместо энергичного вторжения в это поле, находятся в замешательстве и парализованы массой формул? Какой могла бы быть в настоящее время подходящая роль для философии природы?

Я хотел бы заняться этими и другими вопросами, но только не в их предельном обобщении, поскольку велик риск возникновения путаницы и нагромождения чисто словесных конструкций. Имитируя научный метод, в котором унифицирующая сила общих идей постепенно появляется из анализа специфических проблем, я хотел бы пригласить тех, кто будет заинтересован и достаточно терпелив, продолжить чтение, *следуя за нитью этих общих вопросов с помощью анализа частной проблемы: проблемы интерпретации квантовой механики.*

АКАДЕМУС

Ваши вопросы слишком точны и поэтому не являются философскими; навивные ученые с их страстным желанием разрешать проблемы заканчивают тем, что интересуются лишь проблемами, которые имеют решение и поэтому теряют связь с философией, цель которой, напротив, заключается в посвящении себя проблемам, не имеющим решения.

КАНДИДО

Действительно, ни один научный результат не может решить философскую проблему, но верно также и то, что неправильно интерпретированный научный результат может привести к большой путанице в философии.

1.2. Четыре причины неудовлетворенности

КАНДИДО

Я думаю, что помимо основной критики, которую Магрис обозначил в начале нашей дискуссии, неудовлетворенность современной интерпретацией квантовой теории имеет четыре причины.

- 1) Неудовлетворенность идеями, вытекающей из принципа неопределенности Гейзенберга, и заключающейся в том, что наш наиболее глубокий уровень знаний о явлениях природы должен быть статистическим. Какие выводы мы можем сделать, если глубочайший уровень описания природы человеком является, в соответствии с этим принципом, статистическим? Может быть, сами законы природы должны быть статистическими? Или они также могут быть детерминистскими, но детерминизм этот должен быть доступен человеческому познанию?
- 2) Неудовлетворенность утверждением, что квантовая теория заставляет нас отказаться от понятия объективной реальности, независимой от наблюдателя. Этот отказ, помимо того, что он является обременительным с психологической точки зрения, ставит интерпретацию квантовой теории в противоречие с нашей экспериментальной перцепцией макромира и, что еще хуже, с некоторыми основными постулатами релятивистской теории, такими как локальность и причинность. Интересно, являются ли эти противоречия в оценке реального мира просто следствием интерпретации, или же их можно наблюдать экспериментально?
- 3) Неудовлетворенность квантовой теорией измерений. Трудно согласиться с идеей о том, что природные объекты существуют только виртуально и переносятся в область реального лишь при появлении внешнего наблюдателя.
- 4) Неудовлетворенность неинтуитивным характером математической модели теории: почему состояния физической системы должны описываться такими сложными волновыми функциями? Каким образом эти

сложные математические выражения связаны с физической реальностью?

АКАДЕМУС

Действительно, вряд ли можно избавиться от формулирования специфической квантовой интуиции и заменить ее классической даже среди физиков-профессионалов. Наоборот, большинство активно работающих физиков предпочитают использовать модели, основанные на так называемом *интеграле Фейнмана* (Feynman's path integral), который и сегодня продолжает оставаться очень мощным эвристическим инструментом, поскольку, основываясь на известных элементах классической механики, *обращается к интуиции*, но благодаря искаженным техническим свойствам¹⁷ он не может стать столь же мощным математическим инструментом, как, например, интеграл Вигнера, благодаря которому он и появился.

Квантовая физика превосходит классическую, но интуиция физиков все еще основывается на классической физике.

КАНДИДО

Все это совершенно правильно, но мы не должны забывать, что современная геометрия превзошла геометрию Евклида, однако мы стремимся *рассматривать* эти неевклидовы пространства скорее как множество *маленьких кусочков* евклидовых пространств, которые состыкованы вместе, образуя нечто, что в целом уже не является евклидовым. В этом смысле формирование абстрактной интуиции геометра базируется на классической евклидовой геометрии. То, что мы называем *интуицией*, является *исторической* категорией, а не *логической* или *физиологической*. *Преодоление предрассудков интуиции с помощью разума является сутью науки*. С другой стороны, уж если абсолютно необходимо что-то исследовать, так это интуицию.

АКАДЕМУС

То, что сегодня кажется современным физикам и математикам *интуитивным*, показалось бы ужасно абстрактным физикам или математикам XVIII в. Долг науки не подтверждать старую интуицию, а создавать новую. Если теория работает очень хорошо и позволяет нам открывать глубокие и полезные вещи, каков смысл разговоров об *антиинтуитивности*?

Если природа сотворена определенным образом, Вы должны адаптировать Вашу интуицию к ее законам, и нет причин жаловаться, что такие законы плохо подходят Вашей интуиции.

¹⁷Появление *бесконечной массы*, невозможность перехода к пределу под знаком интеграла...

КАНДИДО

Боже избави спрашивать Творца о его хитростях. Но по-моему, если мы продолжаем использовать модель, которую не понимаем, наука кончается, засыхая на корню.

АКАДЕМУС

Как Вы можете говорить о *модели, которую мы не понимаем*? Тысячи физиков и инженеров используют ее каждый день, и количество результатов, которые они продолжают получать благодаря ей, таково, что говорить о непонимании просто странно.

КАНДИДО

Непохоже, что я единственный, кто думает так...

БЕЛЛ

... Несмотря на неясность основ квантовой механики, наши теоретики беспрепятственно преодолевают это... подобно лунатикам¹⁸?

КАНДИДО

Существует множество отличий между *использованием* (каким бы выгодным оно ни было) и *пониманием*. Вы можете научить кого-то нажимать на клавиши клавиатуры компьютера для того, чтобы управлять программой, и это будет полезно. Совсем не обязательно, чтобы этот человек имел общее представление о структуре программы, которую он использует. Она может быть *полезной*, но *непонятной*. Мы можем говорить о *понимании*, когда математическая модель *следует* и каким-то образом однозначно определена физическими требованиями.

АКАДЕМУС

Я вижу, что Вы хотите поговорить об аксиоматике. Аксиомы являются **формулировками** основных принципов, на которых базируется теория, и процесс дедукции показывает, что исходя из этих принципов можно построить математическую модель. В квантовой теории много аксиоматики, Вы только должны сделать выбор... Мы, физики, смотрим на них несколько свысока: возможно, это лишь утонченные, но формальные игры, лишенные сколь-нибудь существенного интереса. Мы оставляем их математикам или тем из нас, кто хочет сменить работу.

КАНДИДО

Почти вся эта аксиоматика (за исключением одного варианта, о котором мы будем говорить позже) использует постулаты, которые нельзя физически интерпретировать так, что утверждение о том, будто модель была выведена

¹⁸Phys. Rep. 137 (1986), pp. 7-9.

путем *дедукции* из физических условий, ничего не значит. Поэтому, если до сих пор Вы все еще не можете *определить* структуру модели, которую Вы используете ежедневно, исходя из физических соображений, т. е. исходя из гипотез о природе, это означает, что Вы не вполне ее понимаете.

АКАДЕМУС

Повторяю, этот тип *формального понимания* не интересует физиков.

КАНДИДО

Не понимаю, что является *формальным* в попытке идентифицировать и объяснить те гипотезы о сути природы, благодаря которым появилась математическая модель, каковую Вы продолжаете использовать и в чьей пользе никто не сомневается.

АКАДЕМУС

Эта попытка может касаться философии, но вовсе не физики. Я уже говорил Вам, что серьезные физики не интересуются подобными вещами.

ПАРИЗИ

В настоящий момент исследования в этой области ведутся не очень интенсивно, как вследствие отсутствия новых идей, так и из-за эпистемологического характера вопроса, а также по причине невозможности осуществления эксперимента, который бы проверил интерпретацию и таким образом определил, какая интерпретация верна¹⁹.

КАНДИДО

Я не понимаю этого заявления: после того как большинство физиков в течение ряда лет провозглашали всем и вся и учили поколения студентов, что ортодоксальная интерпретация квантовой физики является *единственной* соответствующей имеющимся экспериментальным данным, теперь они говорят о *невозможности постановки эксперимента с целью проверки правильности интерпретации*, не объясняя, почему тезис, так авторитетно и в течение многих лет провозглашавшийся, оказался неверным, и почему эксперименты, имеющие отношение к квантовой теории, все еще финансируются сегодня.

АКАДЕМУС

Из того, что Вы говорите, создается впечатление, что Вы бы их не поддерживали, если бы это зависело от Вас.

КАНДИДО

Напротив, необходимо, чтобы важные физические результаты были подтверждены множеством экспериментов, подобно тому, как важные теоремы

¹⁹G. Parisi, *Fisica Contemporanea*, in *Enciclopedia delle Scienze Fisiche*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Vol. II (1993), entry: *Fisica*.

имеют много доказательств. Я просто хотел бы, чтобы было как можно меньше торжественных речей, сенсаций и больше строгости в интерпретации этих экспериментов.

АКАДЕМУС

Многие физики в последние годы заявляли о том, что они проводят эксперименты с целью проверки ортодоксальной интерпретации квантовой теории. В свою очередь, такая интерпретация создавалась на основании обработки экспериментальных данных, которые были многократно подтверждены. В этом смысле мы говорим, что значение данной интерпретации может быть подтверждено.

КАНДИДО

А что если кто-нибудь показал, что это доказательство неверно?

АКАДЕМУС

Для того, чтобы сделать это, ему были бы нужны совершенно новые идеи по сравнению с теми, что существуют в течение многих лет. Но, как Вы только что слышали, некоторые жалуются на отсутствие новых идей.

КАНДИДО

Иногда *отсутствие идей* путают с *незнанием* таких идей. Но допустим, кто-то доказывает, что весь сложный аппарат квантовой теории является следствием нескольких важных с физической точки зрения допущений и что утверждение о том, что *ненаблюдаемые объекты не существуют*, отсутствует среди этих допущений. Будет ли этого достаточно для того, чтобы развенчать мистическую ауру и те метафизические суперструктуры, которые были возведены вокруг этой теории?

АКАДЕМУС

Я не думаю, что это даст нам какое-либо преимущество... Однако для того, чтобы это сделать, было бы необходимо предпринять *чрезвычайно интенсивное исследование в этой области*, какового не наблюдаю ни я, ни мои коллеги...

КАНДИДО

Разве привычка учить тому, что *ненаблюдаемые предметы не существуют*, не приведет Вас к рассмотрению в качестве несуществующих тех вещей, которых Вы не видите? Разве Вы, будучи столь заняты, показывая, что то, что Вы делаете, — важно, не рискуете, что у Вас уже не хватит времени и интеллекта для понимания важных вещей?

Я бы на самом деле хотел знать, действительно ли современные физики перестали интересоваться проблемой интерпретации квантовой теории,

потому что они решили эту проблему, или они просто *спрятали скелет в шкаф* и выбросили ключ.

АКАДЕМУС

Что за вопрос! Все знают, что проблема давно решена. Спросите любого из моих коллег и Вы увидите, что он очень скоро скажет вам решение. Если Вы не хотите разговаривать, прочитайте книгу или статью. Вам нужно только сделать выбор в огромном количестве литературы по этому вопросу.

ДЖЕЙНС

Сторонники копенгагенской интерпретации выставляли напоказ необычайную самоуверенность в правильности своей позиции, но это не избавило их от необходимости предоставить всем остальным какое-либо рациональное объяснение отсутствия трудностей²⁰.

КАНДИДО

Я пытался читать много книг и расспрашивать многих людей. Лучшие книги на эту тему были написаны неспециалистами, которые могли, в лучшем случае, описать понятно и в доступной форме различные точки зрения, однако были не в состоянии отойти от нейтральной позиции, которая ставит на один и тот же уровень реальные, но незначительные явления и глубокие замечания, несерьезные метафизические предположения и важные экспериментальные открытия, концептуальный анализ и историографические анекдоты.

Я был обескуражен тем, что во многих книгах отсутствует компромисс между массой утверждений и их обоснованием, а также совершенно непостижимым количеством символов, столкнувшись с которыми я не переставлял удивляться: *предположим, я пытаюсь сам из них выпутаться, но насколько больше я узнаю об этом потом?* Если вместо этого обратиться к разговорам, происходит именно то, о чем Вы мне говорили: каждый утверждал, что проблемы не существует и подробно объяснял почему.

АКАДЕМУС

Так что же Вам еще нужно?

КАНДИДО

Проблема в том, что я получил почти столько же противоречащих друг другу ответов, сколько людей я спрашивал. Похоже, каждый эксперт соглашается с тем, что проблема решена. Но объяснения кажутся противоречивыми и взаимоисключающими. В результате я запутался еще больше. У меня создалось впечатление о наличии множества разношерстных точек зрения с довольно

²⁰E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley (1990), p. 385.

редкими попытками взаимодействия или хотя бы контактов. В нескольких случаях абстрактный и сложный математический формализм, на мой взгляд, был оправдан поспешным и подчас достаточно поверхностным концептуальным анализом, как если бы исследования основ были всего-навсего предлогом для доказательства математических теорем, а не наоборот, математика являлась инструментом для того, чтобы сделать идеи более понятными.

АКАДЕМУС

Интересно, с кем Вы разговаривали? Большинство ученых имеет довольно точное мнение по этой проблеме и, конечно же, не случайно в этом пункте было достигнуто всеобщее согласие.

Д'ЭСПАНЬЯ

... некоторые противоречащие друг другу утверждения до сих пор продолжают публиковаться самыми квалифицированными физиками²¹ ...

ДЖЕЙНС

... Все эти годы мне казалось очевидным вследствие тех же причин, что и Эйнштейну и Шрёдингеру, что копенгагенская интерпретация перегружена противоречиями и иррациональностью и что в то время как теоретическая физика может естественно развиваться в направлении математической детализации и вычислительной техники совершенно не остается надежды, что можно будет добиться дальнейших успехов в понимании природы на базовом уровне до тех пор, пока не разъяснится вся эта путаница с концепциями²².

КАНДИДО

Большинство, точки зрения, путаница ... Я не понимаю, к чему это. Надеюсь, в наше время научные истины не доказываются путем демонстрации их на пальцах! Разве не достаточно *точных экспериментов и строгих рассуждений* для того, чтобы решить, кто прав и кто ошибается?

АКАДЕМУС

Ваш взгляд на науку действительно наивен, я бы назвал его *древним галилеевым* взглядом. Современная научная эпистемология гораздо более рафинированная.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что молодых людей больше не учат, что при помощи *точных экспериментов и строгих рассуждений* можно отличить правильную теорию от неверной?

²¹ B. d'Espagnat, *Conceptions de la Physique contemporaine*, Hermann, 1965, p. 11.

²² E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley (1990) p. 385.

АКАДЕМУС

Мы просто стали более внимательными и более утонченными. Кроме того, сам Галилей...

КАНДИДО

Но когда Галилей вел дискуссию с приверженцами аристотелизма и их последователями в научном мире, ему было абсолютно ясно, кто прав, а кто ошибается. Он думал, что они сами построили мир, в котором *управление* знанием стало полностью доминировать над его *формированием*, со всеми очевидными последствиями тех напутствий, которые молодые люди получали в самом начале изучения наук.

Он набросился на тех, кто ошибочно принимал неясность и жаргон за глубину; на тех, кто научился использовать, до определенной степени успешно, методики, разработанные предыдущими поколениями, но управлял машиной, не интересуясь самой машиной; на тех, кто с отношением, присущим скорее торговцам, нежели ученым, собирал золотые яйца, не любознательствуя, из чего сделана курица, которая их снесла. *Они предвидели и использовали, но не понимали...*

Короче говоря, он набросился на современных ему *управленцев знания*, которых он обвинял в использовании академического права саморегуляции для того, чтобы делать в своем микромире то, в чем они громко обвиняли политиков макромира.

АКАДЕМУС

Вы совершенно правы! Научный мир во времена Галилея действительно имел все эти недостатки. Нам повезло, что в наше время эти проблемы больше не существуют...

Однако то, что произошло в течение последних нескольких лет с проблемой интерпретации квантовой теории, можно объяснить с вашей примитивной эпистемологической точки зрения: новые теоретические результаты пролили свет на эту проблему, показав возможность постановки новых экспериментов. Такие эксперименты были выполнены и предсказания квантовой теории, вне всяких сомнений, подтвердились.

КАНДИДО

Что подтвердилось, предсказания теории или ее современная интерпретация?

АКАДЕМУС

Я не понимаю, как Вы можете разделять эти две вещи: ведь очевидно, что предсказания делаются на основании интерпретации теории.

КАНДИДО

Это правда, но в любой науке, изучающей природу, имеется два типа утверждений: один тип касается результатов возможных измерений, другой — глобального взгляда на ту часть природы, которая является предметом изучения этой науки. В случае квантовой механики я вполне удовлетворен результатами первого типа и совсем не удовлетворен результатами второго типа.

АКАДЕМУС

Другими словами, Вы признаете ценность предсказаний квантовой теории, изобилие и глубину открытий, сделанных с использованием этой теории, прикладное и технологическое значение этих открытий. Вместе с тем, Вы заявляете о своей неудовлетворенности сегодняшним состоянием физики в части неспецифического глобального взгляда, который Вы каким-то образом, каким — я не могу пока уловить, связываете с интерпретацией этой теории.

Вам не кажется, что Вы сворачиваете с пути ясности и понимания, которым отмечены или должны быть отмечены научные споры, и удаляетесь в туманное болото философии?

КАНДИДО

Мои размышления вызваны именно стремлением к ясности и рациональности. Мне кажется, что строгие кодификации ограничивают направление мысли, которая иначе могла бы развиваться быстро и гармонично.

АКАДЕМУС

Опять неясность! Кажется, что Вы ходите вокруг предмета, не имея мужества добраться до его сути. Вам представляется, что в современной интерпретации квантовой теории существуют некоторые трудности. Не могли бы Вы уточнить природу этих трудностей?

КАНДИДО

Слово *трудности* кажется мне эвфемизмом. Скажем, я был бы очень рад, если бы кто-нибудь мог помочь мне ответить на следующие вопросы:

ВОПРОС (I)

Правда ли, что утверждение: *свойства вещей объективно, независимо от наблюдателя, не существуют*, а присутствуют только виртуально, становясь действительными в момент измерения — допускается преобладающей интерпретацией современной физики?

ВОПРОС (II)

Предположим, ответ на ВОПРОС (I) утвердительный, на каком экспериментальном доказательстве это утверждение базируется?

ВОПРОС (III)

Правда ли, что из этого утверждения можно вывести заключения, которые противоречат некоторым основным принципам современной физики?

ВОПРОС (IV)

Допустим, экспериментальные данные имеют значение, упомянутое в ВОПРОСЕ (II), уверены ли мы, что нет иных способов интерпретации этого экспериментального доказательства, менее болезненных, чем отрицание объективной реальности или других основных физических свойств?

АКАДЕМУС

Какой угрожающий тон! Вы случайно не обвиняете нас? Мы не собираемся принимать обвинения, особенно от человека, подобно Вам находящегося вне нашего круга: если даже и есть небольшие проблемы — никогда не ворошите грязное белье публично.

ПОППЕР

...Я бы хотел сказать о причинах моей критики некоторых физиков, в отношении которых я испытывал чувство глубокого восхищения.

Возникла очень серьезная ситуация. Общая антиреалистическая атмосфера, которая стала одной из самых больших угроз нашего времени и с которой должен бороться каждый мыслитель, заботящийся о традициях нашего общества, привела к весьма тревожному падению уровня научных споров. Она целиком связана с трудностями теории, или скорее даже не столько с трудностями самой теории, сколько с трудностями новых методов, грозящих поглотить теорию. Она возникла среди замечательных молодых физиков, которые гордились своим владением техникой и смотрели свысока на нас, любителей, которые должны были много работать для того, чтобы понять, о чем они говорят и что делают. Ситуация стала угрожающей, когда такое отношение застыло в виде некоего профессионального ярлыка.

Но самые великие среди современных физиков никогда не принимали такого подхода. Это относится к Эйнштейну, Шрёдингеру, а также к Бору. Они никогда не гордились своим формализмом, но всегда оставались исследователями, слишком хорошо сознающими глубину своего невежества²³.

АКАДЕМУС

Это провокация — приписывать метафизические утверждения физике, науке, которая больше чем какая-либо другая способствовала преодолению догматизма и плохой метафизики, а также обеспечивала научные идеи экспериментальными данными и непрерывной конфронтацией теории с внешним миром.

²³К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 162.

КАНДИДО

Дело не в провокации, а в истории нашего века, нашего времени.

АКАДЕМУС

Неплохое самомнение, однако!

КАНДИДО

Думаю, Поппер ссылается на тот факт, что не только множество точек зрения внутри научного мира, но также и неспособность отделить концептуальные аспекты дискуссии от трудного математического формализма или от знания физических явлений, слишком далеко отстоящих от повседневного опыта, несомненно внесли вклад в стремление держать этот вопрос вне поля зрения неспециалистов, мешая, таким образом, квантовой идее о сути природы глубже проникнуть в современную культурную сеть.

АКАДЕМУС

И как же Вы собираетесь выходить из этого *тупика*, позвольте Вас спросить?

КАНДИДО

Думаю, необходимо предпринять попытку, нацеленную, с одной стороны, на *воссоздание отношений между активным исследованием и изучением фундаментальных основ*, с другой стороны, на преодоление чисто языковых препятствий, обескураживающих тех, кто, хотя и не вовлечен в научное исследование, но может быть заинтересован в понимании по крайней мере качественных аспектов квантовой революции и поэтому готов к необходимым интеллектуальным обязательствам.

АКАДЕМУС

Многие пытались выполнить эти обязательства. Что, на Ваш взгляд, может оптимизировать Вашу попытку, или, по крайней мере, в чем ее отличие от предыдущих?

КАНДИДО

Первым шагом могло бы стать повышение *концептуальной строгости* в отношении способа оформления концепций, анализа их взаимоотношений и критики (т. е. разделения аспектов представления о мире от предрассудков) в сравнении с *формальной строгостью*, связанной с математическим языком или знанием специальных экспериментальных фактов.

Такое повышение не только позволило бы увеличить степень коммуникабельности научного обсуждения *и внешнего мира*, но также могло бы сыграть разъяснительную роль в ходе дискуссии внутри самого научного мира.

Действительно, изучение классической научной мысли демонстрирует нам, что максимальный расцвет, даже на техническом уровне, достигался в те периоды, когда было возможно установить правильное соотношение между словесной и технической активностью, а не тогда, когда это соотношение было нарушено в пользу одной из них.

АКАДЕМУС

Мне кажется совершенно неправдоподобным то, что научное исследование может извлекать какую-то пользу из анализа, который даже Вы признаете чисто концептуальным и философским. Кроме того, квантовая теория добилась такого успеха, что никто не ожидает, по крайней мере в ближайшем будущем, что выдвинутые ею концепции радикально изменятся.

КАНДИДО

Я действительно не ожидаю этого. Я убежден, что это одно из самых крупных достижений человека. Однако что-то *должно* измениться в ее интерпретации.

АКАДЕМУС

Ваша позиция стерильно чиста. Предположим, гипотетически, что большинство отцов теории согласились с Вами. Как Вы думаете, что они должны делать?

Должны ли они перестать интересоваться физикой до тех пор, пока проблемы интерпретации квантовой теории не будут решены? Где бы была сейчас физика, если бы мы действовали таким образом, или если бы до нас это сделали ученые, которым пришлось столкнуться с концептуальными трудностями, связанными с действием закона Ньютона на расстоянии, или со значением *бесконечно малых величин* в возникшем впоследствии математическом анализе?

КАНДИДО

Возможно, аналогия между точкой зрения, которую принимает большинство современных физиков в отношении основ квантовой теории, и точкой зрения, принятой большинством математиков XVIII в. в отношении развивавшегося математического анализа, чьи основы казались подорванными проблемами, возникавшими в то время из-за плохого определения концепции *бесконечно малой величины*, может действительно оказаться полезной для объяснения того, что я имею в виду. Такая позиция сформулирована в знаменитом высказывании Д'Аламбера: *Calculez, calculez, la foi vous viendra*²⁴, в котором четко провозглашается не только идея о том, что чрез-

²⁴Считайте, считайте — вера придет. — Прим. перев.

вычайно успешная теория — каковой раньше являлся анализ, а теперь — квантовая теория — не может быть беспочвенной, но также и твердая вера в то, что в некоторых случаях для разъяснения основ теории общее развитие, усиление и дифференциация ее методов и применения могут быть гораздо более полезными, чем непосредственные нападки на проблему фундаментальных основ.

АКАДЕМУС

Так на что же Вы жалуетесь? Как история доказала правоту математиков XVIII в., так она докажет и правоту физиков XX в.

КАНДИДО

Да, но для того, чтобы это произошло, современные физики должны, наконец, встретиться лицом к лицу с проблемой и избавиться от неясности, путаницы, противоречий и, особенно, идеологии. Сделать именно то, что сделали математики XIX в. для математического анализа.

АКАДЕМУС

Какие, по Вашему мнению, преимущества может извлечь активное исследование из такого философского анализа, который Вы предлагаете?

КАНДИДО

Я ожидаю, что, поскольку второй период расцвета математического анализа начался под знаменем рационального объяснения тех концепций предела, сходимости, бесконечно малых величин, которые Д'Аламбер призывал использовать, не подвергая их убийственной критике, также и в квантовой теории преодоление стадии простого *использования с последующим подтверждением результатов* и возникновение более глубокого понимания отношений между математической моделью и физической реальностью может привести к новому расцвету самой теории.

АКАДЕМУС

Надежда, достойная похвалы. Однако Вы действительно думаете, что такой процесс понимания может происходить вне специальных обзоров и конгрессов специалистов?

КАНДИДО

Я в этом полностью уверен, потому что важная часть этого понимания обязательно должна касаться той *пограничной зоны*, где научный язык сливается с обыденным языком и вносит вклад в создание тех концепций и программ, которые, хотя и не являются чисто научными, оказываются под воздействием развития науки, как это доказал И. Лакатос²⁵.

²⁵См.: *Critica e Crescita della Conoscenza*, a cura di G. Giorello, Feltrinelli, 1976.

АКАДЕМУС

Нельзя идти по этому пути. Он настолько же благороден, насколько абстрактно утопичен.

КАНДИДО

Что же так утопично в моем предложении?

АКАДЕМУС

Утопична возможность связи с повседневным языком, проглядывает один из наиболее отчетливых аспектов современной исторической ситуации, т. е. все возрастающая открытость по отношению к языкам. Утопично то, что *пограничная зона*, о которой Вы говорили, существует лишь в Вашем сознании, поскольку эта открытость не вытекает из привычек и стиля специалистов, а исходит из необходимости уточнения и распространения лексикона, типичного для различных вещей (жаргон). Цена выхода из этого узкого круга специалистов неприемлема: необходимо отказаться от точности формализованного языка в пользу неясности языка повседневного . . .

КАНДИДО

Неясность, которой Вы не доверяете, свойственна не только повседневному, но и формализованному языку, чья кажущаяся научность совершенно обманчива *до тех пор, пока формулы не будут интерпретированы*.

АКАДЕМУС

Как Вы можете говорить такие вещи, когда со времен Галилея все ученые соглашались с тем, что книга Природы написана математическим языком?

С другой стороны, если вы не хотите ограничить дискуссию только специалистами, Вы не сможете использовать математический язык, и поэтому Ваше рассуждение не будет обладать точностью научного.

КАНДИДО

Хотя Галилей не указал *автора, который пишет эту книгу* (и по этому поводу последователи Платона и конвенционалисты спорят до сих пор), я не сомневаюсь относительно того, что книга Природы написана математическим языком, *но человек не думает на математическом языке*, поэтому когда мы хотим прочитать эту книгу, т. е. перевести ее на повседневный язык, мы вставляем в текст все двусмысленности и *idola fori* (предсказания), вызванные историческим размером последнего.

АКАДЕМУС

Поэтому мы должны относиться с подозрением к каждой интерпретации и ограничиваться рассмотрением только математической модели, если действительно верно, что вне ее находятся лишь двусмысленность и предрассудки.

КАНДИДО

Точность, гарантированная математической моделью, формальна, и цель ее — обеспечить внутреннюю согласованность (или, как мы говорим на нашем жаргоне, непротиворечивость) модели.

Но непротиворечивости модели недостаточно для обеспечения ее применения в физическом мире; модель Ньютона, например, не менее непротиворечива, чем релятивистская или квантовая модели. Мы не можем судить о применении модели, не столкнувшись с проблемой ее интерпретации.

АКАДЕМУС

Но если делая это, мы не сможем использовать технический жаргон, мы рискуем погрузиться в бессвязную болтовню: это хорошо для гуманитариев, искусствоведов . . . , но не для нас, ученых.

КАНДИДО

Совсем не обязательно. Точность, которую я хотел бы видеть в наших дискуссиях, не может быть полностью формализована в математической модели, именно потому, что она касается важных отношений между математическими моделями и языком и, следовательно, истории; и эти отношения не могут быть формализованы в смысле аксиоматических теорий. Короче говоря, это *точность в обращении с нестрого определенными вещами*.

Тот факт, что этот компонент научной точности скорее недооценивался, является одной из причин отсутствия баланса между техническими аспектами, с одной стороны, и историческими и анекдотическими — с другой, которое мы находим в большинстве популярных описаний проблем, касающихся интерпретации квантовой теории.

АКАДЕМУС

Однако проблемы этой теории, касающиеся того, что Вы называете *формальной строгостью* — т. е. построение математической модели и доказательство ее внутренней непротиворечивости, — были решены на ранних этапах развития теории, а именно в 1932 г.

КАНДИДО

Это верно лишь частично. Кроме того, проблемы, в которых *концептуальная строгость* должна была играть выдающуюся роль, — проблемы интерпретации и основы этой теории — в наше время все еще обсуждаются.

АКАДЕМУС

Но как эти проблемы могут кого-нибудь интересовать, если они не касаются ни использования квантовой теории в каком-либо из ее многочисленных примеров применения, ни многообразных и важных проблем, которые яв-

ляются предметом большинства самых выдающихся современных исследований?

КАНДИДО

Они касаются не исследований, а их связи с нашим концептуальным представлением о природе.

Каково на сегодняшний день состояние этих проблем? Каков их прогресс в течение более 50 лет развития этой теории? Можно ли говорить о квантовой идее природы так же, как мы говорим о механистической, энергетической, виталистической и релятивистской теориях? И если ответ на этот последний вопрос утвердительный, каковы отличительные черты этой идеи по сравнению с другими? Именно в этом смысле мы задаем вопрос: *каким образом квантовая теория изменила наш взгляд на мир?*

АКАДЕМУС

Я не согласен с тем, как вы ставите вопросы, я не нахожу их интересными, и я не вижу их связи с литературой по основам квантовой теории, которую я знаю и которой не так уж мало.

КАНДИДО

Ни один из этих вопросов не нов. Не я их выдумал. Они синтезируют проблемы, возникавшие в течение многолетних споров по проблеме интерпретации квантовой теории. Все знаменитые протагонисты современной науки — Эйнштейн, Гейзенберг, Бор, Шрёдингер — по несколько раз сталкивались с этими проблемами.

АКАДЕМУС

Тогда лучше всего поговорить с самими этими протагонистами. Это единственный путь к пониманию того, что привело...

ПУТНАМ

... почти всех физиков к тому, что они оставили поиски теории скрытых параметров²⁶ и овладели весьма интуитивной копенгагенской интерпретацией²⁷...

I.3. Что говорят физики?

КАНДИДО

Давайте начнем с того, что послушаем, что думают физики о существовании объективной реальности.

²⁶Для многих противников ортодоксальной интерпретации термин *теория скрытых параметров* является синонимом *возвращения к реализму*. Тезис, поддерживаемый в этой книге, как мы увидим, иной.

²⁷H. Putnam, *A Philosopher looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed.), *undoubtedly, Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965, item 11.

АКАДЕМУС

Помните, для того чтобы убедить меня в том, что физики не признают существование объективной реальности, не достаточно процитировать некоторые фразы отдельных, пусть и знаменитых, ученых. Общеизвестно, что у каждого человека есть свои идеи, и тот факт, что кто-то открыл нечто очень важное, вовсе не означает, что у него не может быть странных идей (я мог бы привести множество примеров...).

Более того, широко известно, что вырывая отдельные фразы из контекста, в котором они были написаны или сказаны, можно искусно манипулировать, приписывая кому угодно что угодно. Для того, чтобы убедить меня, Вы должны представить обширный и полный обзор, начиная с популярной и заканчивая философской литературой, включая обзоры специалистов, монографии, материалы конференций, учебники и даже журналы и газеты.

КАНДИДО

Надеюсь, мы можем сделать значительно больше, в том числе реконструировать те подчас невидимые нити, которые от конгрессов и специальных публикаций ведут к газетам и журналам. Часто посредством этих нитей научные идеи доводятся до сведения публики. Иногда самые крупные недоразумения превращаются в правду, а защитники разума становятся ничего не подозревающими распространителями иррационализма.

АКАДЕМУС

Да, я знаю, что такие журналисты, такие профессиональные разглашатели тайн, искажают наши идеи. Для того, чтобы заинтересовать публику, они отбрасывают базисные понятия, строят неверные сравнения, ... такая *популяризация науки*, по-моему, является фантазией.

КАНДИДО

Я читаю много книг о научных связях. Я думаю, что они не только помогают выбраться из кельи своей специальности, но также являются побудительным мотивом для специальных исследований. У меня сложилось впечатление, что в среднем они не искажают, а, наоборот, совершенно правильно демонстрируют то, что обычно предполагается в определенной области знаний. Это, по крайней мере, то, в чем я мог убедиться в отношении тех вещей, о которых могу квалифицированно судить. С другой стороны, достаточно часто у меня создавалось впечатление, что именно *эксперты* искажали смысл научного общения, пытаясь превратить его в рупор, или же обращались к отраслевым исследованиям или бунтарским точкам зрения.

АКАДЕМУС

Вряд ли люди согласятся с такими заявлениями, до тех пор пока Вы не подтвердите документально наиболее цитируемые и высоко оцениваемые точки зрения ученых и не докажете, что в таком положении они действуют не только для своей выгоды, но и в пользу профессии. Что касается статей и популярных изданий, конечно же не будет достаточно привести только две или три случайных цитаты; Вам нужно будет показать, что все профессиональные научные журналисты, интересовавшиеся этой проблемой, действовали подобно резонаторам для таких точек зрения.

КАНДИДО

А что еще они могли сделать? Профессионал в области научных связей, конечно же, не может заменить экспертов, когда дело касается содержания. Самое большое, на что он способен, так это показать различные точки зрения, но, сталкиваясь с монолитным единством, достойным бывшей советской партии, он не может, благодаря профессиональной честности, удержаться от того, чтобы не признать его. Я считаю виновными таких ученых, как Хокинг, Пенроуз, . . . , которые, хотя никогда и ничего нового в проблему фундаментальных основ квантовой теории не внесли, тем не менее решили представить популярные тексты, в которых они просто пережевывают косточки тайнам, что мало способствует развитию научной мысли.

АКАДЕМУС

Я не согласен с Вашим последним высказыванием, но мы вернемся к нему в конце нашего спора, когда придет время делать выводы (см. разд. IX.6).

КАНДИДО

Однако будет нелегко удовлетворить Ваше требование предоставить документальное подтверждение точек зрения различных ученых. Каким бы ни оказалось документальное доказательство, всегда остается вероятность того, что кто-нибудь возразит, что, насколько ему известно, физики говорят совершенно другое. Каким бы ни было новое предложение, для того, чтобы сдвинуться с этой мертвой точки, всегда найдется кто-нибудь, кто может сказать, что это предложение давно известно или даже банально.

АКАДЕМУС

Я не вижу, в чем здесь трудность: будет достаточно попросить кого-либо, делающего такое замечание, противопоставить представленному Вами документальному доказательству не пустую болтовню, а другое документальное доказательство. Другими словами, показать книги, статьи, материалы конференций . . . , где он, она или их коллеги противостоят тем аргументам, которые они критикуют.

КАНДИДО

Если Вы действительно хотите принять такую форму спора, то я уверен, что мы придем к какому-либо результату. Продолжая дискуссию, Вы должны будете проверить, каким образом некоторые идеи попадают из академических кругов в ежедневную или еженедельную прессу. Авторитет лиц, вовлеченных в дискуссию, их равномерное распределение по странам и времени в течение 70 лет, убедит Вас в том, что я прав, приписывая некоторые утверждения скорее вообще всем физикам, нежели отдельным индивидуумам. С другой стороны, новые предложения будут тщательно проанализированы суровыми и строгими критиками. Я просто прошу Вас помочь мне уберечь нашу дискуссию от того, чтобы она стала похожа на другие, где никто не хочет ничего понять, а только подтверждает теории, построенные ранее; где отсутствуют доказательства или документы, а есть только настойчивые заявления, ирония и ругань...

АКАДЕМУС

Хорошо, хорошо..., но дайте слово протагонисту...

ДАЙСОН

Микроскопическая физика... это поле, в котором догма Монода — где краеугольным камнем научного метода является постулат о том, что природа объективно существует, — не верна²⁸...

ФИНКЕЛЬШТЕЙН

То, что Гейзенберг открыл в 1935 г., можно было бы назвать необъективной физикой, одолжив термин, который Василий Кандинский придумал для своего искусства в Мюнхене несколькими годами раньше. Пример, приведенный здесь, который пытаются приписать Гейзенбергу, заключается в том, что сущности природы не имеют состояния бытия. Это основная и выдающаяся черта квантового мышления. До сих пор предпринимаются попытки принизить ее. Позвольте мне ее возвысить.

Классическое представление состоит в том, что вселенная является бытием, состоящим из отдельных частей. Это несколько сильнее утверждений копенгагенской теории, которая приписывает бытие и состояние экспериментатору²⁹.

ЖИРАРДИ

Многие ученые соглашаются с тем, что возникают трудности при попытке создать представление о мире, подразумевающее некоторую форму реализ-

²⁸F. J. Dyson, *Turbare l'Universo*, Boringhieri, 1981, p. 287.

²⁹D. Finkelstein, *Praxist Interpretation of Quantum Theory in The Interpretation of Quantum Theory: Where Do We Stand?* Acta Enciclopedica, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, 1994.

ма, которое может сделать наше знание о явлениях природы связным и последовательным³⁰.

ПУТНАМ

Копенгагенская интерпретация отрицает, что наблюдаемое имеет какую-то ценность до измерения³¹.

Д'ЭСПАНЬЯ

Утверждение о том, что две несовместимые физические величины не могут иметь точные значения в одно и то же время, проявляется в любой формулировке квантовой механики, как упрощенной, так и специальной³²...

КАНДИДО

Это утверждение кажется более техничным, чем другие. Что оно означает?

Д'ЭСПАНЬЯ

Доктрина о том, что мир состоит из объектов, существование которых не зависит от сознания человека, оказывается в противоречии с квантовой механикой и экспериментально установленными фактами³³.

ПАРИЗИ

... Не верно предположение о том, что система остается в определенном состоянии, когда ее не наблюдают³⁴.

МЕРМИН

Мы знаем, сегодня можно доказать, что даже луна не находится на своем месте, если на нее никто не смотрит³⁵.

ГРЕКО

Цена, которую платит реалист, — восстановление двусмысленности. Квантовая луна находится там только потенциально, если на нее никто не смотрит. Дорогая цена, но не неподъемная³⁶.

НИЦШЕ

... То, что вещи обладают качеством, совершенно независимым от интерпретации и субъективности, является праздной гипотезой; это означало

³⁰GianCarlo Ghirardi, *An Attempt at a Macrorealistic Quantum Worldview*, in *The Interpretation of Quantum Theory: Where Do We Stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, November 1994.

³¹H. Putnam, *A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *undoubtedly*, *Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965.

³²B. d'Espagnat, in *Dizionario Enciclopedico della Fisica*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Vol. I, 1992, entry: *completezza*.

³³B. d'Espagnat, *Scientific American* 241 (1979), pp. 128–140.

³⁴G. Parisi, *Fisica Contemporanea*, in *Dizionario delle Scienze fisiche*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Vol. II (1993), entry: *Fisica*.

³⁵N. D. Mermin, *Physics Today* 43, 6 (1990), p. 9.

³⁶Pietro Greco, *La Repubblica*, 30.03.1993.

бы, что интерпретация существования предмета не существенна, что вещь, оторванная от всех своих связей, остается вещью . . .

ГЕЙЗЕНБЕРГ

Вещь в себе для физика, изучающего ядро, если он использует такую концепцию, не более чем математическая структура, но эта структура, в отличие от той, которую Вы видели у Канта, не напрямую выведена из опыта³⁷.

ФАЙН

Реализм мертв . . . Его смерть была ускорена дискуссиями по интерпретации квантовой теории, где нереалистическая философия Бора превалировала над страстным реализмом Эйнштейна³⁸.

КАНДИДО

Хорошо, откровенно сказано. И как же мы пришли к такому решительному заключению?

АКАДЕМУС

Никто лучше Нильса Бора не подходит для объяснения этого. Он один из отцов не только квантовой физики, но также и господствующей в настоящее время интерпретации.

БОР

Действительно, открытие квантования не только делает видимым естественное ограничение классической физики, но проливает новый свет на старую философскую проблему объективного существования явлений независимо от наших наблюдений, ставит науку в совершенно новые условия³⁹ . . .

КАНДИДО

И каковы же *новый свет, проливающийся на старую философскую проблему объективного существования явлений, и совершенно новые условия?*

БОР

. . . Ограничение возможности говорить о явлениях как объективно существующих, наложенное на нас самой природой, находит свое выражение, насколько мы можем наблюдать, именно в формулировке квантовой механики⁴⁰ . . .

КАНДИДО

Но где возникает ограничение, на которое ссылается Бор?

³⁷W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, 1958; italian translation *Fisica e Filosofia*, Milano 1961, 1982, 1994, pp. 110–111.

³⁸A. Fine, *The natural ontological attitude*, in *Scientific Realism*, J. Leplin (ed.), University of California Press (1984), p. 83.

³⁹N. Bohr (1929), *I Quanti e la vita*, Torino, p. 22.

⁴⁰N. Bohr, *I quanti e la Vita*, Torino, 1929, p. 22.

БОР

... Мы должны совершенно отказаться от приписывания традиционных физических атрибутов микрообъектам⁴¹...

ПУТНАМ

Вместо фразы: наблюдаемое не существует до тех пор, пока не будет измерено, мы должны говорить, что в соответствии с копенгагенской интерпретацией наблюдаемые микроскопические явления не существуют⁴².

КАНДИДО

Поэтому ненаблюдаемые атомы не существуют, поскольку они микроскопические, но ненаблюдаемые столы, которые также состоят из атомов, существуют, поскольку они макроскопичны. Довольно странная, эта ваша физика!

ПОППЕР

Бор и копенгагенская интерпретация... вновь подтвердили, что электрон не может иметь в одно и то же время определенные местоположение и импульс⁴³.

АКАДЕМУС

Вы должны начать с этого момента для того, чтобы убедиться, что большинство современных физиков соглашаются с этими утверждениями Бора.

КАНДИДО

Тем не менее Бор действительно говорил очень сложно!

ВИГНЕР

Представители копенгагенской школы настолько хорошо владеют языком, что даже после того, как они ответят на Ваш вопрос, Вы не знаете, означает ли ответ «да» или «нет»⁴⁴.

КАНДИДО

Для того, чтобы понять фразу Бора, может оказаться полезным привести конкретный пример *общепринятого физического атрибута*; объясняющего, почему мы должны перестать приписывать такие атрибуты микрообъектам, но не макрообъектам, разъясняя, каким образом должно интерпретироваться это абсолютное ограничение.

⁴¹ *Atomic theory and the description of nature*, Cambridge University Press, 1934.

⁴² Н. Putnam, *A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *недостоверно, Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965.

⁴³ К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 76.

⁴⁴ Цитата из E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley, 1990, p. 386.

АКАДЕМУС

Следующий пример может устранить Ваши сомнения: рассмотрим физическую систему. Тот факт, что эта система в каждый момент имеет вполне определенное местоположение в пространстве, действительно является *общепринятым физическим атрибутом* системы. Термин *общепринятый* в данном случае означает *согласно классической физике*. Совокупность положений системы в переменный момент времени в заданном интервале называется *траекторией* или *орбитой системы* в этом временном интервале. Согласно классической физике, любая система, существующая в данном интервале времени, имеет определенную орбиту и это является *физическим атрибутом системы*. Согласно квантовой физике, напротив, микросистемы, например, электроны или фотоны, могут существовать в заданных физических условиях, при которых их положение в пространстве и, следовательно, их орбиты четко не определены и поэтому перестают быть *физическими атрибутами* системы.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

... Таким образом, физики постепенно привыкли рассматривать электронные орбиты не как реальность, а скорее как *вероятность*⁴⁵ ...

ПЬЯТЕЛЛИ-ПАЛМАРИНИ

Элементарные частицы, такие как электрон или фотон, не придерживаются реальной траектории, как пуля, а размазаны в пространстве, как если бы содержимое стакана с водой выплеснули из этого стакана⁴⁶.

КАНДИДО

Это означает, что при соответствующих физических условиях в определенные интервалы времени электрон реально *нигде не находится*, но виртуально может находиться в нескольких разных местах.

АКАДЕМУС

Точно.

КАНДИДО

Тогда, в те временные интервалы, когда электрон реально *нигде не находится в действительном смысле*, можно сказать, что он *не существует реально*, а только виртуально.

АКАДЕМУС

Если мы хотим использовать термин *существует* в его интуитивном значении, то это правда. Но, может быть, следующий пример разъяснит Вам, в каком смысле Гейзенберг использует термин *вероятность*.

⁴⁵W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, 1956, p. 182.

⁴⁶M. Piatelli-Palmarini, *La voglia di studiare*, Mondadori, 1991.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

... Давайте рассмотрим атом в закрытом ящике, разделенном перегородкой на две половины. В перегородке есть очень маленькое отверстие, сквозь которое может пройти атом. Тогда, согласно классической логике, атом может находиться либо в левой половине, либо в правой. Третьего не дано — *tertium non datur*. Однако в квантовой теории мы должны допустить — предположим, мы хотим использовать термины *атом* и *ящик*, — что существуют другие возможности. Это необходимо для того, чтобы объяснить результаты наших экспериментов⁴⁷.

КАНДИДО

Понимаю, Вы полагаете, что я не могу знать определенно, в какой из двух половин ящика находится атом, в то время как единственное, что я могу сделать, — это подумать о *вероятности* его нахождения в той или другой половине.

АКАДЕМУС

К сожалению, все не так просто. Ситуация, которую Вы рассматриваете, является типичной для классической физики, когда атом всегда находится в одной и только в одной половине ящика, но я не знаю, в какой именно. Ситуация, которую рассматривал Гейзенберг, гораздо глубже и не имеет эквивалента в классической физике.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

... Вопрос о том, находится ли атом в левой или правой (половине ящика), не решается. Но термин *не решается* ни в коем случае не эквивалентен термину *не известен*. Термин *не известен* означал бы, что атом *действительно* находится справа или слева, но только мы не знаем, где он. Но *не решается* означает иную ситуацию, которую можно выразить только при наличии комплиментарного утверждения⁴⁸...

АКАДЕМУС

Иная ситуация, комплиментарная ситуация, на которую ссылается Гейзенберг, на научном жаргоне называется *состояние суперпозиции в отношении наблюдаемого положения*. Это то же самое, как если бы в случае с атомами в ящике сказать, что электрон потенциально находится в двух ящиках, но в действительности его нет ни в одном.

Ситуация, которую Вы рассматривали, когда говорили, что атом всегда находится в одной из двух половин ящика, но я не знаю, в какой, и поэтому

⁴⁷W. Heisenberg, *Fisica e Filosofia*, Il Saggiatore, 1963, 2nd ed., p. 181–182.

⁴⁸W. Heisenberg, *Fisica e Filosofia*, Il Saggiatore, 1963, 2nd ed., p. 182.

могу только присудить некие шансы этим двум альтернативам, на научном жаргоне называется *смешанное состояние в отношении наблюдаемого положения*.

КАНДИДО

Но если я рассматриваю наблюдаемое, отличное от положения, имеет ли еще смысл говорить о *состоянии суперпозиции в отношении этого нового наблюдаемого?*

АКАДЕМУС

Конечно же имеет: задавая какую-нибудь наблюдаемую величину, всегда можно определить *состояние суперпозиции* в отношении этой величины. Чтобы быть точными, мы не должны говорить в общем *состояние суперпозиции*, а скорее *состояние суперпозиции в отношении данного наблюдаемого*.

КАНДИДО

А является ли интерпретация этого состояния такой же, как и в том случае, когда рассматриваемый нами объект наблюдения не может принимать ни одно из своих значений?

АКАДЕМУС

Точно такой же.

ЖИРАРДИ

Состояние суперпозиции является странным состоянием; состоянием, в котором фотон не находится ни в одном из возможных мест (кроме того, он не имеет определенной поляризации). Это нечто, что естественным образом существует вне нашего повседневного опыта в отношении макроскопических тел⁴⁹.

КАНДИДО

Тогда понятно, что, когда Бор, Гейзенберг, ... говорят об *ограничениях объективного существования* физической системы, о ее *виртуальном существовании* ..., они имеют в виду именно эти состояния суперпозиции: *физическая система, находящаяся в состоянии суперпозиции с точки зрения наблюдаемого объекта, объективно не существует, а существует только виртуально*.

АКАДЕМУС

Конечно: наличие местоположения является частью объективных свойств атома, его *физической реальности*. Говорить о том, что атом больше не имеет местоположения, означает, что он больше не существует как атом. Как

⁴⁹In *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di Divulgazione, CUEN (1995), p. 18.

Вы правильно заметили, если мы заменим местоположение какой-либо другой наблюдаемой величиной, т. е. каким-то другим объективным свойством атома, будут верны те же самые выводы.

Именно в этом смысле Гейзенберг ранее говорил о *вероятности* вместо *реальности*, когда рассматривал электронные орбиты. Именно для этого он настаивал на том, чтобы отличать ситуацию *вероятности местоположения* атома, типичную для квантовой теории, от той, знакомой и классической физики, когда атом в действительности находится где-то, но мы не знаем, где.

ПЬЯТЕЛЛИ-ПАЛМАРИНИ

В интерпретации, предложенной Дираком, одна и та же частица в одно и то же время находится с различной вероятностью в разных местах. Так, как если бы я находился в этот самый момент *одновременно* здесь, с вероятностью 80%, и в Нью-Йорке, с вероятностью 10%, а *также* в Стэнфорде, тоже с вероятностью 10%.

Дженни начал думать, что Дирак был немного сумасшедшим.

Билл, поскольку ты сейчас *находишься* здесь, я думаю, что ты на все 100% здесь и на 0% где-то еще. Я не прав?

Если бы мое присутствие здесь выводилось из квантового явления, Дирак не согласился бы с тем, что ты только что сказал.

Видишь ли, Дженни, твое отношение к этому — это то отношение, которое обычно проявлялось у физиков до Дирака. Но было доказано, что это неверное отношение. Одновременность нахождения в различных местах в мире частиц должна восприниматься буквально. Отдельная частица не только может находиться в один и тот же момент в разных местах, но она может *даже одновременно следовать* различными путями⁵⁰.

КАНДИДО

Теперь Вы понимаете, на что я ссылался, когда говорил о *чем-то, что выпадает из всех мыслимых категорий, к которым я привык относить различные типы знания?*

АКАДЕМУС

Давайте подведем итог: согласно общепринятой интерпретации, *смешанные* состояния и состояния *суперпозиции* в отношении различимости состояния относятся к совершенно разным физическим ситуациям: в первом случае атом находится *где-то* в ящике, но я не знаю где. Во втором случае атома *нигде нет: он не имеет определенного местоположения.*

⁵⁰M. Piatelli-Palmarini, *La voglia di studiare*, Mondadori, 1991.

КАНДИДО

В таком случае, действительно легко провести эксперимент для того, чтобы различить эти два типа физического состояния: я внезапно открою ящик. Если состояние атома было смешанным, то я должен увидеть его, поскольку он имеет местоположение. Если состояние являлось суперпозицией, то я не должен что-либо увидеть, или, может быть, я должен увидеть что-то в обеих половинах ящика, поскольку Вы сказали, что в этом случае атом не имеет фиксированного местоположения внутри ящика.

АКАДЕМУС

Вовсе нет: если Вы открываете ящик и смотрите внутрь (т.е. если Вы проводите эксперимент для проверки того, где находится атом), результаты эксперимента показывают, что атом всегда находится либо целиком в правой половине, либо целиком в левой половине ящика.

КАНДИДО

Вы действительно уверены в этом экспериментальном доказательстве?

АКАДЕМУС

Я абсолютно в нем уверен: я и все мои коллеги-физики.

КАНДИДО

Думаю, Галилей интерпретировал бы это экспериментальное доказательство как определенное указание на то, что состояния суперпозиции и способ, которым Вы их установили, не имеют какой-либо *физической реальности*, другими словами, они не существуют как *физические состояния* системы.

АКАДЕМУС

Продолжим! Все признают, что Галилей является отцом экспериментальной физики, а результаты, достигнутые в течение более 350 лет, показывают, что мы хорошо усвоили его урок. В частности, если бы у нас не было серьезных экспериментальных данных, подтверждающих физическую реальность состояний суперпозиции, мы бы никогда не приняли в нашей науке тех странных вещей, которые создали нам так много проблем с философами.

КАНДИДО

Я думал, что вклад Галилея состоял не столько в подчеркивании значимости экспериментальной базы теорий, что было известно со времен Аристотеля, сколько в идентификации теоретических аспектов экспериментов, вопреки иллюзорному желанию бесхитростных физиков *пассивно считывать* теории из экспериментальных данных.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, настало время решать второй вопрос, а именно во-

прос, касающийся экспериментального доказательства, которое привело к современной интерпретации квантовой теории.

КАНДИДО

Это именно тот вопрос, на котором я хотел бы сконцентрировать свое внимание: *каковы аргументы, вынуждающие современную физику отказаться от реалистического взгляда на мир?*

АКАДЕМУС

Давайте суммируем ответ на Ваш первый вопрос.

КАНДИДО

Он, кажется, будет утвердительным: количество и качество опубликованных высказываний, тот факт, что они никогда публично не подвергались сомнению многими солидными учеными, а также то, что они появляются во всех областях научной литературы, от популярной до сугубо научной, от исследовательских монографий до учебников, . . . все это, без сомнения, демонстрирует, что, *действительно, большинство физиков приняли теорию отсутствия существования объективной реальности, независимой от наблюдателя.*

АКАДЕМУС

Этого нельзя отрицать, но некоторые из нас склонны говорить об этом не в такой категоричной форме.

КАНДИДО

Надеяться на то, что новые эксперименты приведут нас назад к вещам, объективно существующим во времени и пространстве, в какой-то степени равносильно тому, чтобы надеяться обнаружить конец света в неисследованных районах Антарктики.

ГАЛЛИНО

Все же имеет место тот факт, что копенгагенская интерпретация была и остается, в свою очередь, предметом многих других интерпретаций, некоторые из которых действительно выражают идею о том, что материя, ткань реальности, будь она лунной или же земной, сама по себе не существует. Идея, которую, благодаря ее научной и этической интерпретации, не только папа римский считает неприемлемой.

КАНДИДО

Однако, насколько мне известно, не все физики приняли это заключение. Эйнштейн и Шрёдингер, например, не согласились с ним.

ЭЙНШТЕЙН

Существует нечто в качестве *реального состояния* физической системы, нечто, что существует объективно, независимо от какого-либо наблюдения

или измерения, которое может быть теоретически описано физическими средствами выражения... Я не стыжусь поставить эту концепцию прямо-таки в центр моих размышлений...

КАНДИДО

Если то, о чем говорит Эйнштейн, действительно выражает его мысль, нужно сделать вывод, что когда вы говорите о *большинстве*, Вы имеете в виду исключительно численный смысл. Я думаю, что мнения в науке не только просчитываются, но и взвешиваются (похоже, некоторые финансовые сферы используют этот метод при определении пая).

ФАЙН

Он (Эйнштейн) обращается к реализму как к *программе, которая была стандартной при развитии физической мысли, пока не появилась квантовая теория*⁵¹. Поэтому Эйнштейн высказывает предположение, что *программа реализма, хотя и необязательна с концептуальной точки зрения, выдержала проверку временем, и это укрепляет его уверенность в том, что она будет существовать и в дальнейшем.*

АКАДЕМУС

Эйнштейна всегда цитируют, когда критикуют современную интерпретацию квантовой теории. Но в конце концов его твердая уверенность в существовании объективной реальности была поколеблена.

ЭЙНШТЕЙН

После всего, что было сказано, *реальное* в физике надо рассматривать как какую-то программу, которую нас, однако, никто не заставляет принимать a priori (1949)⁵².

Постулат о реальном мире, существующем независимо от какого-либо действия перцепции, является для физики основным, но мы не знаем это наверняка. Мы допускаем его существование только в качестве программы в нашей научной деятельности. Эта программа, очевидно, возникла до появления науки, и наш обыденный язык уже базируется на ней⁵³...

КАНДИДО

Так или иначе, я еще не совсем понял, почему эта утрата существования связана с наблюдателем, т. е. с процессом *наблюдения или не наблюдения.*

АКАДЕМУС

Для того, чтобы разъяснить этот момент, необходимо углубиться в ответ на

⁵¹ A. Fine, *Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik*, in *Scientific Papers presented to Max Born*, Edinburgh, Oliver and Boyd, 1953, pp. 33–40.

⁵² A. Einstein, *Reply to Criticism*, Schlipp Paul A., 1949, p. 674.

⁵³ A. Einstein, *Reply to Criticism*, Schlipp, 1949.

Ваш второй вопрос, т. е. вопрос, касающийся *экспериментальных причин* изменения представления об объективной реальности.

КАНДИДО

Об этом мы еще не говорили, потому что эксперимент с атомом в ящике, описанный Гейзенбергом, также был абсолютно идеальным, а не реально выполненным экспериментом.

АКАДЕМУС

Идеальным, но не абсолютно. Действительно, если мы заменим две половинки ящика двумя щелями на экране, мы получим ситуацию знаменитого *эксперимента с двумя щелями*.

ГЛАВА II

II.1. Почему они говорят: эксперименты и суперпозиция

КАНДИДО

Надеюсь, столь авторитетное доказательство (а их будет еще больше) убедит Вас в том, что физики действительно расстались с понятием *объективная реальность* в его обычном значении.

АКАДЕМУС

Возможно, это справедливо, но что действительно не подлежит сомнению, так это то, что у них были веские причины. Причины, основанные на эксперименте!

ДЖЕЙНС

Другими словами, мы не можем сказать, что атом находится в состоянии u_1 или в состоянии u_2 , как если бы это были две взаимоисключающие возможности, или если бы вследствие нашего невежества мы не могли бы узнать, которое из двух является реальным состоянием. В некотором смысле атом должен быть в обоих O состояниях в одно и то же время. Как говорил Паули, атом сам не знает, в каком состоянии он находится. С концептуальной точки зрения это неудобная, но с экспериментальной — необходимая функция принципа суперпозиции¹.

ШИМОНИ

... Согласно квантовой механике не все качества системы имеют (определенные) значения, заданные одновременно. Возможно, лучшим примером этого утверждения является *эксперимент с двумя отверстиями*².

ФЕЙНМАН

Эксперимент с двумя отверстиями... *описан с помощью данных, полученных на втором экране, расположенном позади первого.*

КАНДИДО

Но является ли этот эксперимент реальным, выполнен ли он при помощи измерений, осуществленных на самом деле, или же это еще один идеальный

¹ E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley, 1990, p. 391.

² A. Shimony, *Scientific American*, 1988.

эксперимент, вроде того, что описан Гейзенбергом, — с двумя атомами в ящике?

АКАДЕМУС

Когда Фейнман впервые описал этот эксперимент в 50-е г., это была просто идеализация некоторых опытов по рассеянию электронов. Однако недавно данный эксперимент был выполнен именно так, как его описал Фейнман. Единственное отличие состоит в том, что в качестве частиц в нем участвовали нейтроны, а не электроны, поскольку Раух, Цейлингер и другие экспериментаторы, осуществлявшие этот опыт первыми, использовали современную технику *нейтронной интерферометрии*. Сейчас такие эксперименты весьма многочисленны.

КАНДИДО

А можно ли понять смысл эксперимента, практически ничего не зная о нейтронах и интерферометрии?

АКАДЕМУС

Конечно, как и в случае всех действительно важных концепций, основная идея этого эксперимента очень проста.

ФЕЙНМАН

Давайте начнем с анализа предположения, которое, как мы считали раньше, хорошо обосновано, поскольку эти предметы (т. е. частицы) появляются как отдельные объекты. Так как все, что появляется, всегда является целой величиной, и в данном случае это электрон, вполне разумно предположить, что он проходит либо через отверстие 1, либо через отверстие 2. Кажется совершенно очевидным, что он не может делать что-то еще, поскольку он является отдельной единицей. Я хочу отметить это предположение и назову его *предположение А*.³

Предположение А. Электрон проходит либо через отверстие 1, либо через отверстие 2.

КАНДИДО

Я понимаю, что он непременно проходит через одно из этих двух отверстий, но никогда через оба. Иначе говоря, это альтернатива эксклюзивного типа.

АКАДЕМУС

Совершенно верно. Но слушайте дальше...

ФЕЙНМАН

... Если бы то, что электрон проходит либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2, было правдой, общее число прибывших электронов состояло бы из двух частей, т. е. общее число прибывших (на второй экран) электро-

³R. P. Feynman, *La legge fisica*, Boringhieri, 1971, p. 157.

нов было бы равно количеству электронов, прошедших через отверстие 1, плюс количество электронов, прошедших через отверстие 2. Поскольку реальная кривая не может быть выражена просто как сумма двух величин и поскольку эксперименты, определяющие как много электронов пришло бы, если бы было открыто только одно отверстие, не дают результата, равного сумме двух частей, мы должны заключить, что это предположение неверно⁴...

КАНДИДО

Я не хочу прерывать рассуждения Фейнмана, но, по-видимому, решающим фактом, заставляющим его говорить, что предположение А неверно, является то, что общее число прохождений электронов, когда оба отверстия открыты, не может быть просто выражено суммой двух составляющих. В частности, при суммировании двух вкладов, относящихся к эксперименту, выполненному когда открыто только одно отверстие, мы не получим общего числа электронов, проходящих в том случае, когда открыты оба отверстия.

ФЕЙНМАН

Мы должны подразумевать, что *когда мы наблюдаем электроны*, их расположение на экране отличается от того, что имеет место, когда мы их не наблюдаем⁵.

АКАДЕМУС

Это справедливо, но это не все. Если бы все сводилось только к этому, то никогда бы не возникли проблемы, касающиеся интерпретации квантовой теории.

ФЕЙНМАН

... Если на самом деле электрон не проходит либо через первое, либо через второе отверстие, то, возможно, он может временно расщепляться на две половинки, или делать нечто подобное. Поэтому логика подсказывает нам, что *предположение А* неверно. К сожалению, а может быть и к счастью, мы можем проверить логику с помощью экспериментов. Мы должны определить, правда ли, что электроны проходят либо через одно, либо через второе отверстие, или вместо этого они проходят через оба и временно расщепляются на две части. Единственное, что мы должны сделать, так это наблюдать за ними, а для этого нам нужен свет.

Поэтому позади отверстий мы помещаем очень мощный источник света. Свет распространяется с помощью электронов, т. е. он отражается от

⁴R. P. Feynman, *La legge fisica*, Boringhieri, 1971, p. 157.

⁵R. P. Feynman, *Lectures in Physics*, Vol. III, § 1-7.

них, так что если он достаточно сильный, можно увидеть, как электроны проходят сквозь отверстие. Мы стоим и наблюдаем: если электрон регистрируется, или незадолго до того, как его регистрируют, мы можем видеть вспышку позади отверстия 1 или отверстия 2, или, возможно, нечто вроде полувспышки в обеих точках в одно и то же время. Наблюдая, мы поймем механизм. Мы зажигаем свет, смотрим и видим, что каждый раз, когда детектор считает, появляется вспышка позади отверстия 1 или отверстия 2. Что мы замечаем, так это то, что когда мы наблюдаем, электрон в 100% случаев проходит целиком через одно или через другое отверстие. Таким образом, мы имеем дело с парадоксом⁶!

КАНДИДО

Парадокс, если я правильно понял, состоит в противоречии между двумя группами экспериментальных результатов: согласно одним результатам *электрон проходит в 100% случаев целиком через одно или другое* из двух отверстий; другие результаты свидетельствуют о том, что это невозможно, иначе . . . *общее число прибывающих электронов было бы равно числу электронов, прошедших сквозь отверстие 1, плюс число электронов, прошедших сквозь отверстие 2 . . .*

АКАДЕМУС

Это одна сторона парадокса. Другая состоит в том, что единственная разница между двумя группами экспериментов заключается в том, что в первом случае я *могу наблюдать*, где проходит электрон, тогда как во втором я не знаю этого. Тогда мы должны заключить, что . . .

ФЕЙНМАН

. . . Сделать вывод, что электрон проходит сквозь одно или другое отверстие, когда никто не смотрит, равносильно ошибке в предсказании⁷ . . .

КАНДИДО

Что Вы понимаете под выражением *когда никто не смотрит*?

ФЕЙНМАН

. . . Если не предпринято никакой попытки для того, чтобы определить, через какое отверстие проходит электрон, нельзя сказать, что он должен проходить сквозь одно или сквозь другое отверстие⁸.

КАНДИДО

А может ли такой вывод быть обобщен для любого количества наблюдаемых?

⁶R. P. Feynman, *La legge fisica*, Boringhieri, 1971, p. 157.

⁷R. P. Feynman, *La legge fisica*, p. 162.

⁸R. P. Feynman, *The concept of probability in Quantum Mechanics*, p. 538.

АКАДЕМУС

Конечно. Рассматривая некоторое наблюдаемое B , с помощью рассуждений, подобных тем, что и в эксперименте с двумя отверстиями...

ФЕЙНМАН

... мы приходим к заключению, что утверждение о том, что B имеет некоторое значение, может оказаться бессмысленным, если мы не будем предпринимать попыток измерить B ...⁹

КАНДИДО

Но что означает бессмысленный?

АКАДЕМУС

Фейнман раньше уже объяснил Вам: это означает, что...

ФЕЙНМАН

Что мы должны сказать (с целью избежать неверных предсказаний), так это следующее. Если за отверстиями наблюдают, или, более точно, если имеется прибор, способный определить, проходят ли электроны сквозь отверстие 1 или отверстие 2, тогда можно утверждать, что они проходят либо через отверстие 1, либо через отверстие 2. Но когда не предпринято никаких попыток определить, в каком направлении движется электрон, когда в эксперименте нет ничего, что мешало бы электронам, тогда нельзя сказать, что электрон проходит через отверстие 1 или через отверстие 2. Если кто-то так говорит и начинает делать выводы из этого утверждения, он допустит ошибки при анализе. Эта та логическая нить, которой мы должны придерживаться, балансируя, если хотим успешно описать природу¹⁰.

ПЬЯТЕЛЛИ-ПАЛМАРИНИ

Поскольку эти идеи кажутся сумасшедшими и они противоречат самому элементарному здравому смыслу, прошло много лет, прежде чем физики были вынуждены принять их. Всего лишь несколько месяцев тому назад в Рочестерском университете два хороших экспериментатора доказали раз и навсегда, что Дирак был прав...

Берут два одинаковых лазера и устанавливают на стартовой позиции, подобно двум параллельным стволам зенитной установки. Сначала включают только один лазер и в единицу времени выпускается только один фотон, не более. Смотрят, как пленка подвергается облучению фотонами, испускаемыми лазером. Затем включают только второй лазер и смотрят, как теперь

⁹R. P. Feynman, *Space-time approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics*, Rev. of Mod. Phys., 20 (1948), 367-387, p. 369.

¹⁰R. P. Feynman, *Lectures in Physics*, Vol. III, § (1.9).

облучается пленка. Потом включают оба лазера, но при участии строгой системы контроля за несовпадением, т.е. каждый раз, когда фотон выпущен лазером, другой фотон не выходит ни из этого же лазера, ни из другого лазера до тех пор, пока первый фотон не достигнет цели. Если бы права была классическая физика, и если бы вероятность, связанная с волновой функцией фотона, была бы просто совокупным свойством множества фотонов, пятна на пластинке должны были бы соответствовать общему числу видимых пятен, когда в определенный момент включен один лазер, по отдельности и независимо. Вместо этого Пфлигор и Мандель доказали, что пятна на пластинке различаются¹¹.

КАНДИДО

Мне кажется, что эти эксперименты Рауха и Цейлингера с нейтронами и Пфлигора и Манделя с фотонами являются изысканными вариантами эксперимента с двумя отверстиями, описанного Фейнманом.

АКАДЕМУС

Совершенно верно, и это свидетельствует о том, что Фейнман прав, говоря, что этот эксперимент вобрал в себя все тайны квантовой теории.

ФЕЙНМАН

Но самой глубокой тайной остается то, что я только что описал, и в настоящее время никто не может продвинуться дальше¹².

АКАДЕМУС

Надеюсь, это доказательство убедило Вас в том, что...

ВЕЙЛЬ

Не привлекательная игра, ... а острая необходимость привела нас к этой странной квантовой физике... Даже мы, физики, не уверены, что мы действительно понимали ситуацию¹³...

ГЕРБЕРТ

В квантовом описании неизмеренный куон (quon) существует не так, как измеренный куон...

КАНДИДО

Что такое куон?

АКАДЕМУС

Хорошее название, придуманное Н. Гербертом, для обозначения типичного квантового объекта.

¹¹M. Piatelli-Palmarini, *La voglia di studiare*, Mondadori, 1991.

¹²R. P. Feynman, *La legge fisica*, Boringhieri, Torino (1971), p. 145 (eng.ed.).

¹³H. Weyl, *Mind and Nature*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1934, pp. 81–82.

ГЕРБЕРТ

Неизмеренный куон в меньшей степени присущ реальности, чем куон, который появляется на наших фосфоресцирующих экранах¹⁴.

КАНДИДО

Ненаблюдаемые объекты не принимают каких-либо значений, . . . ненаблюдаемый электрон не проходит сквозь одно, и только одно из двух отверстий. Но если его наблюдают, он проходит . . . Что общего эти утверждения имеют с наукой Галилея, Ньютона и Эйнштейна? Обнадеживает то, что многие философы противостоят этому взгляду на мир.

ФАЙН

Я могу допустить, и об этом всегда надо помнить, что переход от старой физической теории к новой проходил под знаменем больших новаций в физике. Но я категорически отрицаю, что эти новации поддерживают концептуальную или, если хотите, философскую суперструктуру, являющуюся революционной.

КАНДИДО

Действительно, концептуальная революция имела место в дополнение к тому, что касалось исключительно физики, но она была истолкована физиками в неверном направлении: сначала в направлении переворота в самом понятии физической реальности [*ненаблюдаемые объекты не существуют*]; затем в направлении переворота в классической логике [*дистрибутивный закон логики высказываний Буля не имеет значения*]; затем в отношении других таинственных физических свойств, таких как *отсутствие локализации, неделимость, зацепленность* . . . Настоящая природа этого концептуального переворота, сравнимого по своему значению с новой физической теорией, если не больше, лежит в преодолении старого предрассудка о том, что вероятностные законы уникальны, объективны и неизменны. Предрассудок, подобный тому, что в течение тысячелетий сопровождал геометрию, вплоть до XIX в. (см. гл. VI).

II.2. Волны или частицы?

КАНДИДО

Каково происхождение экспериментов, подобных опыту с двумя отверстиями?

АКАДЕМУС

История этого эксперимента неразрывно связана с историей одного из са-

¹⁴Nick Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, 1987, p. 114.

мых глубоких вопросов квантовой теории: так называемой *двойственности волн и частиц*.

КАНДИДО

В чем заключается эта *двойственность*?

ФЕЙНМАН

Фотон проявляется как частица, когда измеряются свойства, типичные для частиц, и как волна, когда измеряются типично волновые свойства.

КАНДИДО

При чем тут волны? В описании эксперимента с двумя отверстиями Фейнман говорит об электронах, нейтронах, фотонах . . . , их количество подсчитывается, но . . . о волнах не упоминается вовсе.

АКАДЕМУС

Эксперимент Фейнмана является модернизированной версией. В оригинальном варианте рассматривали *свет*, а не электроны. Проблема того, что число электронов, прошедших через два отверстия, не совпадает с суммарным количеством электронов, прошедших сначала через одно, а затем через второе открытое отверстие, возникала в оптике как *проблема интерференционных полос*.

КАНДИДО

Фейнман рассуждает об электронах, но говорит, что опыт был выполнен с нейтронами. Вы сейчас рассуждаете о свете, поэтому, если я не ошибаюсь, о фотонах . . . Но свет — это электромагнитная волна, в то время как фотоны, электроны и нейтроны — частицы. О чем же мы говорим? Разве в этом нет противоречия?

АКАДЕМУС

Если Вы вспомните, как исторически развивалась квантовая физика, Вы увидите, что сущность дела не изменилась: сначала Планк, представляя гипотезу, предложенную Больцманом, о том, что энергия квантована, преуспел в объяснении физического явления, необъяснимого иным способом (спектр излучения черного тела). Затем Эйнштейн распространяет гипотезу Планка на свет и показывает, что, если предположить, что свет также квантован, можно объяснить другой физический феномен (фотоэлектрический эффект). С помощью этого он открывает квант света, который сейчас называется *фотон*. Де Бройль опровергает гипотезу Эйнштейна в том смысле, что если последний показал плодотворность идеи приписывать дискретность, т. е. квантованное свойство типично волновому физическому объекту, такому как свет, то де Бройль приписывает волновое свойство типично дискретным физическим объектам, таким как атомы, электроны и материя

в целом. Бор использует эти идеи для объяснения структуры атома и спектров атома. С помощью Гейзенберга начинают проясняться математический формализм теории и его физическая интерпретация. Наконец, Шрёдингер сформулировал динамический принцип, который в квантовой теории играет роль уравнения движения Ньютона в классической физике: уравнение Шрёдингера.

КАНДИДО

Понятно. Вы полагаете, что, начиная с де Бройля и далее, больше нет четкого различия между объектами, которые мы обычно называем *корпускулярными*, и объектами, которые мы называем *волновыми*: типично волновой объект, такой как луч света, может действовать как поток множества дискретных частиц; и наоборот, поток множества дискретных частиц, например, электронов, может вызывать типично волновые явления, такие как ранее упомянутые *интерференционные полосы*.

АКАДЕМУС

Вывод из анализа эксперимента с двумя отверстиями еще сильнее: не только луч, но и *отдельная дискретная частица*, например, электрон, обладает в зависимости от обстоятельств, как типично волновыми свойствами, так и типично корпускулярными свойствами.

КАНДИДО

Я не понимаю этой экстраполяции на отдельную частицу: Фейнман сравнивал общее число прибытий, когда оба отверстия были открыты, с числом, полученным при суммировании прибытий, полученных сначала при закрытом первом отверстии, а потом при закрытом втором отверстии. Поэтому ясно, что в экспериментах мы говорим о множестве электронов, а не об одном электроне. Результат, следовательно, носит *кумулятивный* характер.

АКАДЕМУС

Действительно, в эксперименте принимают участие множество электронов. Однако нельзя сказать, что результат является *коллективным* эффектом.

Мы сами убедились в этом, когда осуществляли эксперимент, посылая по одному электрону в единицу времени. Электрон не знает, был ли отправлен другой электрон до него, или будет отправлен после него; он не знает, сколько электронов будет отправлено. Единственное, что определяет поведение отдельного электрона, так это экспериментальная ситуация, т. е. каким образом сам электрон был подготовлен, а также сколько и какие отверстия открыты. Каждое место прибытия электрона поэтому опре-

делено совершенно независимо от других. Это противоположно тому, что происходит в случае коллективного явления, в котором поведение отдельной системы существенно меняется вследствие взаимодействия с другими системами. В данном случае такое взаимодействие просто отсутствует.

КАНДИДО

Однако разве невозможно, что на прибытие одного электрона влияют предыдущие прибытия? Например, место, которое я выбираю, придя в кинотеатр, действительно зависит от выбора, сделанного теми, кто пришел раньше меня.

АКАДЕМУС

Логически это было бы возможно, но эта возможность исключена в эксперименте, осуществленном другим способом: каждый раз, когда электрон попадает на экран, его положение учитывается с помощью метки на другом экране, идентичном предыдущему, затем экран *очищается*, так что каждый электрон находит экран, на который он попадает, в одном и том же состоянии. Поскольку результаты эксперимента, выполненного таким способом, по всем пунктам совпадают с результатами, полученными без очистки экрана, можно заключить, что место, куда прибывает электрон, совершенно не зависит от предыдущих прибытий.

КАНДИДО

И, сохраняя все эти взаимонезависимые прибытия, накопленные со временем, можем ли мы видеть, как интерференционные полосы принимают некую форму?

АКАДЕМУС

Можем.

КАНДИДО

Были ли такие эксперименты выполнены в действительности?

ГЕРБЕРТ

Кажется, первым, кто выполнил этот эксперимент, был Дж. И. Тейлор¹⁵.

АКАДЕМУС

Результат был именно таким, каким я описал его Вам. Идеальный вариант этого эксперимента описан в статье Боба и Буба (Bohm and Bub), чтобы доказать то же самое: несостоятельность теории, согласно которой волновая функция квантовой системы, т.е. ее *квантовое состояние*, связана не с одной индивидуальной системой, а с совокупностью систем.

¹⁵Цитата из Nick Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, 1987, p. 66.

БУБ

Давайте рассмотрим дифракцию в эксперименте с двумя отверстиями при использовании кинокамеры вместо одной фотопластинки, как в обычном эксперименте¹⁶.

АКАДЕМУС

То есть вместо второго экрана, где в обычном эксперименте с двумя отверстиями суммируются частицы.

БОМ

Если пленка прокручивается вперед со скоростью один кадр в секунду, и электроны подходят к отверстию по одному в определенный момент с интервалами в одну секунду, то каждый кадр будет фиксировать различную индивидуальную траекторию . . .

АКАДЕМУС

Это описание очень похоже на то, в котором после каждого прибытия электрона экран очищается или заменяется. В самом деле, это действительно то же самое.

КАНДИДО

Вывод также тот же самый.

БУБ

. . . Если после эксперимента мы совместим все кадры, то получим типичное дифракционное изображение . . .

АКАДЕМУС

Дифракционная картина является ничем иным как волновой кривой, представляющей интерференционные полосы.

Теперь Вы можете понять происхождение фразы, часто употребляемой нами, физиками, для определения этого феномена: *электрон интерферирует сам с собой*.

Это относится к каждой частице, особенно к фотону, который представляет собой квант энергии в электромагнитном поле. Именно в эксперименте с фотонами, т. е. светом, впервые было обращено внимание на интерференционные полосы.

КАНДИДО

Мне понятно ее историческое происхождение, и я уверен, что эксперименты приводят именно к тем результатам, которые Вы описали. Вместе с тем, я не согласен с той интерпретацией, которую Вы приводите как экспериментальное доказательство неправомерности гипотезы о том, что результат

¹⁶D. Bohm, J. Bub, *A proposed Solution of the Measurement problem in Quantum Mechanics by a Hidden Variable Theory*, Rev. Mod. Phys. 38 (1996), pp. 453–469.

является кумулятивным явлением. Думаю, Вы не вполне понимаете разницу между *коллективным явлением* и *кумулятивным явлением*.

Экспериментальный факт состоит в том, что эти полосы можно видеть *только тогда, когда на второй экран попало большое количество электронов*, даже если в единицу времени это всего лишь один электрон. Корпускулярные аспекты, напротив, указывают на отдельные электроны без необходимости учитывать множество электронов.

Поэтому я думаю, что говорить об *интерференции электрона с самим собой* неправильно с точки зрения эксперимента, и это может породить у людей, недостаточно знакомых с проблемой, неверные представления: интерференционные полосы могут быть видны только тогда, когда затронуто множество отдельных систем (даже если на единицу времени приходится лишь одна система), и связывать их с одной не имеет смысла.

УИЛЕР

Еще во времена Юнга была известна возможность использовать приемник на конце аппарата для фиксации четких колец интерференции. Как же они могли образоваться, если не вследствие того, что электромагнитная энергия прошла через оба отверстия¹⁷?

АКАДЕМУС

Приемник, о котором говорит Уилер, является прибором, который в опыте с двумя отверстиями показывает, в какую точку прибывают отдельные частицы. В этом случае в качестве частиц-носителей электромагнитной энергии выступают фотоны.

КАНДИДО

Очевидно, что если я думаю о фотоне как о волне (электромагнитной), то вполне естественно предположить, что она прошла через оба отверстия. Если же я думаю о нем как о частице, то естественно предположить, что он прошел только через одно отверстие. Однако трудно думать об этих волнах как о чем-то *реальном*. Они должны были бы быть очень странными волнами . . .

ПУТНАМ

. . . Резко или скачкообразно переходя в новую конфигурацию [т. е. становясь частицами], волны внезапно почти везде исчезали . . . очень странное поведение, если о них действительно думать как о физической волне¹⁸.

¹⁷J. A. Wheeler, *The past and the delayed choice double slit experiment*, in A. R. Marlow (ed.), *Mathematical foundations of quantum theory*, Academic Press, 1978.

¹⁸H. Putnam: *A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed.), *undoubtedly Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965, item 11.

АКАДЕМУС

В самом деле, и поскольку фотон иногда ведет себя как волна, а иногда как частица, возникает вопрос, как он проявляет себя в данном эксперименте. Эта проблема возникла еще в первые годы существования квантовой теории, когда дискретная природа света была экспериментально подтверждена с помощью фотоэлектрического эффекта, который показал способность света *сталкиваться* с другими частицами, например, электронами, придавая им посредством таких *ударов* импульсы с хорошо определяемыми величиной и направлением, подобно отдельным пулям. Это привело к возникновению представления о том, что свет состоит из дискретных частиц, называемых *фотонами*.

ЛОРЕНЦ

Все допущения, сделанные в отношении электрона в атоме водорода, должны быть сделаны и для каждого электрона в любом атоме; мы должны заменить их волновыми системами. Но тогда как я должен понимать фотоэлектрические явления и эмиссию электронов из нагретых металлов? Частицы в этом случае проявляются очень четко и без изменений; как же они могут вновь конденсироваться, после того как растворились (1926)?

ФЕЙНМАН

Хотя при рассмотрении отдельной частицы есть соблазн думать в терминах *волн частиц*, это не является хорошей идеей¹⁹ . . .

УИЛЕР

. . . Дальнейшие рассуждения Эйнштейна известны из сообщения Бора (в A. Einstein, *Philosopher-Scientist*). Регистрируются как столкновения, так и полосы. На основании столкновений делается вывод, что каждый квант энергии проходит лишь через одно отверстие; на основании полос — что он, тем не менее, проходит также через оба отверстия. Но этот вывод противоречив. Поэтому квантовая теория сама себя разрушает вследствие внутреннего противоречия²⁰ . . .

КАНДИДО

Рассуждения Уилера предназначены для тех, кто знаком с анализом эксперимента с двумя отверстиями.

КАРТРАЙТ

. . . Но каким образом электрон точно попал в приемник из источника? Вследствие его происхождения квантовая механика затрудняется ответить на этот вопрос. Это не более чем дуализм волна — частица. Явление интер-

¹⁹R. P. Feynman, *Lectures in Physics*, Vol. III, § (3.4).

²⁰J. A. Wheeler, см. предыдущую ссылку.

ференции, которое в опыте с двумя отверстиями сведено к своей сущности, показывает, как трудно думать о частицах как о предметах,двигающихся по непрерывным траекториям, находящихся в определенной области в какой-то момент²¹.

УИЛЕР

Ответ Бора (в А. Einstein, *Philosopher-Scientist*) в настоящее время стал главным уроком квантовой механики. Можно зафиксировать либо полосы, либо столкновения, но не то и другое одновременно. Обеспечение возможности обнаружить одно автоматически исключает обнаружение другого²²...

КАНДИДО

И каким же образом это взаимоисключение устанавливает ту *внутреннюю несовместимость*, на которую указывал Эйнштейн?

УИЛЕР

... Теперь выбор ясен... : фотон проходит через два отверстия, что доказывается с помощью интерференционных полос, и в то же время через одно, о чем свидетельствует импульс бокового удара²³...

КАНДИДО

И это было бы решением? Если бы я был Эйнштейном, я бы почувствовал себя задетым этим ответом. Это похоже на то, как если бы он сказал Вам: *«Послушайте, ваша теория противоречива, поскольку она утверждает, что какая-то вещь черная и белая в одно и то же время»*, на что Вы ответили бы: *«То, что наша теория противоречива, — неверно, потому что эта вещь действительно черная и белая в одно и то же время»*.

АКАДЕМУС

Все действительно так, как Вы говорите, но в этом нет ни капли иронии: Эйнштейн думал, что противоречие было в теории или в ее интерпретации, и поэтому ее надо было изменить. *Мы думаем, что это противоречие, т. е. дополнительность, существует в природе вещей*. Но человек не в силах менять природу вещей, максимум, что он может — это понять ее.

КАНДИДО

Вы полагаете, что, согласно современной физике, материальные предметы в одно и то же время могут иметь взаимоисключающие свойства, такие как свойства частицы или волны?

²¹Hasok Chang, Nancy Cartwright, *Causality and realism in the EPR experiment*, Erkenntnis (1993).

²²J. A. Wheeler, см. предыдущую ссылку.

²³J. A. Wheeler, см. предыдущую ссылку.

БЕРНАРДИНИ

... Каждый знает, что с возникновением квантовой механики материя также потеряла свою старую и убедительную непротиворечивость: возникла дилемма *волны или частицы*, которая смущает многих из тех, кто полагает, что невозможно являться одновременно двумя вещами²⁴ ...

КАНДИДО

Из того, как он об этом говорит, может показаться, что только некоторые *minus habens* (простачки) могут быть смущены идеей о том, что нечто в одно и то же время может быть и волной и частицей. Возможно, у меня старомодный взгляд на мир, но я должен согласиться с тем, что эти свойства кажутся мне противоречивыми. Например, волна не локализована в пространстве, а корпускула локализована. Как может физическая система быть в одно и то же время двумя различными вещами? Это похоже на заявление о том, что мое тело может быть одновременно и здесь и где-то еще, или что этот стол, стоящий перед нами, одновременно является и лошадью.

БЕРНАРДИНИ

... Эта дилемма больше не производит впечатления на физиков; правдоподобно все, что точно может быть представлено на языке формул, и воспроизводит странность реальности²⁵ ...

ФЕЙНМАН

Физики научились уживаться с этой проблемой: коротко говоря, они поняли, что суть состоит не в том, нравится теория или нет, а в том, позволяет ли она предсказывать результаты экспериментов. Философский аспект, простота и обоснованность теории — не представляют интереса²⁶.

КАНДИДО

Это, похоже, замечательная идея. Я попробую воспроизвести ее по-своему: Вы говорите, что если физическая теория может быть выражена в виде внутренне согласованной математической модели и если, кроме того, такая модель помогает нам интерпретировать природу также в некоторых скрытых ее аспектах и действовать на этом основании, то мы должны рассматривать такую теорию как правдоподобную и верить ее предсказаниям, как бы далеки некоторые из них ни были от наших интуитивных ожиданий.

²⁴ Carlo Bernardini, *L'Espresso*, 14th April 1991.

²⁵ Carlo Bernardini, см. предыдущую ссылку.

²⁶ R. Feynmann, *QED-La strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, 1985 [далее обозначается как QED], p. 24–25.

АКАДЕМУС

У Вас есть идея, но она не является объектом *отвергающей интуиции*. Дело в том, что сами уравнения могут стать предметом интуиции. Например, в квантовой теории необходимо уметь *интуитивно воспринимать волновые функции*. Кроме того, эксперименты указывают на то, что существует соответствие между интуицией и предсказаниями.

КАНДИДО

Правомочность наделять интуитивным содержанием объекты математических моделей не вызывает сомнений! Это является основой любой сколько-нибудь математизированной науки. Но если эти интуитивные представления не трансформируются в обратном направлении в утверждения, касающиеся реальности, то мы не сможем выйти за пределы формальности и бессодержательности. *Привычка использовать формализм* весьма отличается от *интуиции*.

Д'ЭСПАНЬЯ

Однако от теории требуется нечто большее, нежели подтверждение экспериментов. От нее ждут, чтобы она не только определяла результаты экспериментов, но и способствовала пониманию физических явлений, которые, вероятно, лежат в основе наблюдаемых результатов²⁷.

КАРТРАЙТ

Философов можно разделить на две группы в отношении законов науки: на реалистов и инструменталистов. Инструменталисты, как мы все это знаем, считают научные теории инструментами — инструментами для построения точных предсказаний или объяснений, или для сведения всего до значительно более материального уровня — инструментами для создания таких устройств, которые делают то, что им нужно, например, транзисторы, батарейки для вспышек или ядерные бомбы... Они не делают никаких заявлений относительно природы; они удовлетворены тем, что дают рычаги, с помощью которых можно манипулировать миром²⁸.

АКАДЕМУС

Я бы сказал, что не только философы, но и большинство ученых стремится в настоящее время занять инструменталистскую позицию.

Д'ЭСПАНЬЯ

... Многие физики думают, что наиболее разумным является считать кван-

²⁷B. D'Espagnat, *Conceptions de la Physique contemporaine*, Hermann, 1965, p. 11.

²⁸N. Cartwright, *Fables and Models*, Aristotelian Society, vol. LXV, 1991.

товую механику просто набором правил, определяющих результаты экспериментов²⁹.

АКАДЕМУС

Это очень широко распространенная точка зрения. Она проникла в процесс преподавания квантовой теории с самыми первыми учебниками по этому предмету.

КЭМБЛ

Почему свет проявляется в некоторых отношениях как набор частиц, а в некоторых — как диспергирующее волновое явление?

Отметим, однако, что в конце концов роль теоретической физики состоит в описании, а не в объяснении. Наука пытается интерпретировать чрезвычайно сложный мир опыта как результат в общем-то простых законов. Целью является превращение сложных вещей в простые, а когда цель достигнута, порядок оказывается подчиненным хаосу, но на вопрос *Почему* коренного ответа нет. Поэтому, отвергая такой вопрос, на который вообще не может быть ответа, мы в состоянии заняться задачей описания того, что мы наблюдаем самым что ни на есть надежным способом³⁰.

КАНДИДО

Это кажется мне упрощенным способом описания научной деятельности. С другой стороны, я понимаю, что иная позиция может основываться на *вере или наборе ценностей*, имеющих очень глубокие корни.

КАРТРАЙТ

Реалист в науке занимает положение, противоположное положению инструменталиста. Физические законы не просто притворяются, что заявляют о *природе*; они действительно делают некие заявления, которые оказываются *верными*. То, что согласно им должно произойти, действительно происходит³¹.

КАНДИДО

В любой математической модели имеется множество неявных посылок. Необходимо сделать эти посылки *явными*, т. е. сделать их *аксиомами*. Только тогда, когда математическая модель аксиоматизирована, мы можем сказать, что действительно поняли ее физические предпосылки. К сожалению, в настоящее время многие физики неправильно понимают *описание, аксиоматизацию и использование* модели.

²⁹V. D'Espagnat, *Conceptions de la Physique contemporaine*, Hermann, 1965, p. 11.

³⁰Edwin Kemble, *General Principles of Quantum Mechanics*, Part 1, Rev. Mod. Phys., 1929, p. 160.

³¹N. Cartwright, *Fables and Models*, Aristotelian society, vol. LXV, 1991.

АКАДЕМУС

То, что вы говорите, — просто смешно! Если с моделью интерпретации природы я могу воздействовать на нее, делать предсказания, которые впоследствии будут выверены с фантастической точностью, расширят наше объективное знание, в чем смысл заявлений «Я этого не понимаю?» Аксиоматизировать теорию означает убить ее, убрав из нее все живое и коммуникабельное.

КАНДИДО

Все та же старая история! Но ситуация вовсе не так тривиальна. Просто вспомните о вождении автомобиля. С его помощью Вы можете увидеть великолепные пейзажи, ознакомиться со многими местами; другими словами, Вы можете принять участие в явлениях природы и расширить свои знания о ней. Но это не означает, что Вы знаете, как устроен двигатель Вашего автомобиля. Если Вы хотите узнать, как он работает, Вы должны ненадолго оторвать Ваш взгляд от пейзажа и запачкать свои руки маслом и грязью. Вы можете сказать, что двигатель — мертвая и грязная штука, но это то, что позволяет Вам узнать такие красивые и живые вещи!

АКАДЕМУС

Однако понимание не означает аксиоматизацию, т. е. построение математической модели: интерпретация набора аксиом вовсе не лежит в самих аксиомах. Существует необходимость соответствия между объектами и формализмом.

КАНДИДО

Это очевидно! Формализм может *подготовить* новую интуицию, иногда он также может *направлять ее*, но не может *ее заменить*. Очевидно, возможно и то, что новая интуиция будет весьма далека от старой.

АКАДЕМУС

Настоящее значение анализа Гейзенберга, Фейнмана и других состоит в том, ... что мы не можем распространить обычную интуицию на микроскопический мир, поскольку исторически она формировалась на основе опыта, имеющего отношение к макроскопическому миру.

КАНДИДО

Какие аспекты обычной интуиции не распространяются на микроскопический мир?

АКАДЕМУС

Например, мы используем слова *материальная точка, частица*, ... в классической механике. Затем мы безо всякой критики переносим эти элементы

в квантовую механику. Это искушение обычного человека и человека пишущего — загонять новое в старые категории.

КАНДИДО

Обычная интуиция позволяет мне понять, каким образом я себя веду по отношению к моему начальнику и каким по отношению к моей жене. Посредством экстраполяции я могу согласиться с тем фактом, что частица тоже по-разному ведет себя в разных ситуациях. Но я не могу понять, как электрон может одновременно иметь два противоречивых атрибута: *находиться здесь* и в то же время *находиться там*.

АКАДЕМУС

Вы не понимаете, потому что вы ошибаетесь, говоря об электроне как о частице.

КАНДИДО

Но Фейнман также, говоря об электронах, продолжает говорить, что они являются *отдельными единицами*, локализованными в пространстве, иначе говоря, частицами.

АКАДЕМУС

Не забывайте, что Фейнман приписывает свойства, о которых Вы упоминали, только тем частицам, за которыми велось наблюдение.

КАНДИДО

Как Вы можете соглашаться с интерпретацией, включающей противоречащие друг другу утверждения? Это *противоречия*, а не вещи, которые *далеки от нашей интуиции*. Говорить, что физическая система не локализована в пространстве и в то же самое время локализована, определенно является противоречием, а не чем-то противостоящим здравому смыслу.

Вы не можете просить меня согласиться с внутренне противоречивой интерпретацией. Поскольку эта теория основывается на внутренне последовательном формализме и привела к нескольким важным открытиям, я хочу сохранить важные открытия и избавиться от противоречий.

АКАДЕМУС

Не забывайте, что анализ Фейнмана требует еще меньше: он просто просит *принять во внимание, что ненаблюдаемые объекты имеют свойства, отличающиеся от наблюдаемых объектов*. Как ни странно, это не имеет внутренних противоречий. Например, ненаблюдаемый фотон не локализован, а наблюдаемый — локализован. Если вы объедините позицию Бернардини с позицией Фейнмана, то получите именно то, о чем думает большинство физиков.

КАНДИДО

Подведем итог: если я думаю о *ненаблюдаемом* электроне, то я должен представить, что это *волна*. Если я думаю о *наблюдаемом* электроне, то я должен представить, что это *частица*.

АКАДЕМУС

Многие так думают, но не все. Некоторые думают, что ненаблюдаемый электрон находится в двусмысленном состоянии, отличном от чего бы то ни было.

ПОППЕР

Ответ на вопрос, контролирует ли ситуацию подлинная (а также единая) теория поля, противостоящая теории частиц или теории ансамблей частиц, лежит, однако, в трактовке самого понятия о частицах. Эта возможность была обозначена Шрёдингером в его изначальной попытке представить частицы как волновые гребни (или волновые пакеты), и хотя он впоследствии оставил эту теорию, но часто возвращался к данной проблеме.

Поэтому, с точки зрения физической теории, частицы — это тенденции, и рассматривать их иначе — возможно, в качестве временных пространственных единиц, являющихся неделимыми и чем-то наполненными, — характерно для *определенной метафизической идеи*.

Я предлагаю оставить эту метафизическую идею и заменить ее другой, также метафизической: теорией, согласно которой тенденции реальны, описываются уравнениями поля, могут образовывать частицы, которые, по крайней мере до некоторой степени, могут быть тенденциями³².

АКАДЕМУС

Этот способ, но с другим названием, интерпретации вероятности в квантовой теории часто можно найти в литературе.

ГЕРБЕРТ

Связь между квантовой возможностью и вероятностью проста:

$$\text{вероятность} = (\text{возможность})^2.$$

Волна ψ по-французски называется очень симпатично *Densité de présence* — плотность присутствия³³.

АКАДЕМУС

Я не думаю, что эта *тенденция* Поппера сильно отличается от *потенциала* Гейзенберга.

³²К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 200.

³³Nick Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, 1987, p. 96.

КАНДИДО

Поппер использует термин (тенденция) для обозначения того, что физики называют объективными вероятностями. Но на самом деле, невзирая на различную терминологию, позиция Поппера не отличается от ортодоксальной позиции, принятой многими физиками.

ПОППЕР

Согласно программе Эйнштейна и Шрёдингера, динамические законы изменений этих полей тенденций имеют, прежде всего, детерминистский характер (как и законы классической теории). Помимо тенденций, объекты, чье геометрическое изображение требует абстрактного многомерного пространства возможностей, рассматриваются как физические реальности. Эти два момента — физическая реальность, описанная законами детерминизма, и реальность, к которой приложима идея поля (так что законы частично являются дифференциальными уравнениями), являлись (и продолжают оставаться) основными идеями единой теории мира Эйнштейна.

Точка зрения ортодоксальной интерпретации квантовой теории с ее дуализмом частицы и поля, частицы и волны, получила новую трактовку и продолжается находиться в рамках дуализма возможностей³⁴.

КАНДИДО

С помощью таких рассуждений Поппер хотел бы примирить позицию Эйнштейна с позицией Бора и Гейзенберга. Однако он, кажется, не заметил, что любая теория, которая вводит понятия *виртуальности* и *тенденции*, должна столкнуться с проблемой перехода от виртуального к действительному.

АКАДЕМУС

Это именно та проблема, с которой сталкивается и которую решает квантовая теория измерения.

ШИМОНИ

... Фотон, являющийся единицей света, может вести себя как частица или как волна и может существовать в двойственном состоянии до тех пор, пока не будет измерен. Если измеряли свойства частицы, то фотон проявляет себя как частица. Если измеряли свойства волны, фотон проявляется как волна³⁵.

АКАДЕМУС

Очевидно, что фотон этого не знает и поэтому, до тех пор пока не будет определена экспериментальная установка, он прибывает в двойственном

³⁴ K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 209.

³⁵ A. Shimony, *Scientific American*, 1988.

состоянии, которое мы называем *состоянием суперпозиции*. В таком случае...

ШИМОНИ

... Является ли фотон объектом волнового типа или тип частицы остается неопределенным до тех пор, пока не будет определен тип экспериментальной установки³⁶...

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что я могу установить, к какому типу относится фотон, просто путем определения экспериментальной установки?

АКАДЕМУС

Это, по существу, является идеей *квантовой теории измерений* в ее классической интерпретации, известной как *копенгагенская интерпретация*.

II.3. Измерения, объективизация, исчезновения

АКАДЕМУС

Надеюсь, что после экспериментов, описанных Фейнманом и Гейзенбергом, Вы убедились в необходимости введения этих новых состояний материи, состояний суперпозиции, для которых характерно следующее: если физическая система находится под наблюдением, то она не принимает определенных значений, а имеет только виртуальные значения.

КАНДИДО

Я понял их аргументы, но я не считаю их достаточными для того, чтобы судить об этом выводе. Однако давайте продолжим по порядку: сначала закончим описание современной интерпретации, а затем уже более тщательно ее проанализируем.

АКАДЕМУС

Фейнман и Гейзенберг сами объяснили Вам, что в каждый момент измерения наблюдаемого объекта, независимо от состояния системы (в том числе и состояния суперпозиции), всегда получается точно определенное значение при отсутствии ошибок в ходе эксперимента, которые мы рассмотрим, поскольку можно доказать, что концептуальные трудности обусловлены не ими.

КАНДИДО

Да, я помню, и я также помню, что две вещи показались мне противоречивыми.

³⁶A. Shimony, *The Reality of the Quantum World*, Scientific American, January 1988, pp. 36-43.

ПАУЛИ

... Появление в физике волновой или квантовой механики в 1927 г. показало, что можно избавиться от кажущихся неразрешимыми противоречий при использовании различных описаний, при условии отказа от традиционных идей и идеалов о причинности и реальности природы. Поскольку, однако, эти старые идеи содержатся в новых идеях как крайности, а новые идеи обобщают другое, я вовсе не думаю, что это очень большая жертва³⁷...

КАНДИДО

А каким образом эти жертвы устранят противоречия?

АКАДЕМУС

Физики преодолевают это противоречие, утверждая, что процесс измерения вызывает переход от виртуальных значений к действительным.

КАНДИДО

Другими словами, электрон, находясь в состоянии суперпозиции, которым является наблюдаемое состояние, не имеет четко определенного положения, т. е. он нигде не находится. Именно мои действия, направленные на измерения, *заставляют* его принимать определенное положение в пространстве.

АКАДЕМУС

В терминах дуализма волна – частица некоторые думают, что до измерений электрон является волной, после измерений – частицей; что до измерения он имеет только *виртуальные свойства*, которые становятся *действительными* в процессе измерения.

Для того, чтобы описать это превращение из виртуального, в действительное в физической литературе часто используется термин *коллапс* или *редукция волнового пакета*.

КАНДИДО

Является ли этот коллапс [разрушение] чем-то реальным, т. е. реальным физическим явлением? Или же эта ситуация аналогична той, когда я подбрасываю монетку и, прежде чем узнать результат, говорю, что с вероятностью 1/2 это будет орел и с вероятностью 1/2 – решка, в то время как, зная результат, я говорю, что это орел или решка с вероятностью, равной 1?

АКАДЕМУС

Это совсем другое: в случае с монеткой меняется только Ваша информация. В случае исчезновения волнового пакета мы сталкиваемся с физическим явлением. Точнее, если электрон находится в состоянии суперпозиции с

³⁷W. Pauli, *Fisica e Conoscenza*, Torino, 1954, p. 117.

точки зрения наблюдаемого состояния, и его положение определено, то мы имеем разрушение волнового пакета; если же вместо этого электрон находится в смешанном состоянии с точки зрения наблюдаемого состояния, и его положение определено, то ситуация аналогична той, что мы имеем в случае с монеткой, когда меняется только ваша информация.

КАНДИДО

Но тогда в ходе измерения создается физическое свойство, например, такое как наблюдаемое *положение*, имеющее вполне определенное значение.

АКАДЕМУС

Именно так. Некоторые используют термин *объективизация* для описания этого события. Ненаблюдаемый электрон в состоянии суперпозиции с точки зрения позиции наблюдателя *не является объектом, он не существует*, т. е. он не имеет тех свойств, которые возникают при измерениях. Процесс измерения возвращает ему эти свойства и в этом смысле *объективирует его*. Для большей точности нужно сказать, что *некоторые* свойства любого физического объекта всегда находятся в виртуальном состоянии. Процесс измерения превращает одни свойства из виртуальных в действительные, другие — из действительных в виртуальные. Что-то вроде космического котильона³⁸.

КАНДИДО

С этой точки зрения термин *объективизация* не только метафизичен, но и технически неверен, поскольку, как Вы только что сказали, *объективизация* одних свойств всегда сопровождается *дезобъективизацией* других. Но предположим, что я решил не определять положения электрона...

АКАДЕМУС

В таком случае электрон остается в состоянии суперпозиции.

КАНДИДО

Но тогда свойство электрона иметь четко определенное положение, иначе говоря, физическое состояние, не было бы чем-то объективно существующим, а зависело бы от моего решения производить или не производить определенные измерения.

ПУТНАМ

Здравому смыслу претит утверждение, что положение и момент существуют только тогда, когда мы их определяем³⁹.

³⁸Котильон [фр. cotillon] — французский танец, состоящий из нескольких самостоятельных танцев и игр. — *Прим. ред.*

³⁹H. Putnam, *A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed.), *Unreliable, Essays in Contemporary science and Philosophy*, 1965.

АКАДЕМУС

Я понимаю, что такая точка зрения для Вас неприемлема. Это происходит оттого, что у Вас классический взгляд на понятие физического состояния. Эйнштейн также всегда отказывался принимать ее, несмотря на то, что мы, физики, в течение многих лет пытались убедить его в этом.

ПАУЛИ

... Эйнштейн, однако, отстаивал более ограниченную концепцию реальности, основанную на полном различии между объективно существующим физическим состоянием и любым типом наблюдения. К сожалению, соглашение так и не было достигнуто⁴⁰...

КАНДИДО

Как можно было бы более точно описать позицию Эйнштейна?

ПАУЛИ

... Поэтому существует нечто, подобное реальному состоянию физической системы, которая существует объективно и независимо от каких бы то ни было наблюдений и измерений, которая может быть описана, по крайней мере в принципе, с помощью физических средств. Я бы назвал это идеалом, так хорошо описанным Эйнштейном, — идеалом изолированного наблюдателя. Действительно, выражения *существующий* или *несуществующий*, *реальный* или *нереальный*, конечно же, не являются однозначными характеристиками свойств дополненности, проверяемых только в количественных экспериментах с несколькими произвольно взятыми, иногда взаимоисключающими, приборами⁴¹...

АКАДЕМУС

Дополняющими (комплиментарными) свойствами являются, например, свойства быть волной или частицей, иметь четкое местоположение или скорость... Экспериментальные установки для определения этих двух свойств являются несовместимыми. Я имею в виду то, что с помощью эксперимента я могу, самое большее, выявить лишь одно из этих свойств, а не два. Паули полагает, что не имеет смысла говорить об *одновременном существовании*, когда оно не может быть проверено экспериментально.

КАНДИДО

Нет смысла говорить о них, или они не существуют?

КАНДИДО

... Явление не является таковым до тех пор, пока его не наблюдают. Другими словами, не является парадоксом то, что мы выбираем, что должно

⁴⁰W. Pauli, Albert Einstein, (1955–58), in *Fisica e Conoscenza*, Torino, 1964.

⁴¹W. Pauli, *Probabilità e Fisica*, 1952, in *Fisica e Conoscenza*, 1964, p. 37.

произойти после того как *это уже произошло*. В действительности это не произошло и не является явлением до тех пор, пока его не наблюдали⁴² ...

КАНДИДО

Что это означает?

УИЛЕР

...Предостережение состоит, похоже, в том, что прошлое не существует до тех пор, пока оно не записано в настоящем. Не имеет смысла говорить о том, что делал квант электромагнитной энергии до его наблюдения или измерения с помощью того, чем его наблюдали. Вообще говоря, кажется, что мы были вынуждены заявлять, что явление вовсе не является явлением до тех пор (при наблюдении или подходящем сочетании теории и наблюдения) пока оно не становится наблюдаемым явлением. Вселенная не существует где-то там, независимо от процесса наблюдения. Напротив, в некотором странном смысле, она вселенная участника наблюдения⁴³ ...

БАФИКО

...Уилер развенчивает парадокс простым замечанием о том, что явления представляют собой таковые только тогда, когда они становятся наблюдаемыми, и наблюдение имеет место только на макроскопическом уровне, в котором состояние является необратимым и поэтому однозначно определено взаимодействием системы с измерительными приборами⁴⁴ ...

КАНДИДО

Но что означает высказывание *явления являются таковыми только тогда, когда они становятся наблюдаемыми явлениями?*

АКАДЕМУС

Позиция Уилера, хотя и заявленная несколько иначе, в целом вполне приемлема. Вселенная является *участником*, поскольку процесс измерения порождает то, что Уилер называет *явлением*, и это на самом деле то же самое, что другие авторы называют *физической реальностью, объективным свойством* ...

ПУЛЧИНЕЛЛИ

Но разве мы не хотим поддаться метафизическому искушению? В таком случае физик Джон Уилер предоставляет нам лазейку. Согласно этой интерпретации квантовой механики, *физическая реальность становится действитель-*

⁴²J. A. Wheeler, *The past and the delayed choice double slit experiment*, in A. R. Marlow (ed.), *Mathematical foundations of quantum theory*, Academic Press, 1978.

⁴³J. A. Wheeler, *The past and the delayed choice double slit experiment*, in A. R. Marlow (ed.), *Mathematical foundations of quantum theory*, Academic Press, 1978.

⁴⁴R. Bafico, M. Parodi, *La rivoluzione probabilistica nella scienza moderna*, Genova, preprint, 19.9.1991.

ной только тогда, когда кто-то наблюдает ее, но в то же время это физическая реальность, которая образует наблюдателя, ответственного за ее конкретное существование. Здесь, таким образом, имеет место порочный круг⁴⁵ . . .

КАНДИДО

Если это считать лазейкой для отказа от метафизических искушений, что мы должны ожидать от тех, кто решил поддаться искушению?

АКАДЕМУС

Симметрично стандартной интерпретации, согласно которой физические свойства системы зависят от того, каким образом мы ее *измерили*, находится точка зрения д'Эспанья, согласно которой свойства физической системы будут зависеть от того, как мы ее *измерим*.

Д'ЭСПАНЬЯ

. . . Физическое свойство никогда не может быть приписано квантовой системе, за одним только исключением: если *A* является инструментом измерения, с помощью которого система будет вовлечена во взаимодействие, физическими свойствами системы являются исключительно те, для измерения которых и был создан прибор *A* . . .⁴⁶

КАНДИДО

Например, можно создать два прибора, которые будут выявлять два комплиментарных, в понимании Бора, свойства частицы. Проверить одновременно оба свойства на одной и той же системе невозможно, но возможно в последний момент решить, посредством чисто вероятностного механизма, которое из них измерять.

АКАДЕМУС

Эксперименты такого типа, как Вы предлагаете, действительно были осуществлены: они называются *эксперименты со случайным или отложенным выбором*. Результаты этих экспериментов убедили многих физиков, что приобретение четко выраженных свойств микроскопической системой происходит вследствие взаимодействия с измерительным прибором. Мы обсудим эти эксперименты в гл. VIII при обсуждении так называемого *неравенства Белла*.

II.4. Процесс измерения

АКАДЕМУС

Некоторые считают описание процесса измерения основной проблемой в интерпретации квантовой теории.

⁴⁵C. Pulcinelli, *L'ultima, inutile domanda*, «L'Unità», 4th May 1993.

⁴⁶B. d'Espagnat, *Conceptual foundations of quantum mechanics*; W. Benjamin, 1971, p. 340.

БАЛЛЕНТАЙН

Анализ идеализированного процесса измерения сам по себе не важен и не интересен. Важен свет, который он проливает на интерпретацию квантовой механики.

КАНДИДО

В чем заключается эта проблема?

АКАДЕМУС

Дело в том, что в классической физике макроскопические объекты использовались для измерения количеств, относящихся к другим макроскопическим объектам. Как *измерительный прибор*, так и *измеряемое* непосредственно воспринимались сознанием человека: они являлись *объектами* в обычном смысле этого слова.

С появлением микрофизики возникает основное различие между *измерительным прибором*, который остается макроскопическим объектом, и *измеряемым*, которое является микроскопическим объектом, в том смысле, что оно воспринимается не непосредственно человеческим сознанием, а лишь опосредованно через его воздействие на *измерительный прибор*.

В этом смысле в микрофизике само понятие *объект* претерпевает качественное изменение, концептуальное обновление, которое должно и сейчас являться источником размышлений и объяснений.

КАНДИДО

В этом я с Вами согласен, но как это концептуальное обновление отразилось на процессе измерения?

АКАДЕМУС

Давайте рассмотрим *маленькую* систему (микросистему), объединенную посредством взаимодействия с *большой* системой (макросистемой). Давайте предположим, просто для того, чтобы дать некоторое представление об этом, что маленькая система — это электрон, а большая система — измерительный прибор, который должен измерять энергию электрона. Давайте также предположим, что результатом измерения является некое определенное положение указателя на шкале.

Сначала электрон имел хорошо определяемую энергию (скажем, энергию определенного энергетического уровня атома), и указатель имел четкое положение на шкале. В конце эксперимента энергия электрона изменилась, и указатель переместился.

КАНДИДО

Мне это кажется типичным для любого эксперимента, в том числе и для классического. В чем же здесь проблема для квантовой теории?

АКАДЕМУС

Проблема состоит в том, что в классическом случае состояний суперпозиций нет, в то время как, согласно квантовой теории, в течение всего эксперимента указатель и электрон находятся в состоянии суперпозиции в отношении энергии и положения, и поэтому, в соответствии с ортодоксальной интерпретацией, ни энергия, ни положение в действительности не существуют. Только сам процесс измерения вызывает коллапс и заставляет их существовать раздельно.

БЕЛЛ

Формулировка постулата коллапса подразумевает разделение физического мира на систему и измерительный прибор. Однако ни в одной аксиоме квантовой теории нельзя найти точного указания на то, каких критериев нужно придерживаться для того, чтобы решить, *когда и как* можно осуществить такое разделение на части (1990).

АКАДЕМУС

Согласно квантовой теории составная система измеряемая система — измерительный прибор в конце эксперимента находится в состоянии суперпозиции. Тогда, если квантовая механика является полной (законченной), макроскопические объекты также находятся в состоянии суперпозиции. Поэтому должна существовать ситуация, при которой квантовая механика является либо неверной, либо неполной.

КАНДИДО

Но результат измерения состоит в том, что мы видим указатель в четко определенном положении, соответствующем точному значению энергии. Поэтому ни один из них не находится в состоянии суперпозиции в отношении этих наблюдаемых.

АКАДЕМУС

Нахождение правила, которое превращает состояние суперпозиции, предусмотренное квантовой теорией, в статистическую смесь, всплывающую в ходе эксперимента, было названо *объективизацией проблемы*. Это новое название для обозначения *постулата коллапса* было недвусмысленно сформулировано фон Нейманом, но уже подразумевалось в работах многих авторов, например, таких как Дирак.

КАНДИДО

Это название направлено на то, чтобы подчеркнуть факт, что в теории нет ничего, объясняющего этот резкий переход от суперпозиции к чистому состоянию, возникающему в ходе эксперимента. Он также подчеркивает

контрастную оценку квантовых состояний, которая следует из знаменитого уравнения Шрёдингера.

АКАДЕМУС

Существуют аксиомы, касающиеся математической модели, и аксиомы, касающиеся того, как математическая модель была интерпретирована. *Постулат коллапса* принадлежит ко второй группе.

КАНДИДО

Объективизация, исчезновение... их названия кажутся такими драматичными, специально придуманными, если не для того, чтобы смутить, то по крайней мере для того, чтобы позабавить обычных людей, которые хотели бы что-то почерпнуть из этого квантового процесса измерения.

АКАДЕМУС

В процессе исчезновения волнового пакета можно различить две стадии: — взаимодействие между системой и измерительным прибором, при котором система изменяется, переходя из *состояния суперпозиции* (чистого) в *смешанное состояние* (в котором наблюдаемый объект имеет четко определенную величину, но мы ее не знаем); — считывание показателей прибора, чья система изменяется, переходя от смешанного состояния в чистое состояние, а именно в то, которое соответствует значению наблюдаемого, полученному в ходе измерения.

МИТТЕЛЬШТЕДТ

... Всегда считалось само собой разумеющимся, что идеальный процесс измерения произвольной величины A , как правило, не объективной, состоит из двух этапов. На первом этапе объективизация, начальная подготовка W превращена в *Gemenge* (нем. смесь) $\Gamma(W, A)$...⁴⁷

КАНДИДО

Разговор становится трудным.

АКАДЕМУС

Не позволяйте словам запутать Вас, мы уже объяснили, что такое вещество, и это просто.

Начальная подготовка W является состоянием микросистемы. Тот факт, что Миттельштедт думает о состоянии суперпозиции (в отношении величины A) установлен, несколько сложным образом, в определении того, что величина A как правило не объективна. *Gemenge* (смесь) $\Gamma(W, A)$ является смешанным состоянием, связанным с состоянием суперпозиции, которое является тем состоянием, где величина A в конце концов имеет отчетливые

⁴⁷ P. Mittelstaedt, *The interrelation between language and reality in quantum physics*, in *Modelli scientifici della realtà fisica*, «La nuova critica», 13–14, 1989.

значения, и вероятности таких значений являются обычными вероятностями, а вовсе не *объективными вероятностями*.

КАНДИДО

А что означает измерение *первого типа*?

АКАДЕМУС

Это означает, что измерение не разрушает измеряемый объект. Например, если я заставаю пучок электронов проходить сквозь магнитное поле, ориентированное вдоль заданного направления a , он расщепляется на два пучка в соответствии с двумя возможными значениями наблюдаемого количества, названного *спином вдоль направления a* . Каждый электрон в каждом пучке локализован, хотя можно производить над ним какие-либо дальнейшие количественные измерения. Если у меня вместо этого имеется фотон, зафиксированный на фотопластинке, я не могу использовать этот же фотон для того, чтобы осуществить другие измерения, так как он был поглощен фотопластинкой и оставил метку, которая может выявиться при проявлении, но с точки зрения его дальнейшего использования для других экспериментов *он был уничтожен*. Этот последний тип измерений называется *вторым типом*.

КАНДИДО

Таким образом, первая стадия, описанная Миттельштедтом, состоит в *превращении состояния суперпозиции в смешанное состояние*.

АКАДЕМУС

Первая стадия более чувствительная: как только система переходит в смешанное состояние, ситуация вновь становится знакомой — аналогичной ситуации с рулеткой или игральной костью: мы знаем только один набор взаимоисключающих альтернатив и мы знаем вероятность каждой альтернативы.

МИТТЕЛЬШТЕДТ

... на втором этапе результат измерения получают при считывании показателя измерительного прибора...

... В то время как вторая стадия эквивалентна процессу измерения в классической физике и поэтому свободна от специфических проблем квантовой физики, первая стадия по существу является процессом квантовой физики, не имеющим классического эквивалента.

С помощью этого процесса исходное состояние W [суперпозиция] материально превратилось [в смешанное состояние], так что с точки зрения нового состояния наблюдаемый объект A объективирован⁴⁸...

⁴⁸P. Mittelstaedt, *The interrelation between language and reality in quantum physics*, in *Modelli scientifici della realtà fisica*, La Nuova Critica, 13–14, 1989.

КАНДИДО

Поэтому из двух состояний коллапса, которые Вы только что описали, первое является состоянием, в котором должна произойти *объективизация*.

АКАДЕМУС

Самое главное в *коллапсе волнового пакета* — это переход суперпозиция–смешанное состояние, а *punctum dolens* (деликатный вопрос) ортодоксальной интерпретации состоит в необходимости считать этот переход для того, чтобы преодолеть противоречие с экспериментальными данными (см. II.1), *не изменением нашего знания относительно данной физической системы*, типа того, что происходит при игре в кости, а *реальным физическим переходом между различными состояниями* одной и той же системы, подобно тому, как вода, замерзая, переходит из жидкого состояния в твердое.

ГЕРБЕРТ

... Каждое измерение делает нечто большее, нежели просто беспокоит: оно глубоко перестраивает структуру реальности в ней самой⁴⁹.

ПУТНАМ

Согласно копенгагенской интерпретации: *наблюдаемые*, такие как положение, существуют только тогда, когда были проведены подходящие измерения⁵⁰.

ДЖОРДАН

Наблюдение не только нарушает то, что должно быть измерено, но также и создает это: мы сами создаем результат измерения⁵¹.

КАНДИДО

Конечно, обычному человеку, *не эксперту*, такому как, например, я, действительно очень трудно согласиться с таким представлением о природе. Я могу понять недоумение Эйнштейна.

МИТТЕЛЬШТЕДТ

В отличие от классической физики процесс измерения в квантовой физике является не только пассивной записью бесспорно объективных фактов, а активным и частично разрушительным манипулированием системой, изменяющим ее состояние таким образом, что определенное свойство, которое не являлось объективным до процесса измерения, становится объективным

⁴⁹Nick Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, 1987, p. 114.

⁵⁰*A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *недостаточно достоверно Essays in Contemporary Science and Philosophy*, (1965), item 10.

⁵¹Цитата из *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN, 1995, p. 22.

после измерения. Результат такого манипулирования полностью не определен и может быть предсказан только посредством вероятностей. Такие вероятности описывают субъективное невежество наблюдателя после первой стадии процесса измерения, объективизации, а перед второй стадией — снятие показаний измерительного прибора⁵².

АКАДЕМУС

Вероятности, описывающие субъективное невежество, часто называются эпистемическими вероятностями. Они противостоят вероятностям, которые в литературе по квантовой теории называются объективными вероятностями, т. е. тем, которые, согласно Миттельшtedту, принимают участие на первом этапе процесса измерения. Мы еще вернемся к этому.

КАНДИДО

Конечно, мы об этом еще поговорим! Я слышал, что понятие объективной вероятности, как это только что описал Миттельшtedт, находится в очевидном противоречии с некоторыми экспериментальными данными (см. IX.3).

II.5. Статистическая интерпретация

КАНДИДО

Если суммировать сказанное, то физическая суперпозиция означает, что *наблюдаемое объективно не имеет значений*; смешанное состояние означает, что оно имеет значения, но я их не знаю. Вы действительно уверены, что любой физик согласен с этой странной теорией процесса квантового измерения?

АКАДЕМУС

Конечно уверены. Если бы мы не были уверены, то не обучали бы студентов этому и не писали об этом в популярных книгах и газетных статьях...

ФЕЙНМАН

То, о чем я собираюсь говорить, преподают студентам в университетах в течение последних лет. Для того, чтобы заставить вас отказаться покинуть дискуссию, только потому, что она не будет для Вас исчерпывающей, я скажу Вам, что мои студенты тоже не понимают этих вещей. А они их не понимают потому, что я сам тоже их не понимаю. Дело в том, что их никто не понимает⁵³.

⁵²P. Mittelstaedt, *The interrelation between language and reality in quantum physics*, in *Modelli scientifici della realtà fisica*, La Nuova Critica, 13-14, 1989, p. 99.

⁵³QED, p. 24-25.

КАНДИДО

Я не думаю, что Вы будете долго продолжать преподавать и популяризировать их. Как получилось, что до того, как были сделаны такие заявления, не имеющие ничего общего со здравым смыслом, никто не попытался выдвинуть какое-либо альтернативное предложение?

АКАДЕМУС

Многие пытались различными способами преодолеть эти мешающие нам термины. Например, с помощью так называемой *статистической интерпретации или интерпретации незнания или интерпретации в терминах объединения*, например, Маргенау, Поппер, Баллентайн, . . .

КАНДИДО

Что представляет собой эта статистическая интерпретация?

АКАДЕМУС

Согласно статистической (или объединительной) интерпретации волновой функции, коллапс (редукция) волнового пакета является не реальным физическим феноменом, а лишь изменением нашего знания, аналогично тому, что мы имеем, подбрасывая кость или монетку: если мой друг подбрасывает (без жульничества) в соседней комнате монетку, я предсказываю, что с вероятностью $1/2$ будет орел. Затем я иду и проверяю результат, который может быть либо орлом, либо решкой. Никто не думает, что монетка находится в неопределенном состоянии до тех пор, пока я не посмотрю на нее.

БАЛЛЕНТАЙН

Коллапс вектора состояния не является реальным физическим процессом⁵⁴.

ПОППЕР

Всем известно, что редукция волнового пакета всегда возникает в копенгагенской теории, когда *переход от возможного к действительному является полным* . . . т. е. когда действительное отделено от возможного, того, что сделано *наблюдателем*⁵⁵.

КАНДИДО

Пожалуйста, обратите внимание на тонкое, но важное отличие копенгагенской теории *перехода от возможного к действительному* от теории Поппера *отделения возможного от реального*. В первой именно физическая система осуществляет переход; в последней — такой переход касается только нашего знания.

⁵⁴Leslie E. Ballentine, *The Outlook from the Quantum Theory of Measurement*, in *The Interpretation of Quantum Theory: Where Do We Stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, November 1994.

⁵⁵K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 89.

ПОППЕР

Следовательно, редукция волнового пакета не является характерным явлением квантовой теории: это, в общем, явление теории вероятностей⁵⁶.

БАЛЛЕНТАЙН

Вектор состояния описывает статистические вероятности *группы* одинаково подготовленных систем⁵⁷.

КАНДИДО

Поэтому можно сказать, что Баллентайн думает, что все вероятности, предсказанные квантовой теорией, являются эпистемическими, т. е. относятся к состоянию нашего знания, а не к состоянию реальных физических систем. Того же типа, что и участвующие в классической физике.

АКАДЕМУС

Правильно. Это *статистическая* (или *ансамблевая*) *интерпретация* волновой функции. Ее приверженцы, такие как Баллентайн и Поппер, отрицают существование того, что мы назвали *состояниями физической суперпозиции*, т. е. таких состояний, в которых некоторые наблюдаемые не имеют реальных значений, а имеют только виртуальные.

КАНДИДО

Но тогда, с тех пор, как физики ввели интерпретацию, согласно которой в состоянии суперпозиции наблюдаемое не имеет значений, только для того, чтобы объяснить проблемы, поднятые *интерференционными членами*, это означает, что Баллентайн *доказывает*, будто причины, которые привели физиков к вводу состояний физической суперпозиции, являются ошибочными, и выдвигает альтернативное объяснение необходимости интерференционных членов.

АКАДЕМУС

Не думаю, что я когда-нибудь находил даже намеки на такие доказательства в книгах или статьях Баллентайна или других приверженцев статистической интерпретации. Похоже, что Баллентайн, также как до него Поппер, действовал в отношении этой системы, как говорят психологи, *подавлением*. Они выбросили эту проблему из головы, забыв про ее существование. Они что-то *утверждали*, но не анализировали причины, которые привели физиков к утверждению обратного.

КАНДИДО

Если я правильно понял, эта точка зрения особенно не развивалась, по-

⁵⁶К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientidica*, Il Saggiatore (1984), La Meccanica quantistica senza l'osservatore, nona tesi.

⁵⁷Leslie Ballentine: см. предыдущую ссылку.

тому что, хотя ее и принимали, она не объясняла, ни математически, ни физически, почему статистическая интерпретация не вызывала проблем в классической физике, а вызывала только в квантовой физике, как это показано в эксперименте с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

И именно потому, что это кажется вам приемлемым, не считаете ли Вы, что это покажется приемлемым для таких людей, как Гейзенберг, Дирак, Фейнман, Бор, ...? Не думаете ли Вы, что люди такого типа должны были иметь более серьезные основания для того, чтобы отказаться от теории, которая кажется настолько *приемлемой*? Дело в том, что статистическая интерпретация не имела большого успеха в научной среде, поскольку она не решает проблему интерференционных членов, она игнорирует их.

ЖИРАРДИ

Наша позиция состоит скорее в том, чтобы меньше соглашаться со строгой статистической интерпретацией, чем объяснять ее, исходя из проблем, поднятых этой теорией⁵⁸.

БУБ

... Терминология самой квантовой механики включает необычную и важную характеристику. Действительно, то, что называется *физическим состоянием индивидуальной* квантовой системы, как полагают, возникает только в ансамбле систем. Поскольку странно, что индивидуальная система может возникнуть таким способом в статистическом ансамбле, среди физиков существует тенденция молчаливо обходить эту проблему, интерпретируя волновую функцию как имеющую прямое отношение скорее к группе, нежели чем к индивидуальной системе. Другими словами, часто полагают, что волновая функция не должна быть связана с одной индивидуальной системой, а только с ансамблем одинаковых систем.

Эта интерпретация на самом деле несостоятельна, как это можно видеть из анализа простого гипотетического эксперимента⁵⁹.

КАНДИДО

Этот эксперимент является всего лишь версией эксперимента Бома и Буба с двумя отверстиями, который уже обсуждался в разд. II.1.

КАНДИДО

Если я правильно понял, критику статистической интерпретации можно

⁵⁸In *The Interpretation of Quantum Theory: Where Do We Stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, november 1994.

⁵⁹D. Bohm, J. Bub, *A proposed Solution of the Measurement problem in quantum Mechanics by a Hidden Variable theory*, Rev. Mod. Phys. 38, 1966, pp. 453-469.

суммировать следующим образом: суть ортодоксальной аргументации состоит в том, что *если бы статистическая интерпретация была правильной, то интерференционные члены не появились бы. Поскольку они появляются в экспериментах, статистическая интерпретация несостоятельна.*

АКАДЕМУС

Если кто-то хочет придерживаться вероятностной интерпретации волновой функции и избежать приписывания ей объективного значения, независимого от наблюдателя, совершенно необходимо преодолеть эти интерференционные члены.

КАНДИДО

С другой стороны, только с возникновением принципа суперпозиции и следующих из него интерференционных членов появился специфический квантовый феномен.

АКАДЕМУС

Некоторые сторонники статистической интерпретации были определенно осведомлены об этих трудностях.

МАРГЕНАУ

Удаление коолапса волнового пакета делает невозможным подготавливать состояния тем способом, которого придерживался Дирак и другие⁶⁰...

АКАДЕМУС

Он ясно ссылается на *состояния суперпозиции.*

КАНДИДО

Подведем итог. Ортодоксальная школа отрицает, что если бы статистическая интерпретация была правильной, то интерференционные члены появились бы. Поскольку они появляются в экспериментах, то делается вывод, что статистическая интерпретация несостоятельна. Сторонники статистической интерпретации, кажется, никогда не были способны дать убедительный ответ на это возражение.

II.6. Парадоксы?

КАНДИДО

Мне все меньше и меньше нравится эта идея физиков о том, что состояния суперпозиции соответствуют новому *способу существования материи*, при котором наблюдаемое в состоянии суперпозиции не имеет точных значений, а только виртуальные, которые становятся реальными в процессе

⁶⁰H. Margenau, Phys. Rev. 1935.

измерения. Я нахожу это весьма далеким от духа науки. Кроме того, ясно, что если такая теория была принята, будет детской забавой выстроить весь диапазон внешне различных парадоксов, которые на самом деле являются различными вариантами одной и той же идеи.

АКАДЕМУС

Действительно, я часто слышу о парадоксах квантовой теории, но мне кажется, что это несправедливо драматизируется. В конце концов, что представляют собой все эти квантовые парадоксы? Здравый смысл называет парадоксом каждую точку зрения, к которой он недостаточно привык. Тогда, конкретно в случае квантовой теории я не понимаю, в чем смысл использования термина парадокс, поскольку это выражение не относится к реальным противоречиям между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными, а только к вопросам интерпретации, которые, как бы они ни были, возможно, далеки от здравого смысла, не имеют практических последствий.

КАНДИДО

Однако мы можем согласиться с тем фактом, что когда говорят о *парадоксах квантовой теории*, ссылаются на внутреннюю логику того, что мы называем *ортодоксальной интерпретацией*; на совместимость последней с принципами других физических теорий, таких как релятивистская теория; на действительную или кажущуюся невозможность соединить эти принципы и, следовательно, различные теории, которые на них основываются, в единый взгляд на природу.

Кроме того, если там и была драматизация, так это именно физики, или, по крайней мере, некоторые из них, хотели этого.

ПЕРЕС

Термин *квантовые парадоксы* относится к предсказаниям квантовой механики, противоречащим четким предсказаниям классического реализма⁶¹.

АКАДЕМУС

Иногда некоторые парадоксы возникают просто из того факта, что математические модели описывают аппроксимации и идеализации физической реальности. С помощью тщательного исследования можно было бы выделить парадоксы в любой теоретической модели реальности.

Это происходит, например, когда уравнения, описывающие явление диффузии (которые широко используются, и с хорошими практическими

⁶¹ Asher Peres, *Classification of Quantum Paradoxes: Nonlocality vs. Contextuality*, in *The Interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, November (1994) 187–204, § 1.

результатами, в технике, физике, биологии, ...), применяются для описания специфических явлений природы. Такие уравнения предсказывают явления быстрого распространения, которое нельзя проверить в природе. Так, например, если мы бросаем кусочек сахара в Неаполитанский залив, то, согласно этим уравнениям, в течение сколь угодно малого интервала времени (скажем, пол-секунды) часть сахара должна переместиться в Гудзонов залив. Сделав вычисления, мы видим, что этот кусочек настолько мал, что ни один измерительный прибор не сможет подтвердить его наличие, и поэтому описание, снабженное уравнением диффузии, справедливо до тех пор, пока не имеют место ошибки, которыми можно пренебречь. Однако остается тот факт, что диффузия, подобная той, что была только что описана, в принципе невозможна.

КАНДИДО

Так же как и парадоксы и основные принципы некоторых физических теорий, эти теории всегда играли важную роль побудительного мотива в отношении исследования отдельных научных дисциплин и их взаимосвязи.

АКАДЕМУС

Например, так называемый парадокс Лошмидта, касающийся возможности вывода в принципе необратимой теории, такой как термодинамика, из обратимой теории, такой как механика, в настоящее время все еще является отправной точкой любой глубокой и сложной программы исследований.

КАНДИДО

В случае квантовой теории ортодоксальная интерпретация, согласно которой некоторые наблюдаемые объекты, находящиеся в состоянии суперпозиции, не имеют определенного значения, а принимают только одно значение как результат измерения, дает начало трем типам парадоксов.

- I. Парадоксы, касающиеся существования действий, осуществляемых на расстоянии, в противоположность принципу о том, что все взаимодействия распространяются с ограниченной скоростью, что является краеугольным камнем релятивистской теории.
- II. Парадоксы, касающиеся микро- и макроскопических отношений.
- III. Парадоксы, касающиеся роли сознания экспериментатора в процессе измерения.

АКАДЕМУС

Вы продолжаете называть их *парадоксами*, но я не вижу в них ничего парадоксального. Я бы назвал их *концептуальными новинками*, к которым мало-помалу должен привыкать здравый смысл.

КАНДИДО

Единственный способ понять, должен ли здравый смысл привыкнуть к этим интерпретациям, или же академическая общественность должна изменить их, — это подробно изучить эти так называемые парадоксы.

II.7. Кошка Шрёдингера

БАФИКО

... На макроскопическом уровне мало кто сомневается в объективной реальности⁶² ...

КАНДИДО

Если принимается теория, согласно которой процедура измерения *создает* измеряемые свойства для микроскопического мира, то та же самая теория должна также быть принята и для макроскопического мира. Макроскопические объекты в действительности состоят из микрообъектов и, более того, нельзя четко и объективно отделить макроскопическое от микроскопического.

АКАДЕМУС

В отношении этой точки зрения нет единодушия. Некоторые, как например Мермин, отрицают четкое различие между макроскопическим и микроскопическим и, как мы это видели, делают свои выводы⁶³.

КАНДИДО

Но, отрицая четкое разделение между микро- и макрообъектами, нужно тогда допустить, что макроскопические объекты созданы в результате простого наблюдения за ними. Разве я не могу сказать, что я создаю луну, просто наблюдая за ней? Разве я создаю Вас, просто рассматривая Вас, и, напротив, *если я не наблюдаю за Вами, Вы не существуете?*

АКАДЕМУС

Физик, соглашающийся с интерпретацией квантовой механики, преподаваемой во всех университетах мира, должен ответить *да* на оба вопроса.

⁶²R. Bafico, M. Parodi, *La rivoluzione probabilistica nella scienza moderna*, Genova, 19.9.1991.

⁶³N. D. Mermin, *Physics Today* 43, 6 (1990) p. 9, § (1.3).

ЭЙНШТЕЙН

... Он действительно убежден, что луна существует только тогда, когда ее наблюдают⁶⁴?

АКАДЕМУС

Я не понимаю, почему этот вывод относительно луны должен рассматриваться менее приемлемым, чем тот же самый вывод относительно микроскопических частиц.

КАНДИДО

Возможно потому, что, рассуждая таким образом, можно прийти к заключению, что если бы это имело место, то существо, которое могло бы *наблюдать весь мир целиком*, могло и создать весь этот мир!

ПУТНАМ

Маргенау и Вигнер отвечают: всеобъемлющая логичность всех частей квантовой механики, особенно в тех случаях, когда теорию заставляют распространяться на всю Вселенную, никогда не доказывалась и не провозглашалась⁶⁵.

КАНДИДО

Для теории, претендующей на звание основной, такое утверждение несовместимости действительно не вдохновляет. С другой стороны, я не вижу в утверждении Маргенау и Вигнера ничего специфического для квантовой теории, я имею в виду то, что не может быть приписано другим теориям. Наконец, даже если то, что говорят эти авторы, правда, то также верно и то, что до сих пор не появилось ничего, что могло бы доказать или хотя бы оправдать утверждение о неприменимости теории суперпозиции ко всей Вселенной.

АКАДЕМУС

Есть и другой путь рассуждения от Бора до Людвиг, согласно которому четкое разделение на макроскопическое и микроскопическое существует, и парадоксы квантового измерения имеют место только в микроскопическом мире.

ПУТНАМ

Такая формулировка была бы, вероятнее всего, неприемлема для самих Бора и Гейзенберга. Они принимали утверждение о том, что наблюдаемые микроявления не имеют четких значений до того как происходит измерение. И они согласились бы с тем, как мы только что видели, чтобы этот принцип

⁶⁴ Abraham Pais, *Subtle is the lord*, Oxford University Press (1982).

⁶⁵ *A Philosopher Looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *undoubtedly*, *Essays in contemporary Science and Philosophy*, 1965, item 24.).

был ограничен микропеременными. В этом смысле они сильно отличаются от Лондона и Бауэра, а также, возможно, и от фон Неймана, которые придерживались мнения, что все наблюдаемые могут иметь неточные значения, если они измеряются не *сознательно*. Бор и Гейзенберг являются реалистами в макрофизике и сторонниками того, что природа микрокосмоса такова, что мы не можем достигнуть успеха, думая о ней в реалистичных терминах. Мы имеем дело с тем, что было названо *неклассическим отношением между системой и наблюдателем*. Но в этом случае речь идет, с их точки зрения, о специфической природе микрокосмоса, без какого-либо особого вклада сознания человека в определение физической реальности. Что, на мой взгляд, Бор и Гейзенберг не замечают — так это то, что их интерпретация должна быть ограничена наблюдаемыми микроявлениями с самого начала и что относительная четкость наблюдаемых макроявлений является затем невыводимым допущением их теории⁶⁶.

КАНДИДО

Если я правильно понимаю, этот способ мышления предназначен для преодоления парадоксов, которые возникают вследствие применения принципа *физической суперпозиции* к макроскопическому миру, посредством простого отрицания того, что такие *суперпозиции* могут иметь место в макроскопическом мире, и, таким образом, ограничивая их микроскопическим миром.

ПУТНАМ

Прежде всего, Гейзенберг настаивает на том, что, по крайней мере в тех случаях, когда речь идет о наблюдаемых макроявлениях, редукция волнового пакета не является физическим изменением, а представляет собой просто сбор информации. Гейзенберг говорит лишь о том, что любая система, которая включает аппарат для микроскопических измерений, никогда не была известна как исключительно чистое состояние, а лишь как смешанное состояние⁶⁷.

АКАДЕМУС

В более конкретных терминах можно сказать, что согласно Бору и Гейзенбергу микроскопические объекты подчиняются законам квантовой механики, в то время как макроскопические подчиняются законам классической физики.

ПУТНАМ

Одна ошибочная попытка прийти к этому заключению была предприня-

⁶⁶ *A Philosopher looks at Quantum Mechanics*, впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *недостаточно Essays in contemporary Science and Philosophy*, 1965.

⁶⁷ См. предыдущую ссылку.

та с помощью обращения к известным *теоремам о классическом пределе* квантовой механики. Согласно этим теоремам, система, подчиняющаяся законам классической физики и не подчиняющаяся соответствующим микроскопическим неопределенностям, будет вести себя одинаково как в квантовой механике, так и в классической физике. Другими словами, если мы возьмем полностью классическую систему, скажем, машину, состоящую из механизмов и рычагов, и с большим трудом перенесем описание этой системы в математический формализм квантовой механики, то волновое представление даст информацию о том, что различные макроскопические наблюдаемые, определенные в этой системе, могут изменяться со временем, хотя волна будет распространяться в соответствующем пространстве, и это распространение будет происходить таким образом, что рассматриваемые макронаблюдаемые вновь приобретут четкие значения на длительный отрезок времени.

Короче говоря, если макронаблюдаемые имеют четкие значения в начале, то они вновь приобретут четкие значения в конце рассматриваемого промежутка времени, без допущения того, что имело место какое-то измерение. Этот результат показывает, что в некоторых случаях из квантовой механики следует, что макронаблюдаемые вновь приобретут четкие значения, независимо от наличия или отсутствия взаимодействия. К сожалению, существуют иные случаи, из которых следует диаметрально противоположное заключение, и эти случаи имеют большое значение. Наиболее известный из них — это так называемый *случай кошки Шрёдингера*⁶⁸.

КАНДИДО

Так называемый *парадокс кошки Шрёдингера* состоит в следующем. В клетке закрыты кошка, некоторое количество радиоактивного материала и стеклянная трубка, содержащая ядовитый газ. Два последних предмета соединены таким образом, что когда радиоактивность превышает некоторое пороговое значение, трубка разбивается, и газ убивает несчастную кошку. Явление, управляющее всем этим механизмом, основывается на распаде радиоактивного вещества, который, в свою очередь, описывается квантовой теорией. Эта последняя говорит о том, что через некоторое время после того, как система изменяется в отсутствие наблюдения за ней, комплекс радиоактивный материал, *кошка-яд* находится в состоянии суперпозиции. В частности, Шрёдингер замечает, что поскольку жизнь или смерть являются физическими состояниями кошки, ортодоксальная интерпретация

⁶⁸См. предыдущую ссылку (item 24).

говорит о том, что кошка, когда никто ее не наблюдает, находится в состоянии суперпозиции, в котором она ни жива, ни мертва, но пребывает в обоих состояниях. По крайней мере так учат в настоящее время.

ЦЕРРАТО

Согласно квантовой механике, до тех пор пока клетка не открыта, т. е. не производятся измерения, кошка ни жива, ни мертва, но в состоянии суперпозиции: поэтому она мертва + жива⁶⁹.

АКАДЕМУС

Белл предложил менее ужасный вариант парадокса, в котором трубка с цианидом заменена на бутылку с молоком, а состояния *жива-мертва* заменены на *сыта-голодна*. Смысл, однако, остается прежним.

ПУТНАМ

Благодаря причудам природы мы можем отметить, что пример с кошкой Шрёдингера отражает физическую ситуацию, которая возникает довольно часто, действительно такую, какая встречается в экспериментах по квантовой механике⁷⁰.

КАНДИДО

Почти в каждом эксперименте любая микроскопическая неточность умножается таким образом, что влияет на что-то, выявляемое человеком, — и поэтому обнаруживается на макроуровне. В этом смысле *кошка Шрёдингера* — не патологический эксперимент, сконструированный к настоящему времени, но представляет пример парадигмы любого процесса для измерения свойств микромира.

АКАДЕМУС

Вывод парадоксален (в этимологическом смысле этого слова) только потому, что, согласно общепринятому мнению, возможно быть либо живым, либо мертвым, но не тем и другим одновременно.

Как бы то ни было, совсем не ясно, в химическом, физическом и биологическом смысле, какое состояние — жизни или смерти — свойственно кошке или любому другому живому существу. Следовательно, я не вижу возможности говорить о *суперпозиции между состоянием жизни и состоянием смерти*.

КАНДИДО

Это возражение кажется довольно слабым: если мы полагаем, что основные законы, управляющие физическим миром, одни и те же от микро- до

⁶⁹Simona Cerrato in *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN, 1995, p. 4.

⁷⁰H. Putnam, см. предыдущую ссылку.

макромира, от материи до биосистем, то кошка, или человек, или растение являются физическими системами, похожими на другие, и поэтому могут быть, по крайней мере теоретически, описаны волновой функцией. То, что, вполне возможно, я не знаю деталей этой волновой функции, является фактом, а не принципом.

АКАДЕМУС

Но даже принимая это чисто платоновское понятие состояния, *кошка может находиться в состоянии суперпозиции между жизнью и смертью только тогда, когда никто за ней не наблюдает*. Поэтому в этом случае противоречие с экспериментальными данными отсутствует: странные утверждения о ненаблюдаемых кошках нельзя ни подтвердить, ни фальсифицировать, поэтому они не относятся к физике.

КАНДИДО

Тем не менее, остается фактом то, что если бы ненаблюдаемое физическое состояние кошки являлось суперпозицией жизни и смерти, то именно экспериментатор, открывая клетку, убил или оживил бы ее, как Лазаря. Вы не можете отрицать, что в сравнении со здравым смыслом этот взгляд на мир является достаточно странным.

АКАДЕМУС

Но согласно Копенгагенской интерпретации, любая странность ограничена зоной ненаблюдаемости. Поэтому я не понимаю, о чем вы беспокоитесь, поскольку как только Вы встретили нечто, то вследствие взаимодействия с Вами, оно будет вынуждено выбирать между жизнью и смертью.

II.8. Макрореализм или микронереальность?

ЛЕЖЕ

Здесь имеется, возможно, слабое место в обосновании, приводящее к парадоксу [квантового измерения], настолько очевидному, что действительно удивительно, что в спорах, продолжавшихся последние пятьдесят лет, это привлекало так мало внимания . . .

. . . гипотеза о том, что законы квантовой механики применимы к сложным и, возможно, высокоорганизованным макроскопическим сущностям настолько, насколько они применимы к микроскопическим объектам, таким как электроны и атомы, просто сводится к гипотезе, для которой в настоящее время нет прямого и детального объяснения⁷¹.

⁷¹ A. J. Legget, *Reflections on the Quantum Measurement Paradox*, in B. J. Hiley, F. D. Peats (eds.), *Quantum Implications, Routledge and Keegan Paul*, 1987, p. 85-104.

АКАДЕМУС

Положение, согласно которому нельзя подготовить суперпозиции, различные на макроскопическом уровне, было названо *макрофизическим реализмом*, или *макрореализмом*. Это эквивалентно утверждению, что наблюдаемые макроскопические явления всегда имеют четкие (или *почти четкие*) значения, и поэтому разрушения волнового пакета не происходит. Как мы видели в разделе I.3, это положение ранее было поддержано Бором и Гейзенбергом.

ЖИРАРДИ

Квантовая механика включает в себя нечто большее, нежели простой индетерминизм, что означает, что мы не можем даже думать, что электрон имеет и местоположение и скорость, и поэтому мы предупреждены относительно рассуждений о микроскопических объектах в реалистических терминах... В таком случае возникает проблема, где необходимо провести границу между микроскопическим миром и миром специфических и точных событий... «Именно эта проблема является основной проблемой квантовой механики»⁷².

КАНДИДО

Такие авторы должны скорее называться *микронереалистами*, а не *макрореалистами*. Я не понимаю, как можно считать удовлетворительным положение, разрушающее единство физики и ведущее к постулату существования типов законов, качественно различающихся и не сводящихся друг к другу: один тип имеет значение в микромире, второй — в макромире. Один утверждает, что когда вовлечено много частиц, появляется новое явление *коллективного* типа, и поэтому исследование макроскопических состояний агрегации вещества не является просто применением основополагающих законов микромира. Другой утверждает, что основные законы не применимы к макроскопическому миру.

Мое эстетическое чувство восстает против этого.

АКАДЕМУС

А при чем тут эстетическое чувство? Мы здесь говорим о науке, а не об искусстве или литературе.

КАНДИДО

Разве не существует *эстетики научных теорий*? Разве эстетическое чувство ученого не является основным инструментом в его исследованиях?

⁷² *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN (1995), p. 18.

АКАДЕМУС

Я должен признать, что идея о том, что законы микрокосмоса не применимы к макрокосмосу, так сильно взволновала некоторых людей, что было предпринято несколько попыток преодолеть основную трудность в точке зрения Бора и Гейзенберга, при помощи поиска в квантовой теории или ее модификации механизма, исключающего состояния суперпозиции для макроскопических объектов, или, по крайней мере, некоторых из них.

ЧИНИ

Основным положением квантовой механики (КМ) является принцип суперпозиции состояний. Если ψ_1 , ψ_2 — два собственных состояния переменной G , соответствующие собственным значениям g_1 , g_2 , то

$$\psi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2 \quad (1)$$

находится в состоянии, в котором значение G в значительной степени не определено до тех пор, пока оно не приобретет одно из двух возможных значений в процессе измерения. Нет сомнений в важности уравнения (1) и его интерпретации для микроскопических систем.

КАНДИДО

Счастлив тот, у кого нет сомнений, потому что он будет жить беззаботно.

ЧИНИ

... Однако возникает вопрос, имеет ли это уравнение значение для макроскопических тел. Этот вопрос является решающим для проблемы макроскопического реализма. Мы привыкли думать, что переменные макроскопических тел всегда имеют определенные значения (хотя мы их можем и не знать). Эта гипотеза расходится с утверждением квантовой механики, согласно которому в состоянии (1) G не определено до измерения. Как примирить всемирное значение квантовой механики с нашим повседневным опытом⁷³?

ПУТНАМ

Короче говоря, что нужно, так это доказательства того, что суперпозиции состояний, в которых наблюдаемые макроявления имеют радикально разные значения, не могут быть подготовлены физически. К сожалению, кажется маловероятным, что в квантовой механике существует нечто, что могло бы привести к этому выводу⁷⁴.

⁷³I. Chiatti, M. Cini, M. Serva, *Is macroscopic quantum coherence incompatible with macroscopic realism?*, Il Nuovo Cimento, 110 B (1995), 585–592.

⁷⁴*A Philosopher looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), *недостовечно Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965.

КАНДИДО

Недавно некоторые авторы, такие как Калдейра, Леже и др., предложили эксперименты для выяснения того, могут ли макроскопические системы находиться в суперпозициях макроскопически различимых состояний. С квантовой точки зрения такие системы называются *кошками Шрёдингера*.

КАНДИДО

Вместо этого некоторые теоретики решили *доказать*, а не только допустить, как это сделали Бор и Гейзенберг, что макроскопическое наблюдаемое всегда имеет четкие значения, так же как и то, что микроскопические наблюдаемые имеют промежуточные значения.

АКАДЕМУС

Первые такие попытки принадлежат Данери, Лойнгеру и Проспери⁷⁵, которые в ряде работ, выполненных в 60-х г., пытались доказать, что при самых обычных условиях наблюдаемые явления, связанные с макроскопическими системами, всегда имеют четкие значения, даже тогда, когда никто за ними не наблюдает.

КАНДИДО

Я не могу вообразить, как можно *доказать* что-то в этом роде.

АКАДЕМУС

Это достаточно просто. Мы уже видели, что необходимость принимать тот факт, что наблюдаемые, на которые не смотрят, имеют неопределенные значения, происходит вследствие существования так называемых *интерференционных членов*. Данери, Лойнгер и Проспери демонстрируют нам, что для большого класса макроскопических систем эти *интерференционные члены* настолько малы, что ими практически можно пренебречь.

КАНДИДО

Можем ли мы интерпретировать этот результат как доказательство того факта, что *макрореализм* Бора и Гейзенберга совместим с их *микронереализмом*?

АКАДЕМУС

Строго говоря, ответ будет *нет*, потому что как бы малы они ни были, интерференционные члены не равны нулю. Как бы то ни было, *во всех практических отношениях* ответом является *да*. Другими словами, если даже со строго логической точки зрения мы должны продолжать говорить, что *луны нет, если никто ее не наблюдает* (т.е. она не имеет точного местоположения), с другой стороны, в любом практическом отношении мы можем также сказать, что она находится *где-то там*.

⁷⁵ A. Daneri, A. Loinger, G. M. Prosperi, Nuclear Phys. 33 (1962), p. 297.

КАНДИДО

Я несколько озадачен: *находится ли луна в определенном месте, когда никто ее не наблюдает*, является чисто теоретической проблемой, я бы даже сказал *чисто спекулятивной*. Говорить, что эта проблема решена *во всех практических отношениях*, похоже на шулерство.

АКАДЕМУС

Некоторые критикуют результаты Данери, Лойнгера и Проспери на том основании, что их анализ не является достаточно изящным для объяснения, почему существуют квантовые эффекты, затрагивающие определенные макросистемы, такие как сверхтекучесть и сверхпроводимость. Такие эффекты показывают, что макроскопичность сама по себе недостаточна для сведения к нулю интерференционных членов.

АКАДЕМУС

Однако программа *макрореализма*, заключающаяся в сведении нереального к микромиру, т. е. к отказу только от реальности микроскопических объектов при сохранении реальности макроскопических объектов, продолжает очаровывать некоторых специалистов в области квантовой теории измерения. Жирарди, Римини и Вебер⁷⁶ недавно значительно подняли планку исследований, начатых Людвигом и получивших дальнейшее развитие в работах Проспери, Ланца, а также в школах Милана и Марбурга. Они изобрели несколько примеров, демонстрирующих, каким образом интерференционные члены становятся в некоторых случаях настолько малыми, что ими можно пренебречь, в течение чрезвычайно короткого времени.

КАНДИДО

Это означало бы, что кошка Шрёдингера не может быть одновременно живой и мертвой более чем долю секунды.

АКАДЕМУС

Каким бы странным это Вам ни показалось, есть авторы, которые именно это и утверждают.

КАНДИДО

Вы думаете, что это удовлетворительное решение с концептуальной точки зрения?

АКАДЕМУС

Не знаю: мы, физики, не интересуемся философией. Но этот Ваш скепти-

⁷⁶ Доклад об этих идеях и библиографические ссылки см. Gian Carlo Ghirardi, *An Attempt at a Macrorealistic Quantum Worldview*, in *The interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, novembre 1994, 25–48.

цизм не означает ли случайно, что Вы считаете модели, изученные макро-реалистами, неинтересными?

КАНДИДО

Я не отрицаю, что они могут быть интересными, я только отрицаю, что они имеют *фундаментальное* значение. Они являются моделями, представляющими собой примеры ситуаций, когда в соответствии с определенными численными значениями некоторых параметров *какой бы микроскопической* ни была система, интерференционные члены становятся такими, что ими можно пренебречь: состояние кошки является суперпозицией живого и мертвого в сравнимой пропорции только на несколько мгновений, после чего в суперпозиции превалирует живое или мертвое, и макрореалисты счастливы, поскольку они думают, что они таким образом доказали, что даже если ненаблюдаемые все-таки не существуют, как говорят ортодоксы, то они *почти существуют*. Стиль рассуждений такой же как и у тех, кто хотел бы принимать квантовое действие на расстоянии, *так как, помимо всего прочего, оно не может быть использовано для передачи сообщений*.

АКАДЕМУС

Но такое *существование вблизи*, означающее, что в некоторых моделях интерференционные члены сведены к нулю, уже было показано Данери, Дойнгером и Проспери. Вопрос о том, способны ли модели макрореалистов решить проблему, эти ученые оставляют открытым: отделяя макроскопические системы, демонстрирующие явления квантовой интерференции, от явлений, не имеющих их?

КАНДИДО

Нет, они не могут сделать это сейчас, поскольку их анализ основывается на универсальных принципах, а не на специальных (*ad hoc*) моделях. Спустя много лет все еще не существует удовлетворительного в концептуальном смысле ответа на замечание Эйнштейна:

ЭЙНШТЕЙН

Поскольку в принципе я не вижу различий между микро- и макротелами, я думаю, что нужно предположить существование широко недетерминированного положения, когда волновая природа физического объекта концептуально очевидна⁷⁷.

⁷⁷Цитата из Maria Maggi, *Lo spazio vuoto è un «mare» di particelle in continua attività*, L'Osservatore Romano, 9-11-1993.

II.9. Нелокальность

КАНДИДО

Мне говорили, что эта теория квантового измерения, помимо того, что она является довольно странной, находится также в противоречии с релятивистской теорией.

ПОППЕР

Эйнштейн (в короткой статье в «Dialectica», 1948) выдвинул тезис о том, что квантовая механика подразумевает действие на расстоянии, но этот тезис не получил распространения⁷⁸.

АКАДЕМУС

Мне известны эти слухи. Все это ерунда. Квантовая теория измерения действительно не противоречит релятивистской теории.

КАНДИДО

Что Вы имеете в виду под *действительно не противоречит*?

АКАДЕМУС

Кое-кто полагает, что квантовая теория измерения нарушает принцип локальности, но это неверно, поскольку такое нарушение не может иметь никакого практического эффекта.

КАНДИДО

Что означает *нелокальность*?

БЕРНАРДИНИ

... Нелокальность означает более или менее мгновенный обмен информацией между действительно удаленными частями системы с помощью действия на расстоянии, несовместимого с пространственно-временными свойствами. Относительность пространства-времени подразумевала бы, что действия распространяются с ограниченной скоростью, не более чем со скоростью света⁷⁹...

АКАДЕМУС

Говорить о нелокальности или о *действии на расстоянии* — это одно и то же. Например, если землетрясение происходит в Сан-Франциско, это, возможно, приведет к возникновению цунами у побережья Японии, но необходимо некоторое время, чтобы цунами от Сан-Франциско распространилось до Японии. Точно так же, что бы ни произошло на Солнце, требуется около восьми минут, чтобы уловить это на Земле. Относительность Эйнштейна

⁷⁸К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), pp. 15–16.

⁷⁹Carlo Bernardini, «L'Espresso», 14th April 1991.

распространяется на все физические взаимодействия — ситуации, представленные в данных примерах; что бы ни происходило в Сан-Франциско или на Солнце, требуется некоторое время для возникновения эффекта в Японии или на Земле: немедленное распространение исключено.

КАНДИДО

Но тогда должно быть ясно, что современная интерпретация квантовой теории подразумевает эту нелокальность и эти действия на расстоянии.

АКАДЕМУС

Почему?

КАНДИДО

Давайте рассмотрим систему, находящуюся в состоянии суперпозиции с точки зрения наблюдаемого. В таком состоянии, согласно ортодоксальной интерпретации, частица не имеет достаточно определенного положения, а размазана в пространстве и ее *склонность* (используя любимое словечко Поппера) появляться в одном месте, а не в другом, выражается через вероятность нахождения этой частицы в данном месте, предсказанном квантовой теорией. Когда частица *мгновенно материализуется* в определенном месте, ее виртуальное присутствие в любой другой точке пространства *мгновенно отменяется*: это похоже на то, как если бы любая другая точка пространства получила бы сообщение о том, что частица материализована в точке X , и поэтому она не может материализоваться где-то еще.

Эта *мгновенная отмена* определенно является действием на расстоянии, что противоречит теории относительности. Эта тема, которую поднял еще Эйнштейн на конгрессе в Солвее (Solvay) в 1927 г., содержит *in nuce* (в сущности) все последующие дебаты, посвященные нелокальности. Как и всякая другая концептуальная проблема квантовой теории, эта также хорошо проявляется в эксперименте с двумя отверстиями: если, прежде чем самой локализоваться на экране, частица была волной, то вся волна должна была взаимодействовать со всем экраном. С другой стороны, поскольку с единичной частицей-волной между двумя экранами взаимодействует максимум один счетчик, то отсюда следует, что всем остальным счетчикам, помещенным на других участках экрана, постоянно должно передаваться сообщение не реагировать на их частичное взаимодействие с волной. Это опять-таки *мгновенная отмена*. Такое *мгновенное распространение информации* в большой части пространства (такой как экран) является типичным примером нелокальности.

АКАДЕМУС

Однако явления размазывания в пространстве и явление конгломерации в

исходное состояние на небольшом участке, как правило, присущи ненаблюдаемым. Поэтому такой контраст, когда из двух конкурентных теорий одна обеспечивает ряд результатов, которые могут быть проверены экспериментально и несовместимы с другой теорией, нетрадиционен. В этом как раз и состоит причина различий между *мировоззрениями*: в поле наблюдаемых явлений отсутствует противоречие между релятивистской и квантовой теориями, и, наоборот, хотя в данный момент нельзя сказать, что существует вполне удовлетворительный синтез обеих, некоторые наиболее важные открытия нашего времени были получены непосредственно вследствие соединения основных принципов этих двух теорий.

КАНДИДО

Я согласен с Вами в отношении исторической плодотворности соединения этих двух теорий, но я не понимаю, почему различие между релятивистским мировоззрением и мировоззрением квантовой теории кажется вам столь незначительным. Допущение основополагающих противоречий между двумя наиболее важными теориями нашего времени не кажется мне столь уж тривиальным.

АКАДЕМУС

Наиболее известным из парадоксов, объясняющих такой контраст на конкретном примере, является так называемый парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена, который в дальнейшем мы будем обозначать как ЭПР.

КАНДИДО

Что он собой представляет?

АКАДЕМУС

Туллио Редже объяснит вам это с помощью примера, который является популярным вариантом знаменитого образца доказательства.

КАНДИДО

Если я правильно помню, исходная цель работы Эйнштейна, Подольского и Розена состояла в том, чтобы подчеркнуть факт, что описание системы с помощью квантовой теории нельзя рассматривать в качестве *полного* описания.

АКАДЕМУС

Это верно, но Маргенау был, возможно, первым, кто указал на то, что суть ЭПР состояла не столько в полноте квантовой теории, сколько в совместимости современной интерпретации этой теории с принципом локальности.

КАНДИДО

Все ли согласны с этим тезисом?

АКАДЕМУС

Не все, например...

ДАЙСОН

... Существует знаменитый эксперимент, предложенный Эйнштейном, Подольским и Розеном, который идеально демонстрирует трудности квантовой теории и доказывает необоснованность идеи о том, что электрон может существовать в объективном состоянии, независимо от наблюдателя⁸⁰...

АКАДЕМУС

Все же я думаю, что большинство физиков сказали бы, что Дайсон путает тезис с гипотезой. В современной интерпретации парадокса ЭПР утверждение квантовой теории, согласно которой *идея о том, что электрон может существовать в объективном состоянии, независимо от наблюдателя, оказывается несостоятельной*, является исходным пунктом, из которого выводится противоречие с принципом относительности.

КАНДИДО

Поэтому существуют: первоначальная цель ЭПР, его современная интерпретация, интерпретация Дайсона, а также, возможно, некоторые другие... Мы попытаемся выбраться из этой путаницы. Как бы то ни было, начнем с формулировки этого парадокса.

РЕДЖЕ

... Предположим, что мы помещаем черный шар и белый шар в урну для голосования. Я кладу один из шаров в карман, не глядя на него, а мой друг проделывает то же самое с другим шаром. Затем мы садимся в разные самолеты, летящие в противоположных направлениях, и, поскольку мы разделены, мы рассматривает цвет шаров. Если я нахожу черный шар, то я могу быть уверен в том, что мой друг взял белый шар, и наоборот⁸¹...

КАНДИДО

Мне кажется, что я всегда слышу одно и то же, сказанное разными словами! В этом случае альтернатива такова: *белый шар или черный шар*, т. е. наблюдаемым явлением с точки зрения того, какого рода суперпозиция имеет место, в данном случае является цвет шара. В этом случае простая интуиция также подсказала бы, что в моем кармане находится либо белый, либо черный шар: *tertium non datur — третьего не дано*. Я полагаю, что Редже, подобно Фейнману и Гейзенбергу, сравнит эту простую интуицию с результатами удавшихся экспериментов и придет к знакомому (к настоящему времени) заключению, что...

⁸⁰F. J. Dyson, *Turbare l'Universo*, Boringhieri, 1981, p. 287.

⁸¹T. Regge, «L'Espresso», 12 giugno 1983, p. 156.

РЕДЖЕ

... частица не такая до тех пор, пока ее не измерят.

КАНДИДО

Но это именно позиция Уилера: *Явление не является явлением до тех пор, пока оно не есть наблюдаемое явление.*

РЕДЖЕ

... В случае с черным и белым шарами интуиция подсказывает, что всегда существует шар определенного цвета в моем кармане, а цвет *существует* независимо от моего наблюдения. Напротив, в квантовой механике мы должны оставить этот детерминизм⁸²...

АКАДЕМУС

Как вы можете видеть, Редже называет *детерминизмом* то, что почти любой другой автор называет *проблемой существования объективной реальности, независимой от наблюдателя*, но то, что это является той же проблемой, подтверждается фактом, что вывод является тем же самым.

РЕДЖЕ

... Белый или черный — это результат измерения, и он становится реальным, когда эксперимент выполнен. Но процесс измерения нарушает измеряемую систему и нельзя отделить субъект от объекта: электрон и микроскоп являются единой системой. По этим причинам мы осторожны, говоря об объективной реальности в реальном мире⁸³...

АКАДЕМУС

Если Вы подождете еще одно мгновение и дадите ему закончить говорить, Вы увидите, что Редже использует те же аргументы, которые Вы уже слышали. Напротив, он считает доказанной современную интерпретацию квантовой теории, описанную Гейзенбергом, Фейнманом, ..., согласно которой процесс измерения вызывает физическую реальность, которая ранее существовала на виртуальном уровне. Вы должны, однако, отметить, что тот факт, что я и мои друзья очень далеки друг от друга (мы, как они говорят, *пространственно разделены*), до сих пор не играл никакой роли. Теперь, однако, пространственное разделение вводит новый элемент в спор: *нелокальность*.

РЕДЖЕ

Если я выну черный шар и определю, что он черный, то я должен сказать, что я сделал его черным в процессе определения (измерения); что черный

⁸²См. ссылку 17.

⁸³См. ссылку 17.

цвет стал реальным только в тот момент, когда я наблюдал его. Из этого следует, что белый цвет шара в кармане моего друга также реален вследствие моего эксперимента. Поэтому я создал реальность на расстоянии, мгновенно, с помощью простого измерения локального атрибута⁸⁴ ...

КАНДИДО

Подводя итог, можно сказать, что с помощью измерения, произведенного в моем кармане здесь, в Италии, я могу мгновенно создать реальность в кармане моего друга, даже если он находится в Токио.

ЖИРАРДИ

Это означает, что теория оказывается в основе своей нелокальной, что значит, что результат измерений, произведенных в определенном месте пространства, может зависеть от измерения (и/или его результата), проведенного в удаленной системе в одно и то же время⁸⁵.

РЕДЖЕ

... Многие находят эти выводы неприемлемыми с философской точки зрения⁸⁶ ...

КАНДИДО

Это замечательно! Возникает противоречие между двумя фундаментальными физическими теориями, но физики провозглашают, что это их не касается, поскольку это составляет предмет философии.

При всем уважении к Редже, я думаю, что философия не имеет ничего общего с этой проблемой, что это проблема касается исключительно физики. Возможно, не верно, что одним из физических столпов теории относительности является явное запрещение любого действия на расстоянии?

АКАДЕМУС

Конечно, это так.

КАНДИДО

Таким образом, вывод, следующий из аргументации Редже, в общем, не является философским, но он непосредственно касается физики: если аргумент верен (а мы увидим, что это не так), то это является примером нелокальности квантовой механики и поэтому доказывает существование противоречия между этой теорией, или, по крайней мере, ее современной интерпретацией, и специальной теорией относительности.

⁸⁴См. ссылку 17.

⁸⁵In *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN (1995), p. 34.

⁸⁶См. ссылку 17.

БЕЛЛ

На мой взгляд, это основная проблема квантовой теории: кажущееся существенным противоречие каждой точной формулировки квантовой теории основным принципам относительности⁸⁷.

АКАДЕМУС

Я не уверен, что говорить о противоречиях правильно. Потому что нелокальность, как это подразумевается современной интерпретацией квантовой теории, действительно является мгновенным обменом информацией на расстоянии, но...

БЕРНАРДИНИ

... Это является информацией в очень специфическом смысле: невозможно послать телеграмму с Земли на Марс с помощью квантовой механики⁸⁸...

ШИМОНИ

В этом смысле имеет место мирное сосуществование квантовой механики и теории относительности, несмотря на квантово-механическую нелокальность⁸⁹.

АКАДЕМУС

Единственным физическим эффектом, производимым на частицу 2 в процессе измерений, проводимых над частицей 1, является изменение состояния суперпозиции в отношении цветов частиц на состояние, в котором цвет определяется хорошо. Но такой эффект, как правило, не наблюдается, потому что частица может быть в состоянии суперпозиции только в том случае, если никто ее не наблюдает. Тогда тот, кто хочет раскодировать сообщение, будет озадачен следующей дилеммой: если он не наблюдает за частицей, он не знает, изменилось ли ее состояние или нет; если он наблюдает за ней, он не знает, изменилось ли ее состояние вследствие измерения, произведенного им, или вследствие измерения, произведенного его коллегой, находящимся вдали.

Поэтому даже если была принята ортодоксальная интерпретация, сверхсветовое сообщение может быть отправлено только при условии, что никто его не читает, т. е. только при условии, что никто не может проверить, действительно ли это сообщение является сверхсветовым.

КАНДИДО

С другой стороны, если мы принимаем: (I) ортодоксальную интерпрета-

⁸⁷Phys. Rep. 137 (1986), pp. 7-9.

⁸⁸Carlo Bernardini, «L'Espresso», 14th April 1991.

⁸⁹A. Shimony, *The Reality of the Quantum World*, «Scientific American», January 1988, pp. 36-43.

цию и (II) возможность отличить с помощью измерения, осуществленного на одном объекте, состояние суперпозиции от смешанного состояния, то тогда действительно возможно, по крайней мере в принципе, использовать корреляции ЭПР для того, чтобы посылать сверхсветовые сигналы.

Для того, чтобы сделать это, достаточно подготовить источник, испускающий частицы, имеющие свойства, описанные в аргументации ЭПР (т. е. каждая пара находится в синглетном состоянии — определение дано в начале следующей главы), и иметь двух экспериментаторов (которые будут называться соответственно передающим и принимающим), расположенных на очень большом расстоянии друг от друга при наличии у них синхронизированных часов. Кроме того, предполагается, что экспериментаторы будут находиться на одинаковом расстоянии от источника. Каждый раз, когда источник испускает пару частиц, одна из них попадает к передающему, а вторая к принимающему.

При каждом попадании передающий решает, измерять или не измерять частицу. Согласно гипотезе (I) и определению синглетного состояния, сделав это, принимающий изменяет состояние обеих частиц, превращая его из состояния суперпозиции в смешанное состояние. Вследствие синхронизации принимающий знает, когда передающий осуществляет измерение, и через долю секунды также производит измерение для того, чтобы определить, попадает ли частица на его прибор в состоянии суперпозиции или в смешанном состоянии. Вследствие гипотезы (II), он может вывести такое различие для одной частицы. Обозначая символом 0 суперпозицию, а символом 1 смешанное состояние, передающий может мгновенно (и поэтому значительно быстрее скорости света) отослать сообщение, закодированное в двоичной системе, на приемник.

АКАДЕМУС

Очень похоже на научную фантастику, почти поэтично, но не реально: гипотеза лишена оснований. Принимающий не может отличать состояние суперпозиции от смешанного состояния посредством измерения отдельной частицы.

КАНДИДО

Может быть лучше объяснить, почему.

АКАДЕМУС

Предположим, что два спина, предназначенные для измерения, находятся всегда в проекции на одно направление, скажем, x . Датчик в обоих случаях обнаруживает $+1$ или -1 , причем каждое с вероятностью $1/2$ и этого недостаточно, чтобы решить, являлось ли первоначальное состояние супер-

позицией или смешанным состоянием. Это общеизвестный факт: поскольку различие между этими двумя типами состояния описывается в терминах суперпозиции, мы уже доказали в II.2, что такое различие *не может быть замечено у одного индивидуума*.

КАНДИДО

Этот аргумент кажется убедительным: я тоже думаю, что сверхсветовые телекоммуникации по-прежнему будут являться уделом научно-фантастических книг и фильмов. Другими словами, это еще раз подтверждает несостоятельность позиции физиков в отношении суперпозиции: с одной стороны, они продолжают говорить, что такое состояние касается *отдельной частицы*; с другой стороны, как Вы только что мне доказали, если я могу выявить такое состояние с помощью измерения, выполненного над отдельным объектом, тогда я мог бы также посылать сверхсветовые послания, существование которых физики отрицают. Вы мне можете объяснить, каков смысл говорить об индивидуальном свойстве, которое нельзя проверить на одном индивидууме?

АКАДЕМУС

Некоторые люди, приняв невозможность пересылки сверхсветовых сообщений, пытаются использовать корреляции ЭПР для передачи закодированных сообщений: из таких попыток выросла новая дисциплина: *квантовая криптография*.

МАНГО

Экспериментатор в фирме IBM, используя принципы неопределенности и квантовой корреляции, успешно отослал закодированные сообщения на 30 см. Может показаться, что это не так уж много. Но это по крайней мере означает, что теория верна. Это может подразумевать другое практическое использование квантовой механики, хотя и весьма отдаленное. Вспомните транспортировщики в Star Trek — устройства, которые по команде «Beam me up, Scotty» (Перенеси меня, Скотти) уносили Спока и Капитана Кирка прочь от опасности? Да, теория квантовых корреляций говорит о том, что мы можем создать такое устройство⁹⁰.

АКАДЕМУС

Действительно, я слышал, что в 1989 г. Чарльз Беннет из IBM и Джайлз Брассард из Монреальского университета действительно создали квантовый криптограф на основе корреляций ЭПР. Артур Эккерт написал отчет об этом событии⁹¹. Поскольку я не нахожу ничего странного в создании квантового

⁹⁰Paul Mungo, *Worlds apart*, GQ: Gentlemen's Quarterly, October 1993, p. 63.

⁹¹New Scientist, 16-1-1993.

криптографа, я делаю вывод о том, что такой прибор вполне возможен и способен переносить материю.

КАНДИДО

По какому принципу работает квантовый криптограф, основанный на корреляциях ЭПР?

АКАДЕМУС

Источник частиц, находящихся в синглетном состоянии, как и в эксперименте ЭПР, генерирует идеально антикоррелированные пары. Если Вы и я синхронизируем наши часы и одновременно выполним измерения, каждый из нас будет точно знать, что обнаружил другой. Например, если я в ходе измерений получил +, то я знаю наверняка, что Вы получили —. Если мы произведем несколько измерений, то мы получим наборы двоичных чисел, которые известны только Вам и мне. На этой стадии я могу позвонить Вам и сказать, например: *«Возьмите результаты, которые Вы получили в первом, пятом, седьмом... эксперименте»*. Я не боюсь, что кто-нибудь может подслушать наш телефонный разговор, поскольку он не знает, какие мы получили результаты. Таким образом, я передаю Вам наборы двоичных (бинарных) символов (в нашем случае этими символами являются + и —). Поскольку каждое сообщение можно закодировать двоичными символами, если у нас имеются достаточно длинные серии экспериментов, я могу послать Вам любое сообщение.

КАНДИДО

Однако мы а priori должны договориться, когда мы будем осуществлять эти эксперименты, поскольку если наши измерения не вполне синхронизированы, мы не можем быть уверены в том, что измеряем одну и ту же синглетную пару, и поэтому не сможем использовать совершенные антикорреляции. Предположим, например, что мы хотим создать последовательность из N символов. Тогда мы а priori должны договориться о N моментах, когда будем производить эксперименты. Пренебрегая секундами, каждый момент определяется *четырьмя целыми числами* по порядку (например, 20, 30). Поэтому для каждой пары символов мы должны *предварительно договориться* о четырех целых числах. Вы уверены, что больше не существует экономичных методов для передачи символов друг другу, возможно, основанных на теории хаотических динамических систем?

АКАДЕМУС

Мы должны договориться о проведении эксперимента каждый час или каждую минуту.

КАНДИДО

Предположим также (хотя, возможно, это излишне), мы хотим производить эксперимент каждую минуту: час состоит из 60 минут, а день из 24 часов. Это означает, что в течение дня мы можем обменяться очень коротким сообщением: менее 10 000 знаков. Более того, ужасно медленно и с ужасно низкой надежностью, поскольку достаточно пропустить один бит для полной потери информации, переданной после ошибки.

АКАДЕМУС

Возвращаясь к теме сообщений, передаваемых со скоростью, превышающей скорость света, можно подвести следующий итог этой ситуации: мгновенный обмен информацией происходит, но поскольку такая информация не может быть использована для передачи сообщений, она не представляет интерес для физиков.

ЖИРАРДИ

К счастью для теории относительности и к несчастью для инженеров телекоммуникаций надежда на успех при использовании рассматриваемого процесса для передачи сигналов со скоростью, превышающей скорость света, оказывается тщетной⁹².

КАНДИДО

Насколько мне известно, специальная теория относительности утверждает, что физическое взаимодействие *не* может распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. *Абсолютно никакое взаимодействие*, а не только то, которое используется для отправки телеграмм или телефонных звонков.

АКАДЕМУС

Правильно, но Вы не можете не согласиться с Бернардини или Жирарди в отношении того факта, что та информация, которую никто не может использовать, является довольно специфичной...

КАНДИДО

Я имею в виду, что то, каким образом используется информация, совершенно не важно для принципа специальной теории относительности: если имеет место мгновенная передача информации, что означает мгновенное изменение физической реальности на расстоянии, то существует противоречие с этим принципом независимо от того, каким образом я буду использовать эту информацию.

⁹²In *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN (1995), p. 34.

АКАДЕМУС

Я не хотел бы Вас обидеть, но эта точность напоминает мне доказательства математиков. Как может иметь какое-то значение противоречие, если из него не следует ничего практического? С моей точки зрения это на самом деле не является противоречием...

КАНДИДО

А как бы Вы это назвали? *Маленькое противоречие, противоречьице, ...?*

ПОППЕР

Дж. С. Белл сформулировал заново эксперимент ЭПР в свете открытия Эйнштейном того факта, что квантовая механика подразумевает действие на расстоянии. Новые эксперименты, особенно эксперименты Аспекта, по-видимому, подтверждают дальное действие. Моя реакция на это заключается в следующем: я на самом деле не убежден, что эти эксперименты интерпретируются правильно; но если это так, то мы не можем не согласиться с наличием дального действия⁹³.

КАНДИДО

Думаю, не было более оправданной осторожности, чем осторожность Поппера. Интерпретация экспериментов Аспекта и ему подобных как доказательства дального действия и нелокальности квантовой теории являлось исторической ошибкой, от которой рано или поздно физики должны будут отказаться. Но мы вернемся к этому в гл. VIII.

II.10. Парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена

КАНДИДО

Пример Редже с цветными шариками на самом деле является распространенной идеализацией. Существуют ли ситуации, важные с физической точки зрения, при которых эффект, описанный парадоксом ЭПР, на самом деле имеет место?

АКАДЕМУС

Существует много таких примеров, важных с физической точки зрения. В одном из них рассматриваются две пространственно разделенные частицы, которые находятся очень далеко друг от друга по сравнению с их размером, и приготовлены таким образом, что если определенное наблюдаемое (спин или поляризация в заданном направлении) принимает значение +1 для первой частицы, то для второй частицы оно непременно примет значе-

⁹³К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 24.

ние -1 и наоборот. Эти значения выражены в соответствующих единицах измерения, и никакое иное значение невозможно для такого наблюдения. Что касается рассматриваемых наблюдаемых, система, образованная двумя частицами, может поэтому находиться в двух различных и взаимоисключающих состояниях: одно состояние — в котором данное наблюдаемое принимает значение $+1$ для первой частицы, и -1 для второй, которое будет обозначаться как $(+, -)$, и противоположное состояние, которое будет обозначаться как $(-, +)$. Более того, мы полагаем, что система, образованная двумя частицами, подготовлена таким образом, что она находится в состоянии суперпозиции, а не в смешанном состоянии.

Тогда, в соответствии с ортодоксальной интерпретацией, если мы утверждаем, что система находится в одном и только одном из двух взаимоисключающих состояний $(+, -)$ или $(-, +)$, мы приходим к противоречию. Вместо этого необходимо говорить, что система находится в состоянии, в котором она является половиной состояния $(+, -)$ и половиной состояния $(-, +)$, в обоих случаях с одной и той же вероятностью. Единственным законом, который определяет принадлежность к тому или иному состоянию, является случай.

КАНДИДО

Вы уверены, что такие состояния можно подготовить в лаборатории?

АКАДЕМУС

Они существуют и называются *синглетными состояниями*. Их можно создать путем разделения изолированной частицы с нулевым спином и расщеплением ее на две частицы со спинами $+1$ и -1 . Поскольку суммарный спин не должен меняться, одна из двух частиц должна иметь спин $+1$, а другая — спин -1 . Мы также знаем, что такие состояния невозможно перемешать, однако должны существовать состояния суперпозиции. В синглетном состоянии, если результат измерения, относящийся к первой частице равен $+1$, то мы с уверенностью можем заключить, что составная система находится в состоянии $(+, -)$, а если результат равен -1 , она находится в состоянии $(-, +)$. Этот факт можно констатировать, говоря, что в синглетном состоянии *спин двух частиц строго антикоррелирован*.

КАНДИДО

Подведем итог. Аргумент Эйнштейна, Подольского и Розена указывает на противоречия между:

- (i) утверждениями *ортодоксальной интерпретации*, согласно которым:
 - (a) невозможно, чтобы в состоянии суперпозиции, в котором находится

наблюдаемое, такое наблюдаемое имело точное значение; (b) переход от таких промежуточных, просто виртуальных, значений к точным значениям соответствует реальному изменению физического состояния (коллапс волнового пакета), что происходит посредством взаимодействия с измерительным прибором;

- (ii) значимостью *экспериментальных предсказаний* квантовой теории;
- (iii) принципом *локальности* взаимодействий, согласно которому каждое взаимодействие распространяется со скоростью, меньшей скорости света в вакууме.

АКАДЕМУС

Эйнштейн, Подольский и Розен допускали *как* важность экспериментальных предсказаний квантовой теории относительно синглетного состояния (поскольку они были экспериментально выверены с большой степенью точности), *так и* принцип локальности. Затем они пришли к заключению, что *ортодоксальная интерпретация была неверна*: значения наблюдаемых являются элементами физической реальности: они существуют даже в том случае, если никто не пытается их измерить.

КАНДИДО

Если я не ошибаюсь, на основании этих умозаключений они пришли к выводу, что квантовая теория не является полной: если такие значения существуют, а теория не может их точно предсказать, это означает, что теория является неполной, а человечество должно быть нацелено на более полную и исчерпывающую теорию.

АКАДЕМУС

Нужно отложить обсуждение *возможности пополнения* квантовой теории до разд. III.8, где мы будем обсуждать принцип неопределенности и скрытые переменные.

КАНДИДО

На будущее я хотел бы узнать немного больше об аргументе ЭПР.

АКАДЕМУС

Для того, чтобы говорить об экспериментальной проверке аргумента ЭПР, необходимо иметь в виду, что именно тот математический формализм, который обычно описывал спин в различных направлениях пространства, может быть использован для описания *поляризации фотонов*, т. е. света⁹⁴. Свет, так

⁹⁴Поляризация, которая для нас то же самое, что и *линейная поляризация*, является направ-

же как и спин, может быть поляризован в любом направлении пространства и, поскольку математический формализм, описывающий обе величины, один и тот же, из этого следует, что любое теоретическое заключение по поводу спина, основанное на этом формализме, например, аргумент Белла, может быть также применен к поляризации, и наоборот. Этой универсальностью квантового формализма воспользовались экспериментаторы, которые проводили эксперименты в отношении аргумента Белла не по спине, а по поляризации света.

КАНДИДО

Спин, поляризация, . . . , для меня это просто слова, они мне не напоминают ни о какой интуиции . . .

АКАДЕМУС

Вы можете иметь грубую идею, довольно приблизительную, но достаточную для того, о чем мы будем говорить позже, имея в виду, что если Вы заставляете много частиц одного и того же типа проходить через некую область пространства, в которой имеется сильное магнитное поле, ориентированное по направлению a , то все частицы, чей спин в направлении a имеет значение $+1$, будут отклоняться вверх, а те, чей спин в направлении a имеет значение -1 , будут отклоняться вниз.

КАНДИДО

А что же поляризация?

ШИМОНИ

Устройством, подходящим для измерения поляризации, является пленка или поляризующееся вещество. Пленка тщательно подготавливается таким образом, что она пропускает весь падающий на нее под нужным углом свет, если свет линейно поляризован вдоль определенного направления, различного на пленке и называемого *осью прохождения* (оптической осью). Тогда пленка поглощает весь падающий на нее по нормали свет, если свет линейно поляризован вдоль направления, перпендикулярного оси прохождения.

АКАДЕМУС

Если выбрано направление, находящееся под углом к оси прохождения, то

лением электрического поля, связанного с фотоном, однозначно определяемым единичным вектором длины. Единственное, что требуется для обсуждения аргумента ЭПР – это знание того, что поляризация является физическим наблюдаемым, допускающим значения $+1$ и -1 (в соответствующих единицах), что каждое направление в пространстве связано с поляризацией и что поляризации, связанные с различными направлениями, являются несовместимыми наблюдаемыми.

о прохождении одиночного фотона ничего нельзя сказать, в то время как в отношении прохождения множества фотонов квантовая механика предсказывает прохождение определенной их части. Такая часть называется *вероятностью прохождения*, и эксперименты подтверждают эти предсказания квантовой теории.

Мы говорим об *идеальной пленке*, поскольку в действительности невозможно получить пленку, которая останавливала бы весь свет, поляризованный вдоль направления, перпендикулярного оси прохождения, и которая пропускает его целиком, если он поляризован параллельно этой оси. Эти условия не выполняются полностью, а только с достаточно большой степенью приближения.

КАНДИДО

Такие идеализированные представления типичны для всех физиков, занимающихся как классической, так и квантовой механикой, поэтому причина беспокойства находится, конечно же, не в этом. Но что происходит, если направление поляризации света ни параллельно, ни перпендикулярно оси прохождения пленки?

АКАДЕМУС

Квантовая теория утверждает, что мы непрерывно меняем направление от полного прохода света до полного затемнения: предположим, что мы начнем со слабого света и пленки, ось прохождения которой строго параллельна направлению поляризации света. В этом случае мы говорим, что весь свет пройдет через пленку.

Тогда, сохраняя фиксированным направление поляризации, мы начнем медленно вращать ось прохождения таким образом, что она будет составлять все больший и больший угол с направлением поляризации, о котором мы говорили выше. Чем ближе угол к нужному значению, тем меньше света будет проходить, до тех пор пока мы не получим нужный угол, и свет вообще проходить не будет.

Имея в виду тот факт, что свет состоит из отдельных квантов, фотонов, на этом можно настаивать, говоря, что вероятность проникновения фотона через пленку непрерывно изменяется от 1 (поляризация фотона параллельна оси прохождения) до 0 (перпендикулярная поляризация).

КАНДИДО

Поэтому, если мы интерпретируем спиновый формализм в терминах поляризации, спиновый знак $+$ в направлении a соответствует поляризации, параллельной оси a ; знак $-$ соответствует поляризации в перпендикулярном направлении.

АКАДЕМУС

Синглетное состояние в отношении поляризации является состоянием, в котором имеется два фотона, которые упорядочены таким образом, что, если один из них наверняка проходит через поляризационную пленку *с осью прохождения, ориентированной вдоль произвольного направления*, другой фотон определенно не пройдет через другую поляризационную пленку с осью прохождения, ориентированной в том же направлении, что и предыдущая ось.

КАНДИДО

Каким образом можно экспериментально установить, находится ли последовательность пар фотонов в синглетном состоянии?

АКАДЕМУС

Чтобы это сделать, необходимо с помощью лазеров возбудить некоторые атомы кальция, помещенные в вакуумную камеру, что и сделал Аспект для проверки аргумента Белла. Возбужденные атомы через некоторое неопределенное время, которое нельзя точно предсказать, возвращаются в исходное состояние, испуская два фотона, перемещающихся в противоположном направлении. На заданном расстоянии от атома (в эксперименте Аспекта — 6,5 м) помещаются две поляризующие пленки с ориентацией осей прохождения в одном и том же направлении. Позади каждой пленки помещен детектор фотонов. Синглетное состояние соответствует тому факту, что детекторы, расположенные позади обеих пленок, никогда не *издают щелчок* в одно и то же время: если один издает щелчок — другой молчит, и наоборот.

КАНДИДО

Но если в определенный момент времени щелчок издает только один, каким образом я узнаю, что это *пары*, а не отдельные фотоны?

АКАДЕМУС

Это просто: если пленки убрать, оба детектора *всегда* будут издавать щелчок одновременно. Следовательно, атомы кальция испускают *пары* фотонов. Тот факт, что при установке поляризующих пленок детекторы *никогда* не издадут щелчок одновременно, означает, что фотоны каждой пары имеют ортогональную поляризацию. Иначе говоря, фотоны *строго антикоррелированы*.

КАНДИДО

Эта строгая корреляция сохраняется во времени?

АКАДЕМУС

Да, если пара остается *изолированной*, т.е. фотоны каждой пары в это

время ни с чем не взаимодействуют. Говоря техническим языком, оба фотона связаны *законом сохранения*.

КАНДИДО

Это напоминает мне белые и черные шарики, о которых говорил Редже, описывая парадокс ЭПР. В том случае сохраняющейся величиной являлся цвет. В этом же случае — общий спин или общая поляризация. Должны ли мы тогда заключить, что одна и та же ситуация имеет место во всех трех случаях (поляризация, спин, цвет)?

АКАДЕМУС

В обоих случаях действует закон сохранения. Разница состоит в том, что, используя язык квантовой теории, в случае с шариками имеет место смешанное состояние; в случае ЭПР — суперпозиция (т. е. синглетное состояние).

Две системы в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемой величины, которая сохраняется во времени, называются *сцепленными* или *несепарабельными*. Было бы более точным сказать *сцепленные в отношении данного наблюдаемого*, но, как и в случае суперпозиции, это часто подразумевается.

Если две системы сцеплены, это означает, что никакое свойство не может быть приписано какой-нибудь отдельной составляющей системе.

Сцепленность подразумевает нелокальность, т. е. элемент физической реальности мгновенно обнаруживается на расстоянии.

ШИМОНИ

Вот некоторые новые странные открытия, которые мы должны принять. *Во-первых*, два элемента, которые находятся на расстоянии нескольких метров друг от друга и не имеют возможности общаться, могут, однако, быть сцепленными. Они могут демонстрировать поразительные корреляции своего поведения, так что измерение, выполненное над одним элементом, вероятно, мгновенно влияет на результат измерения другого.

Это открытие нельзя объяснить с классической точки зрения, но это полностью согласуется с квантовой механикой⁹⁵.

КАНДИДО

Редже для того, чтобы объяснить явление ЭПР, использовал аналогию с цветными шариками. Если у меня сначала есть белый и черный шарики, даже после перемещения их на большом расстоянии друг от друга я уверен, что один из них всегда будет белым, а другой — всегда будет черным. Это

⁹⁵ A. Shimony, in «Scientific American», January 1988.

строгая антикорреляция вовсе не кажется мне *поразительной*. Поскольку цвет является сохраняющейся величиной подобно спину, в чем состоит разница между обычным законом сохранения и *сцепленным* состоянием?

АКАДЕМУС

Если вы не понимаете, в чем состоит разница между *нелокальностью* и классическим законом сохранения, Вы упускаете основное различие между старой и новой физикой. Цвет классических шариков хорошо определяется в любой момент; в случае *пары квантовых шариков*, находящихся в состоянии суперпозиции, ни один не имеет определенной окраски, но вследствие закона сохранения, путем измерения одного я могу также материализовать цвет другого шарика. Это квантовая взаимосвязь, т. е. *сцепленность*.

КАНДИДО

Понимаю: шарики, которые Редже использовал в своем примере, не *сцеплены* в отношении цвета, потому что в отношении такого наблюдаемого они не находятся в состоянии суперпозиции. Напротив, поскольку пары фотонов в эксперименте ЭПР сцеплены в отношении поляризации, то согласно ортодоксальной интерпретации поляризация фотона не имеет четкого значения, а только виртуальные значения, которые становятся реальными в процессе измерения, которое, в данном случае, состоит в ударе фотона о поляризующую пленку. Поэтому, если я *объективизирую* один, я *объективизирую* также и второй.

АКАДЕМУС

Это и есть *сцепленность* или квантовая *взаимосвязь*. Что касается отказа от реализма, то для выявления существования этой квантовой взаимосвязи некоторые физики обращаются к экспериментам.

БОМ

Эксперименты... стремятся подтвердить строгим методом существование квантовой взаимосвязи⁹⁶...

ДЖ. ГВИТТОН

Квантовая физика показывает нам, что природа является неделимым целым, в котором все взаимосвязано...

АКАДЕМУС

Квантовая физика? То же самое можно сказать и о классической физике!

ДЖ. ГВИТТОН

Целостность мира, похоже, существует везде и в любое время. Поэтому идея

⁹⁶D. Bohm, B. J. Hiley, *Intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory*, Found. of Phys. 5, 1975, pp. 93–109.

о пространстве, разделяющем два объекта большим или меньшим расстоянием, теперь, похоже, не имеет большого значения. Возьмем, например, эти две книги, лежащие на столе. Очевидно, что наши глаза и наш разум подсказывают нам, что они отделены друг от друга некоторым расстоянием. Но что сказал бы физик? Начиная с того момента, когда два объекта начинают взаимодействовать, мы должны думать, что они образуют единую систему и, следовательно, неразделимы.

АКАДЕМУС

Это представление о неразделимости не имеет ничего специфического для квантовой теории. Это также важно и для классической теории.

Г. БОГДАНОВ

Представление о несепарабельности появилось в 20-е г. одновременно с первыми квантовыми теориями. В то время оно привело к возникновению острых дискуссий, в которых приняли участие также и знаменитые ученые, включая Эйнштейна, который в 1935 г. опубликовал статью, которая вызвала большой интерес и которая показала, что квантовая теория была неполной. Как можно объяснить этот феномен? Выяснив, что решить эту проблему весьма сложно, физики предложили две интерпретации.

Первая состоит в том, что фотон *A* позволяет фотону *B* узнать, что происходит, благодаря сигналу, передаваемому от одного к другому со скоростью, превышающей скорость света. Получив весьма осторожное одобрение, эта интерпретация в настоящее время все более и более отвергается физиками, которые отдают предпочтение тому, что Нильс Бор имел обыкновение называть *индивидуальностью квантового действия*, или несепарабельностью квантового опыта. Согласно последней интерпретации, мы должны принять идею о том, что две частицы света, даже если они удалены друг от друга на миллиарды километров, являются частью единого целого: между ними существует какое-то таинственное взаимодействие, которое обеспечивает постоянный контакт между ними. В качестве достаточно приблизительного примера допустим, что если я обжигая свою левую руку, моя правая рука немедленно получит информацию и отпрянет назад, сделав движение, подобное тому, которое сделала моя левая рука, поскольку мои руки являются частью моего тела⁹⁷.

КАНДИДО

Хороша идея! Если я соглашаюсь с этим тезисом, я должен заключить, что для моего тела законы физики не важны! Если кто-то наступит мне на ногу,

⁹⁷Jean Guitton, *Dio e la scienza*, Bompiani, 1992.

сообщение о боли не будет распространяться по моим нервным волокнам, пока не достигнет мозга. Поскольку я представляю собой *целое*, такое сообщение должно мгновенно распространиться до мозга. Но экспериментально можно доказать, что это не так, я даже думаю, такой эксперимент уже был осуществлен.

АКАДЕМУС

Но Вы не являетесь неразделимым целым в том смысле, в каком являются две частицы в синглетном состоянии.

КАНДИДО

Неужели? А кто тогда решает, кто является и кто не является неразделимым целым? Может быть, суд? Думаю, что с помощью этого вопроса о несепарабельности некоторые люди пытаются решить реальную проблему просто с помощью разговоров: они говорят, что две различные вещи на самом деле являются одной и забывают о проблеме. Но этот путь ведет в никуда. Как говорил Гильберт, для того, чтобы решить проблему, недостаточно изменить названия независимых переменных.

АКАДЕМУС

Объясните.

КАНДИДО

Здесь особенно нечего объяснять. Тезис, который Богданов приписывает Бору, больше похож на риторический прием, чем на научный аргумент: релятивизм не позволяет двум системам обмениваться информацией со скоростью, превышающей скорость света; похоже, что современная интерпретация квантовой теории противоречит этому тезису примером ЭПР; некоторые люди хотят совместить несовместимое, *утверждая*, что на самом деле две частицы, участвующие в примере ЭПР, *не являются двумя системами, но лишь одной*. Если суждение на основании такого аргумента зависело бы от суда, то можно было бы убедить не только провинциальный суд!

АКАДЕМУС

Дело в том, что Богданов не ошибается, приписывая эту теорию Бору. Не только Бор, но и многие другие известные ученые даже сегодня верят в эту теорию *несепарабельности* (или *сцепленности*, или квантовой *взаимосвязи*) и распространяют ее.

КАНДИДО

Таким образом, если бы мы могли подтвердить, что и в квантовой физике свойства объектов (такие как цвет) хорошо определяются, если никто их не наблюдает, тогда эта *квантовая несепарабельность* потеряла бы свою

таинственную ауру и ниспустилась бы до обычных классических законов сохранения.

АКАДЕМУС

Если бы мы только могли сделать так, чтобы то, о чем Вы говорите, было бы правдой! Но, поскольку современная физика доказывает, что мы не можем этого сделать, Ваша гипотеза напрасна.

КАНДИДО

Мы вернемся к ней в разд. VI.1, когда будем анализировать то *доказательство*, о котором Вы говорите. А теперь продолжим.

ГЛАВА III

III.1. Экспериментальная метафизика

КАНДИДО

Наконец-то понятно, что общего между атомом Гейзенберга, электроном Фейнмана, цветными шариками Редже и фотоном Уилера: каждый раз, когда мы наблюдаем, мы обнаруживаем, что возможна одна и только одна альтернатива, но согласно современной физике, если мы пытаемся утверждать, что точно такой же однозначный и исключительный выбор происходит также и тогда, когда мы не наблюдаем, мы приходим к противоречию с экспериментальными данными.

АКАДЕМУС

Это означает, что *ненаблюдаемые* системы имеют только виртуальные атрибуты, которые становятся реальными в результате процесса измерения. В этом случае говорят, что физики лишены реализма.

КАНДИДО

Я не могу понять точку зрения тех физиков, которые настойчиво говорят: *«Неосуществленные эксперименты не имеют результатов!»*, а затем, сделав логический скачок, который можно объяснить большой боязнью метафизики, интерпретируют это утверждение следующим образом: *«Неизмеренные наблюдаемые не имеют значений»*. Следует подчеркнуть, что без метафизической суперструктуры их утверждения были бы настолько тривиальными, что не заслуживали бы даже того, чтобы их высказывали вслух.

АКАДЕМУС

Состояние *суперпозиции* в примере Гейзенберга означает, что ненаблюдаемый электрон не может находиться в одной и только одной половине ящика, но в некотором смысле *он должен находиться в обеих половинах*; в случае эксперимента с двумя отверстиями это означает, что ненаблюдаемый электрон не может проходить сквозь одно и только одно из двух отверстий: в некотором смысле *он должен проходить через оба отверстия*; ненаблюдаемый фотон не может являться либо волной, либо корпускулой, но в некотором смысле *он может быть и тем и другим*.

Во всех этих случаях важно уточнение *ненаблюдаемого*: все *наблюдаемые* атомы, электроны, фотоны находятся в одной половине ящика и проходят только через одно отверстие . . .

КАНДИДО

А что если вместо того, чтобы продолжать настаивать на том, что они *не могут делать*, мы захотели бы рассмотреть все это с позитивных позиций и задались бы вопросом: *что делают атом и электрон, когда никто за ними не наблюдает?*

АКАДЕМУС

То, что делает *ненаблюдаемый* электрон, не может касаться теории, основанной на физических экспериментах. Физические законы касаются только электронов, которые *наблюдали* или *наблюдают*.

БОРН

Мне кажется, что такие утверждения, как *наблюдаемая величина имеет значение* (представленное точкой в физическом континууме), не имеют какого-либо физического смысла. Современная физика достигла своих лучших результатов, применив методологический принцип, согласно которому концепции, применение которых требует отличительных особенностей, которые теоретически нельзя наблюдать, являются бессмысленными¹.

КАНДИДО

Даже при желании принять такой экстремальный операционализм эта точка зрения согласуется с тем, что Вы утверждали минуту назад.

АКАДЕМУС

Почему?

КАНДИДО

Если Вы хотите отмежеваться от утверждений физиков о том, *что делает ненаблюдаемый электрон*, логики ради Вы также не должны ничего говорить и о том, *чего ненаблюдаемый электрон делать не может*. Но, согласно Фейнману и ортодоксальным представлениям, во избежание несообразности *необходимо* утверждать, что *ненаблюдаемый электрон* вообще *не может пройти* через одно и только одно из двух отверстий.

Коротко говоря, направление рассуждений (при желании отделить от физики вопросы о поведении *ненаблюдаемых систем*) должно устранить противоречие, возникающее в эксперименте с двумя отверстиями, посредством ограничения с помощью аксиомы этого противоречия *миром ненаблюдаемых частиц*.

¹ M. Born, *The Concept of Reality in Physics*, Bulletin of the Atomic Scientist 14, 1958.

АКАДЕМУС

С другой стороны, Вы не можете отрицать, что интерпретация современной квантовой теории выражается таким способом, что никогда нельзя будет доказать ее логическую несообразность.

КАНДИДО

Да, но она также выражается таким способом, что ее, скорее всего, никогда нельзя будет подвергнуть экспериментальной проверке. В чем состоит разница между этим утверждением и утверждением, что, когда никто не наблюдает, на острие булавки танцуют семь ангелов? Как можете Вы, физики, прикрываться такими утверждениями?

АКАДЕМУС

Согласно Б. Расселу, аналогичным является следующее утверждение: *дождь не может идти в той стране, где нет глаз, которые могли бы наблюдать за тем, идет дождь или нет.* С логической точки зрения это не вызывает возражений, однако, как правило, невозможно выяснить экспериментально, правда это или нет. Для того, чтобы это сделать, я должен взять прибор, который будет фиксировать наличие дождя в этой стране. Но, осуществляя это, я бы нарушил посыл о том, что не существует глаз (т.е. приборов), чтобы проверить, идет ли дождь, и поэтому, если бы даже мои приборы зафиксировали дождь, я бы не опроверг это утверждение.

КАНДИДО

Мистер Эверетт мог бы потребовать, чтобы Вы предприняли попытку доказать, что неверным является следующее утверждение: каждый раз, когда производится измерение наблюдаемого в отношении системы, находящейся в состоянии суперпозиции, вся вселенная расщепляется на такое количество копий, абсолютно не контактирующих друг с другом, на сколько позволяет наблюдаемое ρ_{total} , и в каждой копии результатом эксперимента является значение наблюдаемого, соответствующее этой копии.

АКАДЕМУС

Очень хорошо! Каждый раз, когда определяется положение электрона, вселенная должна расщепляться на количество вселенных, равное количеству точек, имеющих в пространстве. Кроме того, все эти вселенные были бы аналогичными, за исключением того, что в каждой из них электрон находился бы в различных точках пространства. Вы действительно полагаете, что существуют ученые, желающие всерьез воспринимать такие утверждения?

АКАДЕМУС

Это же очевидно, что утверждения Рассела и Эверетта провокационны или не более чем шутка, и их нельзя воспринимать серьезно.

КАНДИДО

Тем не менее многие физики с определенной репутацией настолько доверяют идеям Эверетта, что публично обсуждают их в специальных обзорах.

Например, д'Эспанья находит их весьма неэкономичными, Дэвис и Браун критикуют их за большое количество элементов, которые нельзя проверить; Баллентайн критикует их, потому что они не объясняют, когда такое расщепление могло бы произойти, а также за технические проблемы: одно и то же квантовое состояние может быть выражено как суперпозиция в отношении нескольких наблюдаемых, и непонятно, в отношении значений каких наблюдаемых должно произойти такое расщепление...

ЖИРАРДИ

Такие предложения... освобождают от затруднения, обусловленного возникновением суперпозиций существенно различающихся состояний, посредством допущения того, что в определенном смысле все возможности волновой функции становятся реальными. Более широко известное предложение такого рода обычно называется интерпретацией множества миров квантовой механики. Согласно этой идее, каждый раз, когда происходит взаимодействие, ведущее к суперпозициям макроскопически различных ситуаций, вселенная буквально распадается (обычно на бесчисленное количество) своих копий: каждая копия соответствует одному из терминов суперпозиции и появляется с соответствующей вероятностью².

И. БОГДАНОВ

Мы должны уточнить, что большинство физиков отрицает этот тезис, следуя парадоксальному примеру его первых приверженцев, особенно таких, как американский теоретик с довольно широкими взглядами Джон Уилер. На конференции, посвященной Альберту Эйнштейну, кто-то спросил его, что он думает о теории множества миров, и он ответил:

«Я признаю, что должен был отказаться от этой теории, хотя и вопреки своему желанию и невзирая на все то рвение, с которым я поддерживал ее вначале, поскольку боюсь, что метафизические выводы, следующие из нее, могут завести нас слишком далеко.»

КАНДИДО

Этот отказ выглядит как стимул.

АКАДЕМУС

Что Вы имеете в виду?

²GianCarlo Ghirardi, *An Attempt at a Macrorealistic Quantum Worldview*, in *The interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, November 1994.

КАНДИДО

Уилер не говорит, что он оставил эту точку зрения, потому что она смешна и в ней нет никакого смысла. Он сделал это из-за *недостатка смелости*.

Кто-то может интерпретировать утверждение Уилера как призыв быть более смелым и не пугаться метафизических выводов. Простите за nepочтительное сравнение, но эта оценка напоминает мне некоторые рекламы плохих фильмов: формально непредосудительные, но созданные скорее как приглашение к проступку, а вовсе не обескураживающие.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, это просто догадки. Это суждение по намерениям. И даже если б это было именно так, все равно все было бы правильно. Разве Вы не понимаете, что для того, чтобы достигнуть массового уровня, наука должна сделать выбор между технологией и театральностью?

И. БОГДАНОВ

Что касается меня, то я склонен думать, что эта интерпретация квантовой механики ведет к выводам, диаметрально противоположным тем, которые вытекают из копенгагенской интерпретации. Проще говоря, в копенгагенской интерпретации нет ничего реального, в то время как для теоретиков, сторонников множества миров, все реально.

Г. БОГДАНОВ

Из копенгагенской доктрины выводится возможность существования альтернативных миров. За каждым элементом, принадлежащим нашей реальности, стоит бесчисленное количество виртуальных элементов, и каждый из них относится к призрачным мирам, к реальностям, которые могут существовать, но не имеют никакой субстанции до тех пор, пока они не будут материализованы наблюдателем. Квантовое состояние относится к миру, расположенному за человеческим миром, к миру, в котором сосуществует бесконечное количество виртуальных решений потенциальных миров. При наличии такой перспективы можно поэтому признать, что те миры, которые называются *параллельными*, существуют только в квантовой сфере, т. е. в виртуальном состоянии³.

АКАДЕМУС

То, что по сравнению с другими эта *теория* более грубая, следует из того факта, что вероятности, предсказываемые квантовой теорией, не играют в ней никакой роли. Вы, конечно же, помните, что в постулируемой *объективизации* в процессе измерения система *становится действительной*

³Jean Guitton, *Dio e la Scienza*, Bompiani, 1992.

в том состоянии, в котором наблюдаемое суперпозиции принимает хорошо определяемые значения с вероятностью, равной вероятности значения в исходном состоянии суперпозиции. В так называемой *теории* Эверетта количество вселенных зависит только от количества значений наблюдаемого, в то время как вероятности, являющиеся основными ингредиентами теории, совершенно не играют никакой роли. Эверетт мог бы сказать то же самое о результате подкидывания монетки, ...: квантовая теория особой роли не играет.

КАНДИДО

Однако он мог утверждать, что экспериментатор приходит во вселенную, имеющую отношение к данному значению, с вероятностью, равной той, которая предназначена для этого значения квантовой теорией.

АКАДЕМУС

Прошу прощения, но если все вселенные одинаковы, в каждой из них будет *один* экспериментатор. Так в чем же смысл говорить, что *этот* экспериментатор прибывает в ту или иную вселенную с заданной вероятностью?

КАНДИДО

Может быть Эверетт подразумевает, что на самом деле для каждого значения создана не вселенная, а множество вселенных для каждого значения измеренного наблюдаемого, так что количество вселенных, созданных для каждого значения, равно вероятности этого значения.

АКАДЕМУС

А что если некоторые из этих вероятностей заданы иррациональным числом?

КАНДИДО

Эверетт, должно быть, утверждает, что иррациональные числа не существуют, что они придуманы математиками.

АКАДЕМУС

Что Вы понимаете под выражением «они не существуют»? И что Вы думаете о соотношении между стороной квадрата и его диагональю, а также об окружности и ее радиусе?

КАНДИДО

Возможно, он утверждал, что вероятности никогда точно не определяются и что любое иррациональное число может быть произвольно и хорошо аппроксимировано рациональным числом.

АКАДЕМУС

Продолжайте, Кандидо! Вы по-прежнему критикуете концептуальный тезис многих уважаемых людей, первоклассных ученых, таких как Гейзенберг,

Бор, Фейнман, . . . , а затем отстаиваете теорию, которую Вы тоже, я в этом уверен, считаете более иррациональной, чем этот $\sqrt{2}$ (прошу прощения, каламбур для математиков).

КАНДИДО

Мне не нравится эта теория, напротив, я даже вовсе не считаю ее теорией, а скорее провокацией. Однако надо признать, что полезно подчеркнуть тот факт, что провокационные заявления Эверетта и Рассела качественно не отличаются от внешне серьезных заявлений Гейзенберга и Фейнмана.

Все четыре построены на одном принципе: утверждается нечто о внешнем мире (например, то, что в стране X не может идти дождь), а затем добавлено, что это утверждение может быть верным только тогда, когда не сделано ни одной попытки для выявления того, верно это или нет (дождь не может идти, если у нас нет глаз, чтобы видеть, идет ли дождь). Поскольку все эти утверждения базируются на одном и том же, из этого следует, что если Вы хотите быть последовательным, Ваши физики должны выразить доверие всем этим утверждениям. Тот факт, что Гейзенберг и Фейнман — знаменитые физики, а Эверетт таковым не является, не должен на Вас влиять. *Ipse dixit* (Голос Самого) должен иметь дело с социологией, а не с наукой.

Что же до вызовов, подобных этому, нужно признать, по крайней мере, их полезность в том отношении, что они побуждают неспециалистов . . .

ГРЕКО

. . . задуматься . . . об основах квантовой механики, дающей простор для столь большого числа сюрреалистических интерпретаций, основах, которые должны рассматриваться в качестве окончательных оснований⁴.

АКАДЕМУС

Если утверждения физиков на самом деле отличаются от утверждений метафизиков тем, что могут быть проверены экспериментально, то, если все выводы, сделанные до сих пор, верны, мы должны заключить, что при применении экспериментального метода физики пришли к метафизическим выводам.

КАНДИДО

Поппер говорил, что Галилей никогда бы не смог опровергнуть эти утверждения экспериментально, поскольку они выстроены таким образом, что верны только в отсутствие Галилея, пытающегося экспериментально проверить их. Это утверждение не согласуется с критерием Поппера о фальсифицировании, поэтому оно не является научным. Вы хотите построить

⁴Pietro Greco, *Alice nel Paese della Cosmologia Quantistica*, L'Unità, 27-3-1994.

самую современную физическую теорию на утверждении, которое на самом деле является ненаучным?

АКАДЕМУС

Многие философы, занимающиеся современной наукой, не так оптимистичны в отношении четкого разграничения между наукой и ненаукой, метафизикой и физикой. . . при всем должном уважении к сэру Карлу, мы видели, что все попытки провести четкую теоретическую границу между этими областями, к несчастью, провалились, и что фальсифицирование вовсе не является абсолютным критерием.

КАНДИДО

Я не предполагаю решить основную проблему философии науки в этом споре. Я просто хотел понять, каким образом утверждения, которые кажутся противоречащими самой сущности научного метода, смогли проникнуть в современные научные взгляды, которые являются или должны являться строгими и рациональными.

АКАДЕМУС

Аргументы, обсуждаемые в эксперименте с двумя отверстиями, показывают, каким образом можно с помощью строгого и последовательного применения метода Галилея прийти к утверждениям, которые, вероятно, отрицают этот метод. Они демонстрируют, каким образом именно экспериментальные результаты навязали нам такой нелегкий выбор.

КАНДИДО

Я не убежден, что аргументы, которые до сих пор приводились, можно рассматривать как *доказательство необходимости* такого нелегкого выбора.

АКАДЕМУС

Что Вы имеете в виду? Вы говорите, что доказательство неверно?

КАНДИДО

Мы поговорим об этом в другой раз. Сейчас я бы хотел завершить описание ортодоксальной интерпретации.

АКАДЕМУС

Вы, однако, должны согласиться с тем, что программа обоснования метафизического мировоззрения из экспериментальных результатов квантовой теории, безусловно, привлекательна и она привлекла внимание значительного числа современных философов.

ШИМОНИ

Будет правильно, учитывая все эти положительные результаты, говорить о принятии *экспериментальной метафизики* . . .

СТАЙН

... квантовая теория поля является в настоящее время той областью, в которой производятся метафизические исследования⁵ ...

ПОППЕР

Моя мечта в отношении программы — метафизическая: ее нельзя проверить; она неопровержима (а мы должны помнить, что неопровержимость является не достоинством, а недостатком). Она основана скорее на метафизической (а не на научной) идее индетерминизма. Она пытается вытеснить, победить современную метафизическую интерпретацию квантовой теории в терминах частиц, поддерживаемую Бором вопреки Шрёдингеру, а также инструменталистскую интерпретацию Бора (которая отказывается от любой попытки идти дальше дуализма волна-частица и объяснять его). Она пытается обеспечить соответствующую точку зрения на физический мир — физический мир, который теперь символизирует не смирительную рубашку для своих обитателей, клетку, в которой мы заперты, а помещение, которые мы можем сделать более пригодным для существования и нас, и всех остальных⁶ ...

КАНДИДО

Я ничего не имею против метафизики, но не доверяю произвольным построениям, претендующим на то, чтобы их называли научными. Все говорят о реализме. А что на самом деле означает этот странный и неправильно употребляемый термин?

ВАН ФРАССЕН

Что такое на самом деле научный реализм? Упрощенно — это точка зрения, согласно которой картина мира, которую дает нам наука, верна и постулируемые элементы действительно существуют.

Но такое утверждение слишком наивно⁷ ...

АКАДЕМУС

Согласно д'Эспанья⁸, существуют два пути в философии природы, которые он называет *позитивистским* и *реалистичным*. Согласно позитивистской точке зрения: ...

⁵H. Stein Otewer (ed.), *Historical and Philosophical perspectives in Science, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, University of Minnesota Press, 1970, 264–287.

⁶K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 202.

⁷Bas C. van Frassen, *To save the phenomena*, in *Scientific Realism*, J. Leplin (ed.), University of California Press, 1984, p. 250.

⁸B. D'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Acad. Press, 1976, § 21.

Д'ЭСПАНЬЯ

... Наблюдение — это единственная вещь, на базе которой строится наука... позитивистская идея никому и никогда не позволяет вводить ненаблюдаемые элементы в научные выводы, за исключением разве что промежуточных вычислений, которые должны исчезнуть к моменту получения результата...

АКАДЕМУС

Другими словами, целью того, что д'Эспанья называл *позитивистской идеей науки*, являлись бы только связующие наблюдения, отказ от обсуждения природы вещей, сущности физической реальности...

Д'ЭСПАНЬЯ

... Основной постулат определенной позитивистской философии состоит именно в том, что наблюдения, которые нельзя проверить, бессмысленны⁹...

АКАДЕМУС

Для позитивиста вещь *существует, если она представляется правдоподобной для какого-нибудь наблюдателя*, для реалиста — *если она правдоподобна даже в отсутствие наблюдателя*. Другими словами, для реалиста...

Д'ЭСПАНЬЯ

... не имеет смысла говорить о той или иной микроскопической системе, имеются ли там измерительные приборы, допускающие взаимодействие с ней, или их нет. Подобная система может с таким же успехом иметь некоторые физические свойства, независимо от существования или наличия таких приборов¹⁰.

АКАДЕМУС

Вопрос о реализме и множестве оттенков или альтернатив этой точки зрения является достаточно сложным и деликатным. Для четкого и исчерпывающего описания я рекомендую Вам работу А. Файна¹¹ или сборник статей Леплина¹².

КАНДИДО

На мой взгляд, хорошая интерпретация физической теории как теории, основанной на эксперименте, должна удовлетворять следующему минимальному условию, которое я хочу назвать:

⁹В. D'Espagnat, см. примечание 8.

¹⁰В. D'Espagnat, см. примечание 8.

¹¹A. Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, 1986.

¹²*Scientific Realism*, Jarrett Leplin (ed.), University of California Press, 1984.

КРИТЕРИЙ СЛАБОГО РЕАЛИЗМА: *Интерпретация любой физической теории должна быть такой, чтобы нельзя было объяснить ряд экспериментальных результатов, обращаясь к ряду свойств или условий, которые в принципе нельзя проверить экспериментально.*

АКАДЕМУС

Это действительно слабое значение термина *реализм*. Настоящий реалист верит в *объективное и одновременное существование всех свойств физической системы*.

КАНДИДО

Когда Вы говорите обо всех *физических свойствах*, имеете ли Вы в виду *ряд значений всех наблюдаемых системы в момент t* ?

АКАДЕМУС

Да, именно так, как мы говорили об этом в разд. III.4. *Одновременное существование* поэтому означает, что каждое наблюдаемое принимает именно одно из значений в любой момент времени.

КАНДИДО

Я уверен, что это именно так, но, боюсь, это утверждение нельзя доказать. Поэтому я претендую на меньшее: я лишь хочу, чтобы мое мировоззрение не противоречило ему. Те, кто провозглашают себя *реалистами* в строгом смысле этого термина, который является одним из тех, о которых Вы говорите, должны будут согласиться со мной, поскольку их позиция включает мою как особый случай.

АКАДЕМУС

Но даже если б я хотел согласиться с этим Вашим весьма слабым представлением о *реализме*, каково было бы следствие?

КАНДИДО

Основным следствием является следующее: ортодоксальная интерпретация квантовой теории не выполняет это минимальное требование и поэтому не удовлетворяет меня.

АКАДЕМУС

Вы говорите о *требованиях*, как если бы можно было что-то *требовать* от реальности. Это не имеет никакого смысла: возможно, этого уже слишком много для того, чтобы интуитивно чувствовать или описывать реальность, давайте будем лишь *требовать*!

КАНДИДО

Мое требование не касается реальности, но лишь нашего описания реальности. Это можно выразить по-другому: хорошее описание природы для того, чтобы объяснить, чем является наблюдаемое, не может апеллировать к че-

му-то, что, как правило, нельзя наблюдать. Разве мог кто-нибудь в одно и то же время провозглашать себя ученым и отрицать этот методологический принцип?

ГОЛДСМИТ

Как странно, что Реальностью
В магический квадрат
Я пойман навсегда
И нет во мне любви,
Коль нету в нем меня.
Но лишь мое отсутствие
Присутствием сменяется,
Любовь моя Реальностью
Мгновенно возрождается¹³.

III.2. ψ для психологии

КАНДИДО

Может ли чисто психологическое действие вызвать физическое изменение состояния?

АКАДЕМУС

Некоторые именно так и думают. Например, Вигнер различает два типа реальности.

ВИГНЕР

Реальность моего восприятия, ощущений и сознания непосредственна и абсолютна. Реальность всего остального состоит в пользе думать в ее терминах; эта реальность относительна... В этом случае реальность является синонимом пользы концепции как для нашего мышления, так и для общения с другими людьми... За исключением непосредственного восприятия и, более широко, содержания моего сознания, все является построением в том смысле, в котором, например, Маргенау использует этот термин; однако одни построения ближе, другие дальше от прямого восприятия...

Во всяком случае, это единственная точка зрения, которая согласуется с квантовой механикой¹⁴.

¹³ Морис Голдсмит, стихотворение, которым заканчивалось выступление Луиджи Аккарди (неопубликовано), Хьюстон, 29.XI.85.

¹⁴ Eugene Wigner, *Two Kinds of Reality*, *The Monist*, 1961.

БЕЛЛ

Думаю, неправильно говорить людям, что центральная роль сознательного ума интегрирована в современную ядерную физику¹⁵.

Д'ЭСПАНЬЯ

Доктрина о том, что мир состоит из объектов, чье существование не зависит от человеческого сознания, как выясняется, противоречит квантовой механике и экспериментально полученным данным¹⁶.

ВИГНЕР

Физики обнаружили, что невозможно дать удовлетворительное описание атомного феномена без ссылки на сознание¹⁷.

КАНДИДО

Это утверждение весьма странно, и мне хотелось бы знать, к чему оно относится.

ВИГНЕР

Оно относится к процессу, называемому *редукция волнового пакета*. Это происходит тогда, когда результат наблюдения доходит до сознания наблюдателя, или, если быть еще более точным, моего собственного сознания, поскольку я являюсь единственным наблюдателем, а остальные люди являются лишь субъектами моих наблюдений.

КАНДИДО

Мне кажется, что это идет дальше ортодоксальной интерпретации.

ВИГНЕР

Однако измерение не является завершенным до тех пор, пока оно не войдет в наше сознание.

ЛОНДОН И БАУЭР

Он (наблюдатель) имеет замечательную и хорошо известную особенность, которую мы должны были бы назвать *способностью к самоанализу*: он может тотчас же осознать собственное состояние¹⁸.

ВИГНЕР

Они могли добавить, что с точки зрения квантовой механики данную способность совершенно нельзя объяснить.

КАНДИДО

Но, может быть, классическая механика отлично объясняет ее... Именно

¹⁵Phys. Rep. 137 (1986), 7-9.

¹⁶V. D'Espagnat, Scientific American 241 (1979), 128-140.

¹⁷Eugene Wigner, см. предыдущее примечание.

¹⁸F. London, E. Bauer, *La theorie de l'observation en Mechanique Quantique*, Paris, Hermann, 1939, p. 40.

к таким утверждениям я обращаюсь, когда критикую страстное желание, охватившее, как мне кажется, некоторых физиков, окутать квантовую теорию мистической аурой.

АКАДЕМУС

Эти игры посвященных людей также могут досаждают Вам, но Вы должны согласиться, что они имеют внутреннюю логику: в классической физике нет ничего, что соответствовало бы коллапсу волнового пакета. В этом смысле Вигнер прав, говоря о специфике квантовой механики.

КАНДИДО

Но тогда верно, что если кто-то допускает...

ВИГНЕР

...Эпистемологию, к которой толкают человека, если он продолжает теорию наблюдения квантовой механики до ее конечных выводов...

КАНДИДО

...Тогда...

ВИГНЕР

...Концепция действительности, к которой нужно прийти, демонстрирует значительное сходство с концепцией идеализма...

КАНДИДО

В случае с кошкой Шрёдингера это означает, что если *кошка наблюдает себя*, то она становится *наблюдаемым объектом* и поэтому, согласно ортодоксальной интерпретации, не может находиться в состоянии суперпозиции, а должна находиться в состоянии, которое можно хорошо определить.

АКАДЕМУС

Не все соглашаются с Вигнером в том, что редукция волнового пакета происходит тогда, *когда результат наблюдения входит в сознание наблюдателя*.

КАНДИДО

Возможно, сознание должно играть роль в различии между *взаимодействием* и *измерением*. Например, если я бросаю камень в колодец, я, безусловно, создаю взаимодействие между водой и камнем. Однако если я буду определять время, необходимое для того, чтобы услышать всплеск, то я смогу вычислить глубину колодца. И поэтому я произвожу измерение. Различие между этими двумя ситуациями состоит в моем *внимании*, которое заключается в процессе самосознания.

АКАДЕМУС

Согласно ортодоксальной интерпретации процесс *наблюдения* должен соответствовать реальному физическому взаимодействию, и действительно

неверно сравнивать процесс самосознания с физическим взаимодействием. *Коллапс* является следствием взаимодействия, и он всегда одинаков, независимо от того, знаете ли о нем Вы или кто-то другой.

КАНДИДО

Инстинкт подсказывает мне, что я согласен с Вами: процесс наблюдения кошкой самой себя, т. е. осознания самой себя, не должен изменить ее состояния: жизни или смерти.

Как бы то ни было, размышляя над этим вопросом больше, я могу предвидеть некоторые проблемы.

АКАДЕМУС

Не могу представить, какие могут быть проблемы: я думаю, что любой восприимчивый человек должен согласиться с тем, что сознание касается только отдельных индивидуумов, и только идеалист, придерживающийся крайних взглядов, может полагать, что процесс осознания способен изменить реальное физическое состояние.

КАНДИДО

Сознание, подразумевающее ряд физико-химических процессов, является частным случаем *самовзаимодействия*, т. е. взаимодействия физической системы с самой собой.

Каждая физическая система взаимодействует сама с собой. Например, электрон создает с помощью своего электрического заряда электромагнитное поле, которое, в свою очередь, взаимодействует с самим электроном. Если Вы рассматриваете самовзаимодействия среди возможных форм взаимодействия, а я не вижу причин, почему бы Вам не сделать это, то Вы должны прийти к выводу, что электрон никогда не находится в состоянии суперпозиции, поскольку он всегда взаимодействует сам с собой.

АКАДЕМУС

Мы не должны включать самовзаимодействия в условия, вызывающие коллапс. Я не думаю, что это приведет к противоречию.

КАНДИДО

Может быть, и не приведет, но тогда, логики ради, Вы должны заключить, что вселенная никогда не может находиться в состоянии, которое возможно точно определить, поскольку она способна взаимодействовать только сама с собой, не говоря уже о том, что там больше ничего нет по определению. Тогда возникла бы проблема, как примирить тот факт, что целое, т. е. вселенная, существует только *потенциально*, в то время как ее части, среди которых и Вы, существуют реально, т. е. действуют.

АКАДЕМУС

Вообще говоря, ортодоксальная интерпретация различает макроскопические и микроскопические системы. Для последних взаимодействие действительно может привести к *коллапсу*.

КАНДИДО

Но тогда, если ортодоксальная интерпретация верна, квантовая теория должна быть неверной, поскольку она предсказывает, что до тех пор, пока система *радиоактивное вещество – кошка – яд* остается изолированной, кошка находится в состоянии физической суперпозиции, в то время как, по крайней мере, тогда, когда она жива, кошка может ощущать себя в состоянии, которое может быть точно определено, без взаимодействия с системой.

АКАДЕМУС

Некоторые возражают против данного аргумента, замечая, что квантовая теория предсказывает значения наблюдаемых, в то время как *состояние жизни или смерти* нельзя сравнивать со значениями квантового наблюдаемого.

КАНДИДО

Вы ведь не собираетесь рассказывать мне, что *быть живым или мертвым* не является физическим состоянием кошки? Если Вы с этим согласны и хотите, чтобы квантовая теория рассматривалась как основная теория, т. е. подходящая, по крайней мере, теоретически, к любому порядку величин, то Вы не можете отрицать возможность существования суперпозиций между этими двумя состояниями.

АКАДЕМУС

Вы опять-таки слишком драматизируете: квантовая теория на самом деле предсказывает, что кошка находится в состоянии суперпозиции, но может оказаться также, что *во всех наблюдаемых отношениях* эта суперпозиция на самом деле ведет себя как смешанное состояние.

КАНДИДО

Я не понимаю, что Вы имеете в виду под этим определением: *во всех наблюдаемых отношениях*.

АКАДЕМУС

Наблюдаемое различие между состояниями суперпозиции и смешанными состояниями состоит из так называемых *интерференционных членов*. Если эти члены настолько малы, что ими можно пренебречь, я могу сказать, что *во всех наблюдаемых отношениях эта суперпозиция на самом деле ведет себя как смешанное состояние*.

КАНДИДО

Предположим, что эту программу можно осуществить, тогда она решит практическую проблему, но не теоретическую. Разница, как бы мала она ни была, все же существует, и противоречие между кошкой, которая чувствует себя живой, и теорией, которая предсказывает суперпозицию состояний жизни и смерти, сохраняется.

Ваш ответ равносителен высказыванию *противоречие существует, но им можно пренебречь*.

Эта Ваша позиция кажется мне аналогичной той, с которой мы столкнулись при обсуждении экспериментов типа ЭПР: действительно, релятивистская теория противоречива, но это неважно, поскольку *такое противоречие не имеет практических последствий*. Ваше желание понять — очень слабое, если Вы называете толкование этой игры слов *словесным самоуспокоением!*

АКАДЕМУС

Если никто не хочет платить такую цену, то единственным путем примирения ортодоксальной интерпретации, согласно которой суперпозиции являются реальными физическими состояниями, с предсказаниями квантовой теории — это утверждать, что коллапс физического состояния кошки, от суперпозиции до хорошо определяемого состояния, возникает тогда, когда кошка наблюдает сама себя.

КАНДИДО

Это означало бы, что Вигнер прав и что физиологическое действие может вызвать изменение физического состояния.

Начиная с таких соображений, можно выстроить весь спектр парадоксов, например: если физиологический процесс может вызвать изменение физического свойства системы, что происходит, когда в этом принимают участие несколько индивидуумов?

Кто вызовет изменение с помощью своего физиологического процесса?

АКАДЕМУС

Вы не открываете ничего нового. Такого рода парадоксы уже построены и называются парадоксами типа *друга Вигнера*: чье сознание вызывает коллапс — мое или моего друга?

Эти примеры базируются на том обстоятельстве, что объекты, имеющие самосознание, являются в одно и то же время субъектом и объектом наблюдений, т. е. наблюдаемой системой и измерительным прибором.

КАНДИДО

Но такой образ мышления может породить странные гибриды.

БЕЛИНФАНТЕ

Таким образом, мы видим, что квантовая теория требует существования Бога¹⁹.

АКАДЕМУС

Белинфанте также пытался примирить свою идею о том, что принцип неопределенности подразумевает неприложимость принципа достаточного обоснования с...

БЕЛИНФАНТЕ

... с верой в Бога, который постоянно принимает решения относительно событий, происходящих в мире, решения, которые непредсказуемы для нас...

АКАДЕМУС

Белинфанте не единственный, кто заново открывает смесь науки с религией. Это старые попытки использовать одно для того, чтобы поддержать или противопоставить другое. Человечеству потребовались века для того, чтобы избавиться от этого.

И. БОГДАНОВ

На этой стадии необходимо остановиться подробнее. Перед тем, как стать наблюдаемой, частица существует в виде *волнового пакета*. Другими словами, все происходит таким образом, как если бы существовало неограниченное количество элементов, каждый из которых имел бы траекторию, местоположение, скорость, коротко говоря, имел бы черты, которые отличались бы от черт какого-либо другого элемента. Итак, в момент наблюдения волновая функция разрушается, и только одна из этих бесчисленных частиц материализуется, одновременно уничтожая все *параллельные частицы*. Когда в длинной цепи явлений, образующих историю нашего мира, происходит материализация события, неограниченное количество виртуальных явлений исчезает, сметая на своем пути мириады призрачных миров. Остается только наша реальность, единственная и неповторимая.

ДЖ. ГВИТТОН

Все это ставит вопрос: что вызывает коллапс волновой функции, которая характеризует явление? Только наблюдение. Именно в этом смысле, по аналогии, мы можем не раздумывая рассматривать нашу вселенную как результат коллапса чего-то вроде *всемирной волновой функции*, вызванного вмешательством внешнего наблюдателя. Предположим тогда, что наша вселенная окружена ореолом альтернативных реальностей, которые зиждутся на бесконечном количестве переплетающихся волновых функций. Сказав

¹⁹F. J. Belinfante, *Measurement and time reversal in the objective quantum theory*, Pergamon press, 1975, p. 99.

это, я могу выдвинуть гипотезу о том, что эта сложная сеть взаимодействующих волновых функций, будучи наблюдаемой, распадается на один мир. Но тогда встает вопрос: кто в таком случае наблюдает вселенную?

Вот мой ответ: параллельные миры, альтернативные реальности не существуют. Имеются виртуальные реальности, возможные соединения, которые исчезают для того, чтобы создать пространство для нашей единственной реальности, как только вмешивается этот великий наблюдатель, который извне определяет космическую эволюцию в каждое мгновение. Тогда легко понять, почему такой наблюдатель, единственный и трансцендентальный в одно и то же время, абсолютно необходим для существования и благоустройства нашей вселенной. И, наконец, легко понять, как, на мой взгляд, зовут такого космического наблюдателя²⁰.

КАНДИДО

Физика, основывающая свою интерпретацию на метафизике, религия, обращающаяся за помощью к науке; наука, претендующая на доказательство существования Бога, . . .

На мой взгляд, первый пункт неприемлем, второй — неверен: наука и религия являются глубинной потребностью человеческого сознания; иногда у них имеются точки соприкосновения, но их следует искать в умах отдельных индивидуумов, попытка же воплощать их не имеет смысла. Иначе есть риск, что все закончится поэтическими метафорами, которые, не помогая религии, могут быть источниками путаницы в науке.

ГРЕКО

Наблюдатель поэтому имеет огромную власть над реальностью. Даже в отношении жизни и смерти.

. . . Такая большая власть, сконцентрированная в глазах наблюдателя, действительно смущает. Возможно, именно по этой причине копенгагенская интерпретация, несмотря на ее большой успех и невзирая на то, что она является основной интерпретацией квантовой механики, всегда, на протяжении более 60 лет, широко подвергалась сомнению²¹.

КАНДИДО

Если мы принимаем ортодоксальную интерпретацию, мы подвергаемся искушению удивляться вместе с Дж. С. Беллом:

БЕЛЛ

Ждала ли волновая функция мира в течение тысячи миллионов лет скачка, пока не появилось одноклеточное живое существо? Или она должна была

²⁰Jean Guilton, *Dio e la Scienza*, Bompiani, 1992.

²¹Pietro Greco, *I «guardoni» del tempo*, L'Unità, 29-10-1992.

ждать несколько дольше более качественную систему ... с докторской степенью²²?

III.3. Наука и здравый смысл

ОППЕНГЕЙМЕР

... На вопрос, остается ли положение электрона всегда одним и тем же, мы должны ответить *нет*, на вопрос, меняется ли положение электрона со временем, мы должны ответить *нет*. На вопрос, является ли он неподвижным, мы должны ответить *нет*, на вопрос, находится ли он в движении, мы должны ответить *нет*²³ ...

КАНДИДО

Мой Бог!

ФЕЙНМАН

Для того, чтобы понять, что происходит на атомном уровне, необходимо отказаться от обычного здравого смысла²⁴.

ШИМОНИ

Именно из этих двух основных идей — принципа неопределенности и принципа суперпозиции — должно быть ясно, что квантовая теория действительно противостоит здравому смыслу ... Классическая физика не противостояла здравому смыслу по этим основным направлениям²⁵ ...

КАНДИДО

Кто-то будет удовлетворен этими утверждениями. Как будто он говорит: *смотрите, как далеко мы зашли в понимании мира! Настолько далеко, что можем полностью пересмотреть понятие здравый смысл.*

Теоретики квантовой физики отвечают на поставленные проблемы, перекликаясь с теорией относительности, которая перевернула обычные представления о *синхронности, пространстве, силе, материи*, ...

КАНДИДО

Переворот в здравом смысле, вызванный квантовой теорией, кажется более *надуманным, слишком желанным* ... Если такой переворот снизойдет до *нереализма, нелокальности и сцепленности*, ..., то я не думаю, что он продержится долго. Полагаю, что концептуальные перевороты действительно

²²J. S. Bell, *Against measurement*.

²³Robert Oppenheimer, цитата из Fritjof Capra, *Il Tao della Fisica*, Adelphi, 1989, p. 176.

²⁴Richard P. Feynman, *QED — La strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, 1989, p. 24–25.

²⁵Shimony, *Scientific American*, January 1988.

имели место (мы не рассматриваем здесь перевороты в технике), но они не касаются этих вещей, а касаются, скорее, *вероятностных законов*.

ФЕЙНМАН

С точки зрения здравого смысла, квантовая электродинамика описывает абсурдную природу. Поэтому я надеюсь, что Вы будете воспринимать природу такой, какой она есть: абсурдной²⁶.

КАНДИДО

Парадоксы, противоречия с теорией относительности; наблюдаемые, имеющие только виртуальные значения; объекты, которые не существуют в отсутствие наблюдателя и которые в процессе измерения точас же начинают существовать; люди, пытающиеся избежать всего этого, утешая себя достижениями данной теории в прикладных областях, ...

Разве можно говорить, что все понятно при таких условиях? Разве можно считать себя удовлетворенным этим?

АКАДЕМУС

Такие заявления, кажется, довольно далеки от здравого смысла. Но разве мы не были приучены наукой не доверять здравому смыслу, который неоднократно доказывал свою дезориентирующую направленность?

КАНДИДО

Это, конечно, верно, но разве не может быть такого, что, с одной стороны, ученые нажили большой капитал на неудачах здравого смысла, а, с другой стороны, отчаяние заставляло их быть готовыми жертвовать даже тогда, когда в этом не было необходимости?

Разве не может быть, что эти утверждения являются результатом неправильного анализа, сделанного учеными, а не результатом объективного провала здравого смысла?

Или же, разве не может быть, что здравый смысл действительно потерпел неудачу, но не на тех направлениях, на которые указывают приведенные выше примеры, а, скорее, на других, находящихся слишком глубоко, чтобы поймать в ловушку самих ученых, которые уже подготовлены для принесения в жертву иных общепринятых идей, таких как, например, реализм?

АКАДЕМУС

Для того, чтобы действительно хорошо понять корни дискуссии и полемику в отношении интерпретации квантовой теории, Вы должны убедиться, прежде всего, в двух следующих фактах:

²⁶QED, p. 24-25.

- 1) в том, что утверждения, приведенные в предыдущей дискуссии, точно излагают идеи авторитетного большинства физиков;
- 2) в том, что такие заявления не являются результатом произвольных спекуляций, а возникли как необходимое следствие рационального и последовательного метода Галилея, заключающегося в выводе логических заключений на основании сравнительного анализа теории и экспериментальных данных. Действительно, не случайно лучшие современные ученые, подобно тем, о которых мы уже упоминали, имели смелость и интеллектуальную честность довести этот метод до экстремальных выводов, в то время как другие искали убежище в непонятном многословии, которое не преодолевает трудности, а лишь прячет их в словесной пучине.

КАНДИДО

Не вижу, как можно сомневаться в первом положении, после того как столь много авторитетных людей были согласны с ним. Что касается второго положения, то остается следующий вопрос: *каким образом рациональное и последовательное применение метода Галилея приводит к такому утверждению, как: ненаблюдаемые объекты не существуют?*

АКАДЕМУС

Единственным способом ответить на этот вопрос является тот, которым мы пользовались до сих пор: а именно, проанализировать причины, которые заставили физиков делать заявления, приведенные выше.

КАНДИДО

Самое лучшее, что можно сделать, так это начать с выявления тех или иных положений, из которых возникает проблема, в том смысле, что приняв их, больше уже нельзя будет избежать этих парадоксальных выводов.

Вторая часть этих заявлений будет отделять то, что действительно является неизбежным следствием экспериментов, от того, что может скрывать предрассудки.

АКАДЕМУС

Дело в том, что любой научный разговор основывается на некоторых допущениях, которые могут быть либо ясно высказаны, либо подразумеваться. Подразумеваемые допущения называются *предубеждениями*. Предубеждение, которое было высказано, перестает быть таковым и становится *аксиомой*.

Ряд аксиом определяет то, что обычно называется *математической моделью*, и предмет науки достигает своей зрелости, когда он преуспевает в

кодировке своего эмпирического знания и концептуальных структур в одну или несколько математических моделей.

КАНДИДО

Это было известно намного раньше, чем появилась квантовая механика. Еще во времена Галилея было очевидно, что ключевыми моментами, стимулирующими развитие научного мышления, являются:

- i) идентификация разумных предпосылок, основывающихся на рассуждениях или экспериментах;
- ii) развитие логических выводов из таких допущений;
- iii) сравнение их с экспериментальными данными;
- iv) критический пересмотр предпосылок в случае возникновения противоречий (логических или экспериментальных).

АКАДЕМУС

Совершенно верно: иногда случается, что возникают неожиданные противоречия, которые означают, что некоторые из наших допущений находятся в противоречии с экспериментальными данными или другими допущениями. Тогда задачей ученых становится их идентификация и замена другими, более подходящими для объяснения экспериментальной реальности.

Именно такого рода анализ привел некоторых физиков к заключению, что необходимо отказаться от допущения существования объективно существующей внешней реальности, имеющей свойства, независимые от наблюдателя. Эксперимент с двумя отверстиями, который мы тщательно проанализировали, это нечто гораздо большее, нежели просто эксперимент: это модель экспериментов, в соответствии с которой было проведено много реальных опытов, соответствующих многим вариантам осуществленного эксперимента на основной модели, которую мы проанализировали.

КАНДИДО

Но были ли эксперименты типа эксперимента с *двумя отверстиями* единственными, которые заставили физиков отказаться от идеи о том, что физические свойства микрообъектов действительно объективны, независимы от наблюдателя?

АКАДЕМУС

Вовсе нет. В течение последних двадцати лет был осуществлен весь спектр экспериментов, в основе которых лежал совершенно иной принцип, происходящий от так называемого *парадокса Эйнштейна – Подольского – Розена*.

Некоторые физики верят, что концептуальные трудности в отношении идеи реальности, на которые указывал эксперимент с двумя отверстиями, ничто по сравнению с теми, которые возникают при постановке новых экспериментов.

КАНДИДО

Вы совершенно уверены, что эти новые эксперименты *радикально отличаются* от эксперимента с двумя отверстиями?

АКАДЕМУС

Конечно. Эксперимент с двумя отверстиями подчеркивает противопоставление *волна – частица*, противопоставление, к которому мы, физики, привыкли, называя его *дополнительностью*. Напротив, новые эксперименты показывают, что если предсказания квантовой теории верны, имеется неустранимое противоречие между гипотезой о том, что свойства систем не зависят от наблюдателя (физическая реальность), и принципом *локальности* Эйнштейна. Это противоречие наиболее шокирующее для нас. Первым, кто придумал эксперимент, чтобы обратить на это внимание, был Джон Белл.

КАНДИДО

Я бы хотел более пристально рассмотреть это противопоставление. Недавно я слышал аргументы, на мой взгляд вполне приемлемые, которые отрицают, что в аргументации Белла есть что-то новое по сравнению с тем, что мы видим в эксперименте с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Мы это сделаем в правильном направлении. Прежде чем анализировать связь между *реальностью* и *локальностью*, мы лучше ясно и определенно сформулируем первую задачу.

КАНДИДО

Действительно, после такого обмена идеями я начинаю понимать, что физики имеют в виду, когда утверждают, что *ненаблюдаемые объекты как таковые не существуют*.

АКАДЕМУС

Этот способ задавать вопросы кажется мне излишним и тенденциозным. Однако давайте посмотрим, сможете ли Вы объяснить мне, что Вы поняли.

КАНДИДО

Я начну объяснение с простого примера: давайте представим, что мы взяли маленькую стеклянную бусинку и кусочек мрамора, чтобы растереть их в порошок и рассеять его по большой квартире. Предположим также, что мы будем собирать этот порошок через некоторое время и используем его для восстановления кусочка мрамора или — еще лучше — для изготовления

нового кусочка мрамора, похожего на старый. Здравый смысл используется для различения мраморного и стеклянного порошка, для того, чтобы считать их двумя различными физическими системами; если даже вещество, из которого сделаны обе системы, одно и то же, в случае с мрамором это вещество находится в маленьком и хорошо определяемом месте, тогда как стеклянная пудра разбросана по всей квартире и поэтому не локализована как следует; мрамор имеет определенную форму, которая может немного изменяться, если мы хотим сохранить название *мрамор*, в то время как мы не приписываем какого-то внешнего вида, формы *пудре*.

Локализация мрамора (вещество, из которого он сделан, сконцентрировано на очень маленьком пространстве), его форма ... являются экспериментально выявляемыми физическими свойствами: если мы удостоверимся, что таких свойств там нет, мы имеем право сказать, что мрамор как таковой не существует. Другая важная черта таких свойств состоит в том, что они абсолютно не зависят от наблюдателя: если я выхожу из комнаты, в которой находится мрамор или прекращаю наблюдать за ним, а остающиеся физические условия мало меняются, форма мрамора не изменится. Никто не ожидает, что это воображаемый волшебный мрамор, который, как только за ним прекращают наблюдать, разбрасывается повсюду (т. е. теряет свое местоположение в пространстве) для того, чтобы немедленно восстановиться при первом тайном взгляде. Для того, чтобы различить состояние мрамора, как это следовало бы ожидать, исходя из соображений здравого смысла, от магического мрамора, Эйнштейн, Подольский и Розен говорят, что в первом случае форма, масса, местоположение в пространстве, ... являются частью *физической реальности* мрамора, тогда как во втором случае они не являются частью физической реальности мрамора, а зависят от сложных отношений мрамор — наблюдатель, где термин *наблюдатель* означает также и какой-либо прибор, а не только человеческое существо.

Если у нас есть два куска мрамора, один красный, другой — голубой, и мы закрываем их в коробке, то мы ожидаем, что они сохраняют свой цвет. Даже в том случае, если коробка закрыта, или в более общем случае, когда никто не наблюдает мрамор, мы были бы удивлены, если бы кто-нибудь сказал нам, что когда коробка закрыта, каждый кусочек мрамора фактически имеет свойства как красного, так и голубого мрамора, и что когда коробка открывается, все голубое концентрируется в одном куске, а все красное — в другом куске.

Цвет бусины является наблюдаемой величиной, чьи возможные значения, в данном случае красный и голубой, являются физическими свой-

ствами кусочков мрамора. Говорить, что такие свойства существуют только виртуально, когда коробка закрыта, все равно что сказать, что окрашенные кусочки мрамора не существуют как таковые, когда никто их не наблюдает.

АКАДЕМУС

Этот пример аналогичен другому, о котором я читал, где говорилось о рыбе, растворимой в воде²⁷... Но то, что Вы говорите, вполне приемлемо постольку, поскольку речь идет о макроскопических объектах: в микроскопическом мире мы должны быть гораздо более осторожными.

КАНДИДО

Но если вместо кусочков мрамора рассматриваются атомные или субатомные частицы, все еще имеет смысл говорить о локализации (т. е. о том факте, что вещество, из которого они состоят, сконцентрировано в очень маленьком пространстве). В этом случае локализация также является физическим свойством, которое может быть экспериментально выявлено, и поэтому это похоже на ситуацию с мрамором, когда потеря физического свойства — локализации — заставляет нас утверждать, что он *больше не существует* как мрамор. То же самое можно сказать и о частицах. Существуют наблюдаемые величины для атомных и субатомных частиц, подобно цвету кусочков мрамора. Говорить, что эти количества не определены до измерения, или что они фактически принимают все свои значения, не принимая ни одного из них, все равно что сказать, что частицы не существуют как таковые, когда никто их не наблюдает.

АКАДЕМУС

Но ведь частицы не теряют *все* свои свойства, когда никто за ними не наблюдает.

КАНДИДО

Никто не приписывает это положение квантовой теории. Смысл высказывания *объекты не существуют, когда никто их не наблюдает* нужно интерпретировать так, будто они теряют *некоторые* из своих основных свойств, когда никто их не наблюдает.

В общем, я говорю, что *физическая система не существует как таковая*, если она теряет *некоторые* особенные свойства, которые обычно характеризуют ее (например: локализацию в случае с мрамором).

В аргументации Эйнштейна, Подольского и Розена это положение можно выразить словами о том, что некоторые свойства физических систем не являются частью физической реальности, а скорее создаются взаимодействием между объектами, особенно между объектами и наблюдателем.

²⁷Sven Hortoli, Jean-Pierre Pharabod, *Il cantico dei quanti*, Theoria, 1993.

АКАДЕМУС

Термины, которые Вы используете, достаточно туманны. Не могли бы Вы быть немного более точным?

КАНДИДО

Я постараюсь быть немного более формальным, но не знаю, добавит ли это точности.

Пусть S — физическая система, B — наблюдаемая физическая величина, которую можно измерить в системе S , и t — любой момент времени.

Давайте рассмотрим утверждение:

(I) *В момент t наблюдаемое B принимает одно и только одно из своих значений.*

Утверждение (I) экспериментально верно в том смысле, что когда производится измерение B в системе S , можно видеть, что утверждение (I) подтверждается.

АКАДЕМУС

Пока все ясно.

КАНДИДО

Этот факт заставил некоторых физиков, включая Эйнштейна, поверить, что утверждение (I) эквивалентно утверждению:

(II) *В момент t наблюдаемое B принимает одно и только одно из своих значений, независимо от того, измеряется такое наблюдаемое или нет.*

АКАДЕМУС

Эта старая идея физиков, которая приписывает объективную реальность явлению независимо от наблюдения. Согласно ортодоксальной интерпретации квантовой физики, правильное утверждение делится на две части:

(IIIa) *В любой момент t наблюдаемое B принимает одно и только одно из своих значений, если измерение B на самом деле осуществляется в системе в этот момент.*

(IIIb) *Если в момент t система S находится в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого B , тогда, если мы допускаем, что утверждение (I) верно, когда систему не наблюдают, мы приходим к заключениям, противоречащим некоторым экспериментальным данным.*

КАНДИДО

Говоря неформальным языком, утверждения (IIIa) и (IIIb) можно выразить соответственно как:

(IVa) *Наблюдаемое, которое наблюдают, всегда принимает одно и только одно из своих значений, независимо от того, в каком состоянии находилась система до начала измерения.*

(IVb) *Существуют такие состояния системы S, называемые состояниями суперпозиции, что, если система находится в одном из этих состояний, наблюдаемое, которое не наблюдают, не может принимать одно и только одно из своих значений, а фактически принимает их все одновременно.*

АКАДЕМУС

Утверждением, действительно характерным для ортодоксальной интерпретации квантовой теории по сравнению с любой классической теорией, является утверждение (IIIb) или его неформальный вариант (IVb).

Согласно классической физике результаты экспериментов отражают объективную реальность. Согласно квантовой физике, эксперименты создают объективную реальность.

Это то, что называется *вопросом реальности в квантовой механике*.

КАНДИДО

Согласно критерию слабого реализма, сформулированному в конце разд. III.1, мы должны называть *нереалистической* любую философскую точку зрения, принимающую утверждение, которое Вы только что сформулировали.

АКАДЕМУС

Таким образом Вы утверждаете с помощью определения, что современная интерпретация квантовой теории *нереалистична*.

КАНДИДО

Возможно. Но кто попытается называть *реалистичной* интерпретацию, в которой утверждается, что эксперименты *создают* реальность?

АКАДЕМУС

Почему Вы так много внимания уделяете этому *реализму*?

КАНДИДО

Отказ от реализма — это первый шаг к отказу от рационализма. За тем идет обскурантизм, авторитарные тенденции, . . . , история доказывает это.

АКАДЕМУС

Как история может что-либо доказывать?

ПОППЕР

Реализм связан с рационализмом реальностью человеческого мышления, человеческим творчеством и человеческим страданием²⁸.

²⁸К. Popper, *Poscritto alla Logica Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, pp. 15–16.

ГРЕКО

Отказ от какого-либо принципа реальности открывает путь иррационализму²⁹.

АКАДЕМУС

Помните, что на реализм можно ссылаться, используя также и антинаучную терминологию.

ПОССЕНТИ

В отличие от научных теорий, которые не являются окончательными, а подвергаются осмыслению и опровержению, в реалистичной философии можно получить навечно, в соответствии с идеей о том, что существует необходимое знание о бытии, неизменяемую и неоспоримую теорию.

МАССАРЕНТИ

Распространению скептицизма, согласно Поссенти, мы должны противопоставить стремление «иметь смелость познать Бытие». Но в действительности признание невозможности такого знания и даже абсурдности такого выражения является одним из тех моментов, которые сохранились без изменения в философии этого века. В настоящее время наиболее рафинированные философы, которые (подобно Поссенти) обвиняют нашу эпоху в экстремальном скептицизме и субъективизме, должны рассматривать ссылку на «высшее» знание просто как риторический прием, который вовсе не решает проблему³⁰.

III.4. Квантовое состояние

КАНДИДО

Что описывает вектор состояния?

АКАДЕМУС

Первоначально Шрёдингер склонялся к интерпретации квантового состояния электрона или другой заряженной частицы как математического объекта, который позволяет определять плотность заряда.

КАНДИДО

Но я могу определить также квантовое состояние незаряженной частицы. Какую *плотность* я должен рассматривать в таком случае?

АКАДЕМУС

Белл говорит о *плотности вещества*, из которого состоит система.

²⁹Pietro Greco, La Repubblica, 30-3-1993.

³⁰Vittorio Possenti, Armando Massarenti, *Quante Facce ha il realismo?*, Il Sole 24 Ore, 1996.

КАНДИДО

Эта интерпретация подразумевает, что системы являются объектами, *рассеянными* как волны, а *вещество*, из которого они состоят, распределено в пространстве с различной плотностью.

АКАДЕМУС

Идея представлять частицы как *очень концентрированные волны* до известной степени была отправной точкой рассуждений Шрёдингера. Вот почему он имел обыкновение говорить о *волновой механике* вместо *квантовой механики*: о *механике* поскольку объекты имеют индивидуальность как частицы; *волновой*, потому что идеализация классической физикой частицы как *материальной точки* заменена идеализацией частицы как *волны*.

КАНДИДО

Эйнштейн также придерживался этой точки зрения в течение всей своей жизни. Думаю, что эта идея еще не исчерпала весь свой созидательный потенциал.

АКАДЕМУС

Эта интерпретация квантового состояния как *плотности реального вещества*, как, например, масса, заряд, ... несостоятельна, поскольку волны, которые определяют квантовые состояния, не распространяются в обычном трехмерном пространстве, или в пространстве – времени, а распространяются в абстрактном многомерном пространстве. Поскольку не понятно, какой физической реальности соответствовала бы волна в этом абстрактном пространстве, многие физики предпочитают говорить о *вероятностных волнах*.

КАНДИДО

Поэтому данную ситуацию, на мой взгляд, интуитивно можно представить следующим образом:

- 1) частицы являются идеализацией, а настоящая реальность представлена *локализованными волнами*;
- 2) волна и частица объективно и одновременно существуют, и волна в известном смысле *ведет* частицу (теория де Бройля о *волне-пилоте*);
- 3) волновые и корпускулярные аспекты *комплиментарны*; это означает, что они имеют только виртуальную реальность, которая становится действительной в результате экспериментов. Сущность комплиментарности состоит в том, что нельзя придумать такой эксперимент, который бы *одновременно* подчеркивал два аспекта: волновой и корпускулярный (*копенгагенская интерпретация*).

- 4) *вероятностные волны*, скорее всего, являются словесным приемом для сохранения открытыми всех возможных интерпретаций.

ЛОШАК

Настоящее отличие состоит в том, что де Бройль (а также, *без сомнения*, Лоренц и, *возможно*, Эйнштейн) верил в постоянное нахождение частицы в волне. Если говорить более точно, то де Бройлю частица представлялась в виде *уплотнения* внутри волны. Он знал, что такой постоянный признак может возникать только лишь в некоторых нелинейных уравнениях, и в качестве примера он часто упоминал *единичные волны*. Действительно, его волна с *уплотнением* была решением вопроса³¹.

КАНДИДО

Думаю, лучшее интуитивное представление о том, как можно было бы представить себе *волновую механику*, возникло у меня однажды при просмотре фильма о *взаимодействии двух солитонов*. В фильме можно было увидеть график перемещения двух очень концентрированных волн по направлению друг к другу. Перед возникновением *контакта* обе волны можно было четко локализовать и они находились отдельно друг от друга; затем последовал момент, в который обе волны смешались в единый неотчетливый клубок, когда невозможно было отличить индивидуальные черты каждой. В конце концов они обе вышли из этого *клубка*, приобретя вновь свою исходную форму, четко различимую, и проследовали в направлении, противоположном тому, в котором они пришли.

Это подсказало мне, о чем могли думать такие ученые, как де Бройль, Шрёдингер и Эйнштейн, . . . , когда они настаивали на том, что материю следует представлять в виде *очень концентрированной волны, очертание которой сохраняется постоянным с течением времени* даже после того, как она претерпевает взаимодействие, наподобие того, которое было только что описано, но не обязательно *во время* взаимодействия. Это основные черты того, что в настоящее время называется *солитоном*.

АКАДЕМУС

Действительно, эта возможность одновременно очаровывает и озадачивает меня. Как бы то ни было, до сих пор невозможно было хоть сколько-нибудь продвинуться вперед от множества ностальгических примеров, наподобие того, который Вы только что описали, и создать *настоящую теорию* взаимодействия солитонов, имеющую силу не только в идеальных (одномерных)

³¹ Georges Lochak, *La géométrie trisation de la Physique*, Nouvelle Bibliothèque que Scientifique, Flammarion, 1994.

случаях или единичных примерах, но достигающую обобщающего уровня, требуемого от фундаментальной теории.

КАНДИДО

Однако большинство физиков фактически не приняло интерпретации Шрёдингера.

АКАДЕМУС

От этой интерпретации отошли, потому что при рассмотрении систем, состоящих из нескольких частиц, такую *плотность* нужно интерпретировать в *конфигурациях многомерного пространства* в отсутствие непосредственной физической интерпретации. Например для описанных Шрёдингером двух взаимодействующих частиц требуется шестимерное пространство. Обсуждение *массы или заряда и плотности* в таком пространстве выходит за рамки физики.

КАНДИДО

Но тогда, когда физики говорят, что *в состоянии суперпозиции, в котором находится наблюдаемое, частица не имеет реального местоположения, а лишь виртуальное, рассеянное в пространстве*, они ссылаются не только на положение в физическом пространстве, но и на его конфигурацию в этом абстрактном пространстве.

АКАДЕМУС

Конечно. Кроме того, современная физика рассматривает суперпозиции в отношении значительно более общих наблюдаемых. Например, когда рассматриваются системы с варьируемым числом частиц (аналогично сообществу людей, в котором люди могут рождаться и умирать), можно говорить о состояниях суперпозиции двух или трех частиц. В таком случае наблюдаемое *количество частиц* дискретно, поэтому интерпретация в смысле *вещества*, непрерывно распределенного в пространстве, не может иметь места. Единственная возможность — это думать о виртуальном состоянии, в котором нет ни двух, ни трех частиц, а две и три одновременно.

КАНДИДО

Я предпочитаю такие интерпретации, согласно которым система — *квантовое состояние* — предоставляет информацию только о *распределении вероятностей* наблюдаемых величин этой системы.

АКАДЕМУС

Это неправда, что квантовое состояние дает нам только вероятностную информацию. Некоторые квантовые состояния дают информацию о *точных значениях* некоторых величин.

КАНДИДО

Это не противоречит тому, о чем я говорю: это лишь означает, что вероятностные распределения некоторых наблюдаемых сконцентрированы на одном значении. Такие вероятностные распределения называются дельта (δ) распределениями, или δ -функциями Дирака. На этом жаргоне принцип неопределенности может быть сформулирован следующим образом:

(I) Не существует такого квантового состояния, в котором вероятностные распределения всех наблюдаемых сконцентрированы только на одном значении.

АКАДЕМУС

Таким образом квантовое состояние не было бы связано с природой, а только с нашим знанием. Другими словами, Ваша интерпретация состояния не является *реалистичной*.

БЕЛЛ

... Если Вы утверждаете, что ψ не реальна, я спрашиваю Вас: *что реально в Вашей теории*³²?

КАНДИДО

По моему мнению, она связана как с природой, так и со знанием в том смысле, что если два наблюдаемых несовместимы, точное знание значения одного из них в данный момент подразумевает, что наша информация о значении другого будет иметь статистический характер. Состояние не описывает всю реальность системы, потому что последняя недоступна для экспериментов.

АКАДЕМУС

А как тогда Вы определяете понятие *квантовое состояние*?

КАНДИДО

В любой статистической теории, особенно в квантовой механике, состояние — это ряд вероятностных распределений. Чистое состояние полностью определяется приписыванием полностью совместимых значений³³, т. е. системой одновременно измеряемых наблюдаемых.

³²Themes in Contemporary Physics II, Essays in honour of Julian Schwinger's 70th birthday, (ed.) S. Deser, R. J. Finkelstein, World Scientific (1989).

³³[Это техническое замечание и оно необязательно для понимания текста.] Неологизм *состояния Дирака* был бы более правильным, поскольку он бы обозначал различие (в то время как современная терминология этого не делает) между теми чистыми состояниями, которые являются одновременными собственными векторами полной системы *физически значимых* совместимых наблюдаемых, и такими состояниями, как *когерентные состояния*, которые не имеют этого свойства, несмотря на то, что они чистые и также физически значимые.

АКАДЕМУС

Это определение кажется довольно абстрактным, далеким от какой-либо интуитивной интерпретации. В частности, непонятно, почему оно должно касаться и природы, и наших знаний.

КАНДИДО

Если Вы подумаете, то Вы увидите, что оно вовсе не абстрактно. Давайте, простоты ради, ограничимся чистыми состояниями. Утверждение, что система S в момент t находится в данном квантовом состоянии, дает некую точную информацию о S , т. е. значения, принимаемые в этот момент любым набором наблюдаемых, определяющих состояние, или их функцию. Это абсолютно объективная информация, касающаяся отдельной системы S .

Для всех наблюдаемых, которые не являются функциями тех, что определяют состояние, знание квантового состояния дает только распределение вероятностей в данный момент.

Это также объективная информация, поскольку относительные частоты, предсказываемые квантовой теорией, согласуются с экспериментальными данными, и в этом смысле такое утверждение, как *вероятность того, что событие X происходит*, объективно настолько, насколько объективно утверждение *длина этого стола равна одному метру*.

Однако эта объективность больше не касается системы S , но как это происходит в любой статистической теории, всякого множество систем, идентичных S и подготовленных таким образом, что в момент времени t наблюдаемые, описывающие состояние, принимают одинаковые значения для каждой системы; в физике такое множество часто называют *статистической совокупностью*.

АКАДЕМУС

Но тогда переход из смешанного состояния в состояние суперпозиции на самом деле не является изменением физического состояния, а только изменением информированности экспериментатора.

КАНДИДО

Я не вижу в квантовой теории ничего, что могло бы дать право говорить о том, что наш процесс познания влияет на объективные свойства вещей.

АКАДЕМУС

Начиная с утверждения, согласно которому вектор состояния системы *представляет всю физическую реальность* этой системы, можно резюмировать, что:

(I) Квантовая теория — это полная теория.

- (II) Чистое (состояние) предоставляет максимум информации о системе в данное время, доступный с помощью квантовой теории.
- (III) Вся информация о системе, не включенная в квантовое состояние, не может поэтому принадлежать *физической реальности* — иначе квантовая теория была бы неполной.

КАНДИДО

Это хороший силлогизм. Но создается впечатление, что он оперирует двумя различными значениями слова *полнота*. Я думаю, что физическая теория должна интересоваться наблюдаемыми величинами и их значениями. Хорошая теория должна:

- (i) определять те величины, которые должны наблюдаться в первую очередь;
- (ii) определять значения тех величин, которые заведомо возможны;
- (iii) наконец, перечислять все формулировки, которые можно сделать в отношении этих значений.

Ваша формулировка неявно утверждает, что *все, что существует, — познаваемо* или, соответственно, *если что-то непознаваемо, то оно не существует*. Для того, чтобы избежать такой путаницы, я бы предложил сформулировать два понятия *состояния*: состояние, которое я бы назвал *Бергсониаанским* (или *Платоновым*) *состоянием* системы, состоящим из совокупности значений всех наблюдаемых данной системы в заданный момент времени, и состояние, которое я бы назвал *состоянием относительно данной теории*, состоящее из всех значений в заданный момент времени любого набора совместимых наблюдаемых системы, который *максимален* в отношении этого свойства (т. е. не возрастает, нетривиальным образом сохраняя совместимость)³⁴.

III.5. Принцип неопределенности

КАНДИДО

В классической физике имеется два основных типа физических законов: законы, выражающие количественные отношения (например, закон всемирного тяготения, который связывает силу притяжения с массой и расстоянием), и законы, выражающие а priori ограничения какой-то одной величины

³⁴Подробный анализ понятия *физического состояния* можно найти в L. Accardi, *Stato Fisico*, Enciclopedia Einaudi 13 (1981), 514–548.

(например: скорость света максимальна в вакууме, энергия системы при определенных условиях дискретна...). К какому типу законов относятся принципы неопределенности?

АКАДЕМУС

Ни к одному из типов: они не выражают отношений между наблюдаемыми величинами, а лишь между порциями информации, которую мы можем получить для отдельных наблюдаемых; они устанавливают а priori ограничения не на значения, которые могут принимать одно или несколько наблюдаемых, а лишь на точность, с которой мы можем измерять их... Они являются первым примером физических законов, формулировка которых не может быть сведена к формулировке, касающейся природы, а, скорее, отношений между природой и возможным знанием о ней, полученным экспериментально.

КАНДИДО

Вы подразумеваете, что они не касаются природы как таковой, а лишь отношений между человеком и природой? Не рискуем ли мы, в таком случае, привести элемент антропоморфизма в науку, которая всегда, напротив, старалась выражать законы независимо от субъекта познания?

АКАДЕМУС

Нет, потому что для того, чтобы применить эти принципы, важно не то, является ли субъект познания человеком или другим живым существом, а только то, что процесс сбора информации происходит посредством взаимодействия любого типа между субъектом познания и объектом. Эти принципы относятся к любому субъекту познания, постольку поскольку это знание получено экспериментально.

КАНДИДО

Гейзенберг неоднократно настаивал на аналогии между принципами неопределенности и вторым законом термодинамики.

АКАДЕМУС

Принципы неопределенности являются негативными принципами и сравнимы с другими важными негативными физическими принципами: невозможностью превышения скорости света в вакууме, вторым законом термодинамики, заключающимся в невозможности передачи тепла от холодного тела к более теплomu без затраты работы, и третьим законом термодинамики, т. е. невозможностью достигнуть абсолютного нуля. Но в отличие от них, выражающих свойства физических систем по крайней мере законом, независимым от того факта, что такие свойства можно проверить экспериментально, принципы неопределенности а priori накладывают некоторые

ограничения на количество информации, которое субъект познания может получить об объекте при взаимодействии с ним: коротко говоря, *ограничение на знание как знание, полученное с помощью эксперимента.*

КАНДИДО

Мы говорим об *априорных ограничениях*, поскольку они затрагивают внутренние условия процесса познания, а не специфические исторические или внешние условия, при которых может происходить этот процесс. *Они не относятся к обобщающему или умозрительному моменту этого процесса, а относятся к экспериментальному моменту, когда наша информация меняется не как следствие чистого мышления, а при взаимодействии с внешним миром.*

АКАДЕМУС

С ними программа Канта по анализу априорных пределов, с которыми человеческий разум приобретает информацию и перерабатывает ее в знание, становится более современной, потому что в настоящее время такие ограничения больше не касаются разума как *чистого разума*, а, скорее, *экспериментального разума*.

КАНДИДО

Теперь это действительно похоже на новую и глубокую философскую идею. Совсем другое дело, не то что все эти коллапсы; кошки, чуть-чуть живые, чуть-чуть мертвые; сознание моего друга, создающее меня; разветвление миров... Но скажите, как можно сформулировать этот принцип неопределенности Гейзенберга?

АКАДЕМУС

Формулировка, которая, по-видимому, лучше всего отражает концептуальное содержание этого принципа, заключается в следующем:

физическое состояние системы, как это понимает классическая физика, как правило, нельзя выявить экспериментально.

КАНДИДО

Ваша формулировка звучит, безусловно, впечатляюще, но непонятно. Не могли бы Вы разъяснить ее?

АКАДЕМУС

В соответствии с классической механикой состояние любой физической системы однозначно определяется *местоположением и скоростью* всех частиц системы³⁵. Очевидно, что классическая физика рассматривала возможность неточности при проведении измерений местоположения и ско-

³⁵С технической точки зрения мы должны, скорее, говорить о *моментах количества движения*, а не о *скорости*. Однако, поскольку для большого числа систем момент равен массе,

рости, но эти неточности были ограничены ролью случайных помех, обусловленных историческими условиями, такими как, например, отсутствием достаточно точных приборов для осуществления измерений. Ни один классический физик не сомневался в том, что технический прогресс позволит человеку получить возможность осуществить *точные* измерения таких величин. Квантовая физика навсегда покончила с таким положением: начиная с определенного уровня точности, любое улучшение измерения положения влечет за собой ухудшение соответствующего измерения скорости, и наоборот.

КАНДИДО

Я слышал, что *существует множество принципов неопределенности*, т. е. существует множество пар величин, таких как местоположение и скорость, которые нельзя измерить одновременно с произвольной точностью.

АКАДЕМУС

Исторически первой формулировкой принципа неопределенности является *принцип неопределенности Гейзенберга*, концептуальное содержание которого можно обобщить следующим образом: нельзя создать такие экспериментальные условия, которые позволяли бы одновременно измерять местоположение и время (интуитивно, скорость) частицы, гарантируя произвольную точность обоих измерений.

После этого было открыто много принципов неопределенности, т. е. пар величин, для которых справедливо утверждение, аналогичное приведенному выше для пары местоположение – момент.

КАНДИДО

Бор ясно представлял, что принцип неопределенности, сформулированный Гейзенбергом, был лишь частным случаем общей ситуации. Он попытался выразить эту общую ситуацию *принципом дополненности*.

БОР

Принцип неопределенности не является первичной физической истиной, а, в свою очередь, выводится из более общего физического принципа, чья значимость не ограничивается физикой: *принципа дополненности*.

КАНДИДО

Если я правильно понимаю, Бор подразумевал, что помимо пары *местоположение – момент* существует бесчисленное множество пар несовместимых наблюдаемых, и поэтому бесчисленное множество принципов неопределенности. Все эти принципы в целом он называл *принципом дополненности*.

умноженной на скорость, мы для того, чтобы упростить язык, должны ограничить себя этими системами.

АКАДЕМУС

Это понятная, но ограниченная интерпретация *принципа дополнительности*. Бор, возможно, думал, что все эти принципы неопределенности являются, с физической точки зрения, следствием так называемого *дуализма волна – частица*. Дополнительность является именно тем свойством, которое обуславливает тот факт, что нельзя создать прибор для проведения экспериментов, который выделял бы одновременно как *корпускулярные, так и волновые свойства* макроскопических систем.

Полагаю, что Бор представлял дополнительную не как целое, охватывающее все возможные принципы неопределенности, а как их общую физическую сущность.

БОР

Природа самой квантовой физики . . . заставляет нас рассматривать координату пространство – время и требование причинной связи – объединение которых характерно для классической физики – как дополняющие аспекты, взаимоисключающие друг друга из описания и представляющие идеализацию наблюдения и определения . . .

КАНДИДО

Я помню, что в разд. II.1 мы видели, что экспериментальные данные, касающиеся *отдельных* микросистем, однозначны и они подтверждают интерпретацию в терминах *частиц*, в то время как *волновой* аспект при дуализме волна – частица возникает только тогда, когда вовлечено множество частиц, и существует множество причин думать, что это *кумулятивное* явление.

Именно поэтому я предпочитаю рассматривать дополнительную как обобщение принципов неопределенности. Но тогда возникает вопрос: есть ли действительно нечто общее для всех этих принципов неопределенности?

АКАДЕМУС

Общее всех принципов неопределенности можно выразить следующим образом:

(I₀) *Существуют наблюдаемые, которые нельзя измерить одновременно с произвольной точностью в одной и той же системе.*

КАНДИДО

Другие обращаются к аргументу ЭПР для утверждения, что правильная формулировка принципа неопределенности должна быть следующей:

(I₀) *Существуют такие наблюдаемые, для которых ни одна система не может быть приготовлена таким образом, чтобы можно было узнать наверняка, что в данный момент все эти наблюдаемые принимают приписанные им ранее значения со сколь угодно малой погрешностью.*

АКАДЕМУС

Другая формулировка принципов неопределенности обусловлена идеей о том, что аргумент ЭПР предоставляет метод для одновременного измерения на одной и той же системе наблюдаемых, которые, в соответствии с принципом Гейзенберга, никогда нельзя было бы измерить: спин в направлении a частицы 1 и спин в направлении b частицы 2 измеряются в одно и то же время t . Вследствие синглетного состояния знание спина частицы 2 в направлении b позволяет знать наверняка спин частицы 1 в направлении b . Поэтому я измерил, одновременно и точно, спин частицы 1 как в направлении a , так и в направлении b , что противоречит стандартной формулировке принципа Гейзенберга.

С другой стороны, я не могу сказать, что я подготовил частицу 1 с хорошо определяемым спином как в направлении a , так и в направлении b , поскольку, согласно общепринятой теории, измерение спина частицы в направлении a может изменить величину спиновой составляющей в направлении b . По этой причине вторая формулировка принципа Гейзенберга была бы более корректной.

КАНДИДО

Это возражение, однако, не учитывает различий между ящиком для бультеней и хамелеонами (см. разд. IX.2), т. е. в нашем случае между двумя утверждениями:

- 1) спин частицы 1 в направлении a имеет величину $+1$;
- 2) если я измеряю величину спина частицы 1 в направлении a , я определенно получу $+1$.

Это различие будет подробно обсуждаться в разд. IX.2, и поэтому мы не намерены говорить об этом сейчас. Я только упомянул об этом в оправдание того, что, говоря о *принципе неопределенности Гейзенберга*, мы будем в дальнейшем ссылаться на его стандартную формулировку (I_0).

Необходимо отметить, что невозможность измерения с произвольной точностью двух наблюдаемых в одно и то же время касается *отдельных измерений и отдельных систем*.

АКАДЕМУС

Это терминология уводит в сторону от терминологии традиционной, но мы также можем пользоваться ею. Тогда, помня о том, что в физике две наблюдаемые, которые могут быть одновременно измерены с произвольной

точностью, называются *совместимыми*, можно видеть, что эквивалентная формулировка принципа неопределенности состоит в следующем:

(I₁) *Существуют несовместимые наблюдаемые.*

КАНДИДО

Мне это кажется довольно абстрактным выражением, далеким от слышанных мной рассуждений Гейзенберга в отношении микроскопа и гамма-лучей или рассуждений Эйнштейна и Бора в отношении фотонов и относительности вообще, а также далеким от тех положений, которые я нашел в книгах по физике.

АКАДЕМУС

В квантовой теории можно найти несколько типов несовместимости: местоположение – момент, время – энергия, угловой момент, или спин в непараллельных направлениях пространства . . . Для каждого из них возможно было придумать эксперимент, который мог бы подчеркнуть их основные свойства. Такая дискуссия носила бы чисто технический характер и не имела бы значения для концептуальных и философских выводов, следующих из этой формулировки, поскольку единственной информацией, которую она могла бы добавить, было бы *доказательство* несовместимости двух отдельных величин. Это доказательство, весьма интересное и поучительное для физиков, было бы, однако, совершенно непонятно неспециалисту.

КАНДИДО

Если я правильно понимаю, Вы хотите отделить *доказательство* от значимости принципов неопределенности, так же как и количественное выражение такой несовместимости от концептуальной сущности, общей для всех формулировок, которые Вы идентифицируете простым утверждением существования несовместимых наблюдаемых, заключенным в формулировке (I₁).

АКАДЕМУС

Да, потому что механистическое описание природы поставлено в непоправимо критическое положение только вследствие принятия этого утверждения.

КАНДИДО

Но я слышал, что многие специалисты утверждают, что принцип неопределенности является следствием математической модели квантовой теории.

ПУТНАМ

Принцип неопределенности не является независимым предположением. Это математическое следствие основного допущения, что любое возможное состояние системы, или, скорее, любое знание о состоянии системы, которое

может быть получено физическими методами, может быть представлено рядом волн в соответствии с правилами квантовой механики... Принцип неопределенности, как мы отметили выше, не является независимым допущением, но вытекает непосредственно из формализма³⁶.

АКАДЕМУС

Действительно, начиная с математической модели квантовой теории, можно вывести более слабую форму принципа неопределенности, так называемое *статистическое выражение этого принципа*. В то время как исходная формулировка Гейзенберга касалась *одновременных измерений в одной системе*, статистическая формулировка касается *одновременных измерений множества отдельных элементов*. Первая является формулировкой в отношении пары отдельных одновременных измерений, последнее — *усредненным свойством* (точнее, она касается *квадратного корня среднего*) и поэтому слабее.

КАНДИДО

Необходимо знать, что такое *квадратный корень среднего* для того, чтобы понять разницу между двумя этими выражениями.

АКАДЕМУС

Это необязательно, достаточно помнить следующий пример: физик, который сумел *точно и одновременно* измерить местоположение и скорость одной и той же частицы, скажем, электрона, исказил бы исходное выражение принципа неопределенности Гейзенберга, но не в его статистическом виде. Для того, чтобы исказить его статистический вид, было бы необходимо, чтобы во всех последовательностях одновременных измерений множества частиц оказалось, что соответствующая частота точных измерений не настолько мала, чтобы ею можно было бы пренебречь по сравнению с таковой других измерений.

КАНДИДО

Вы знаете о существовании экспериментов, в которых *индивидуальная формулировка* искажена, а статистическая — нет?

АКАДЕМУС

Я не знаю таких экспериментов, более того, историческая дискуссия Бора и Эйнштейна о попытках последнего доказать ошибочность принципа неопределенности велась вокруг измерений отдельных частиц, а не нескольких частиц, находящихся в одном квантовом состоянии, как этого требовало статистическое выражение.

³⁶ *A Philosopher looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed), недостоверно *Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965, item 10.

КАНДИДО

Должны ли мы тогда заключить, что исходное выражение Гейзенберга в определенном смысле является *более фундаментальным*, чем статистическое выражение?

АКАДЕМУС

Думаю, да. По крайней мере до тех пор, пока эксперимент не покажет, что это не так. Как бы то ни было, я уже несколько раз говорил, что эта возможность кажется мне маловероятной.

КАНДИДО

Но, если статистическое выражение, которое было выведено из математического формализма, слабее, чем выражение принципа неопределенности как физического принципа, тогда какое свойство математического формализма действительно отражает основную черту этого принципа?

АКАДЕМУС

Думаю, ответ на Ваш вопрос можно найти в некоммутативности тех операторов, которые в математическом формализме представляют пары несовместимых наблюдаемых.

КАНДИДО

Как может такая абстрактная и техническая вещь, как *некоммутативность операторов*, отражать такое интуитивно моментальное утверждение, как невозможность одновременного измерения двух наблюдаемых величин?

АКАДЕМУС

Если Вы хотите получить более интуитивную интерпретацию, Вы должны различать абстрактное значение, я бы сказал, *платоническое*, наблюдаемой величины и то значение этой же величины, которое вытекает из процесса измерения, являющегося результатом *взаимодействия* частицы с измерительным прибором.

КАНДИДО

Это различие кажется естественным, но почему оно не помогает мне понять роль взаимозаменяемости?

АКАДЕМУС

Думайте об измерении как о *процессе получения информации о системе посредством взаимодействия с ней*. Рассмотрим два события A и B относительно одной и той же частицы. Например, предположим, что событие A — это: *положение частицы* — q , а событие B — это: *момент частицы* — p . Назовем AB прибором, который вначале выявляет, имеет ли место событие A , а затем выявляет (для той же частицы), имеет ли место событие B . Назовем BA прибором, который осуществляет те же самые измерения, но

только в обратном порядке: сначала B , а затем A . Может случиться, что измерения, осуществляемые с помощью прибора AB , окажутся отличными от измерений, проводившихся с помощью прибора BA . Это является физическим примером взаимозаменяемости.

КАНДИДО

Но как можно интуитивно объяснить такое различие?

АКАДЕМУС

Вы можете думать, что измерение A вызывает изменение значений B , и наоборот. Поскольку измерение является особым случаем взаимодействия, это вовсе не удивительно. Классическая физика неявно считала доказанным, что *получение информации с помощью экспериментов всегда было кумулятивным*. Квантовая физика учила нас, что это не всегда так: *иногда экспериментальный сбор информации о событии может уничтожить ценность ранее собранной информации о других событиях* или может изменить поведение системы в будущем.

КАНДИДО

Похоже, что это действительно основной принцип. Возможно, настоящее физическое основание принципа неопределенности лежит именно в этой формулировке. Может быть, начиная с этого момента, мы могли бы ответить на вопрос, который не рассматривался теми авторами, что, подобно Путнаму, представляют принцип неопределенности как следствие математического формализма, и который состоит в следующем: *следствием чего, в свою очередь, является эта математическая модель?*

Доказательство того, что эта математическая модель является следствием физических предположений о природе, кажется мне концептуально более важным, чем вывод утверждений о физике, начиная с модели, физические предпосылки которой нельзя выделить настолько явно, чтобы оправдать основные черты самой модели.

АКАДЕМУС

Основной чертой формулировки (I_1) принципа неопределенности, помимо ее всеобщности, является независимость от какой-либо математической модели.

Именно эта черта делает ее подходящей в качестве основного принципа квантовой теории, т. е. принципа, выражение которого не нуждается в какой-либо ранее существовавшей математической теории, а, наоборот, само является основой такой теории в том смысле, что оно практически однозначно определяет ее модель.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что, начиная с такого абстрактного и качественного утверждения, можно вывести математическую модель квантовой теории?

АКАДЕМУС

Да, но такой вывод получен с помощью длинного и сложного математического процесса, который отвлек бы нас от нашей цели, состоящей в том, чтобы сконцентрироваться на концептуальных аспектах теории³⁷. Кроме того, как я Вам уже говорил, эти аксиоматизации являются интеллектуальными играми, которые развлекают математиков, но оставляют абсолютно безразличными людей практических, таких как мы, физики.

КАНДИДО

Существует, однако, разница между ролью аксиоматизации в физике и математике, о которой, возможно, стоило бы поразмышлять. В математике аксиоматизация оставляет семантическое содержание в стороне от аксиом: этому учил нас Гильберт. В физике, напротив, мы должны различать аксиоматизации, чьи постулаты имеют прямую физическую интерпретацию, и постулаты, в которых этого нет. Только в отношении первых имеет смысл говорить о *выводе модели*, вторые являются скорее *описанием* такой модели. Это не означает, что вторые аксиоматизации бессмысленны, напротив, с них часто начинаются первые. Например, в случае квантовой теории аксиомы фон Неймана *описывают*, а аксиомы квантовой вероятности *делают вывод*.

АКАДЕМУС

Хорошо, но это не означает, что формальная процедура, такая как аксиоматизация, может решить существенную проблему, такую как парадоксы квантовой теории.

КАНДИДО

Если бы было действительно возможно вывести всю квантовую модель, включая пресловутый принцип суперпозиции и *интерференционные члены*, из постулатов, имеющих прямую и естественную физическую интерпретацию, то проблема интерпретации квантовой теории могла бы быть выражена научно, т.е. однозначно и рационально. Другими словами: если я могу интерпретировать физические аксиомы даже без того, чтобы привести противоречащий в допущениях реализм или локальность, то я смогу

³⁷L. Accardi, *Some trends and problems in Quantum probability and applications*, Springer Lecture Notes in Mathematics, N. 1033 (1982) or L. Accardi, *Can mathematics help solving the interpretational problems of quantum theory?* Il Nuovo Cimento, 110 B, 1995, 685-721, reprinted in *Mesoscopic Physics and fundamental problems in quantum mechanics*, C. Di Castro, F. Guerra, G. Jona-Lasinio (eds.), 1995.

сделать то же самое для всей теории, выведенной из таких аксиом, на базе методологического принципа, который, как мне кажется, сам себя объясняет: *для его интерпретации теория нужна не больше, чем это необходимо для интерпретации ее аксиом.*

АКАДЕМУС

Я начинаю понимать, что Вы имеете в виду: больше не будет повода для интерпретации отдельных экспериментов в нечетко определенном общем контексте, и поэтому опасности риска внесения подразумеваемых постулатов, что является предубеждением. Вы говорите: *«Если я формулирую несколько постулатов, из которых можно вывести все остальные формулировки, то интерпретация этих формулировок теории и экспериментов, с которыми они сравниваются, также будут следовать из интерпретации этих постулатов.»*

КАНДИДО

Еще яснее: поскольку все трудности интерпретации возникают из наблюдаемых следствий принципа суперпозиции, то, если этот принцип можно вывести из постулатов, для интерпретации которых необязательно обращаться ни к *отказу от реализма*, ни к *нелокальности*, будет также необязательно предлагать такие странные идеи для интерпретации наблюдаемых последовательностей таких постулатов.

АКАДЕМУС

Было бы действительно странно, если бы вывод требовал для своей интерпретации введения допущений, которые необязательны для интерпретации предпосылок, из которых он был выведен.

И если единственным постулатом неклассического типа, необходимым для осуществления такого вывода, являлось бы выражение (I_1) принципа неопределенности, который мы только что обсуждали, то этот факт действительно следовало бы отразить.

КАНДИДО

У меня начинает появляться смутная идея о глубине принципа неопределенности, но я все еще не вижу его связи с необходимостью внесения статистических формулировок в физическую теорию, которая так мешала Эйнштейну и которая провозглашала себя не аппроксимацией, а основной теорией.

АКАДЕМУС

Связь настолько сильна, что представляет собой эквивалентность: если мы согласны называть *полной экспериментальной теорией* любую теорию, удовлетворяющую двум следующим условиям:

- (i) не исключать а priori какую-либо наблюдаемую величину (полнота);
- (ii) не включать какое-либо утверждение, которое не сопоставимо с осуществимыми экспериментами (*экспериментальность*),

то мы можем привести третье эквивалентное выражение принципа неопределенности, которое лучше чем предыдущие указывает на несовместимость теории, принимающей принципы неопределенности, с механистической точкой зрения на природу:

(I₃) Полная экспериментальная теория *непрерывно является статистической теорией*.

КАНДИДО

Я слышал от многих людей, что заявление о том, что квантовая теория является статистической теорией неточно, поскольку, независимо от квантового состояния, всегда можно найти наблюдаемые, которые принимают точные значения в этом состоянии.

АКАДЕМУС

Это наивное возражение, поскольку отличительной чертой статистической теории является не отсутствие точных формулировок, а лишь содержание некоторых утверждений не точного, а статистического типа. Кроме того, такие формулировки не должны сводиться к точным формулировкам внутри теории.

КАНДИДО

Но тогда вполне очевидно, что принятие принципа неопределенности в выражении (I₃) означает сигнал к окончательному отказу от механистической программы.

АКАДЕМУС

По сравнению с этой программой мировоззрение изменено: раньше все наблюдаемые были совместимыми, и только точная теория могла быть полной, в то время как статистическая теория рассматривалась лишь в качестве полезного инструмента для получения приблизительных результатов. В настоящее время только статистическая теория может быть полной, а точная теория может быть лишь неполной, что означает, что либо она является аппроксимацией, либо она не рассматривает некоторые наблюдаемые, существующие в природе.

В механистической концепции отдельные системы описываются точными моделями, а статистические модели только принимают участие как упрощенные и частичные (не содержащие всей возможной информации)

модели описания сложных систем, состоящих из множества подсистем (например, правильное движение планет описано классической механикой, в то время как неупорядоченное движение молекул турбулентного газа приблизительно описано статистической механикой).

С точки зрения новой идеи отдельные системы описываются с помощью статистических моделей, а точные модели являются моделями, которые выступают в роли упрощенных и частичных описаний (содержащих только информацию о *макроскопических наблюдаемых* системы), применимых только к макросистемам, и даже не ко всем из них.

III.6. Возражения Эйнштейна

ЭЙНШТЕЙН

Я думаю, что фундаментальные законы физики могут состоять не из связей между вероятностями реальных *вещей*, а, скорее, из отношений, касающихся *вещей в самих себе*³⁸.

ФАЙН

Что Эйнштейн здесь утверждает, так это принятие каузального реализма, и, похоже, он никогда серьезно не рассматривал реализм отдельно от детерминизма (в его понимании не вероятностных законов)³⁹.

АКАДЕМУС

Поскольку принцип неопределенности декретирует отказ от механистической программы и интуиции, Вы можете ясно понять, почему Эйнштейн, работа которого над классической теорией поля представляет собой вершину этой программы и интуиции, всегда был против ее принятия не только в качестве нового физического закона, но и в качестве *нового типа* физических законов.

КАНДИДО

Думаю, что Эйнштейн был не столько против самой квантовой теории (в развитие которой он внес большой вклад), сколько против нового мировоззрения, которое развивалось, несмотря на трудности и противоречия, параллельно этой теории и с помощью принципа неопределенности поднялось до уровня необходимости, того, что он всегда считал приспособлением утилитарным: статистического описания природы.

³⁸Цитата из A. Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, 1986.

³⁹См. выше.

АКАДЕМУС

Это новое мировоззрение составляет фундамент того, что Гейзенберг называл *копенгагенским духом*, и что еще чаще называют *копенгагенской школой*.

КАНДИДО

А что это такое, *копенгагенская школа*?

АКАДЕМУС

Лучше, следуя Гейзенбергу, использовать термин *копенгагенский дух*. Он лучше передает дух этой группы исследователей (Бора, Гейзенберга, Паули, Розенфельда, ...), которых, несмотря на различие, независимость, а иногда и противоречивость взглядов (а временами и необоснованные экстраполяции), объединяла вера в значимость принципа неопределенности, вера в то, что программа точной теории законов природы ушла навеки. Их объединяли также представления, имеющие глубокие корни и лежащие в основе философских идей Бора, в институте которого в Копенгагене многие из них переживали период творческого расцвета.

КАНДИДО

Противостояние Эйнштейна *духу Копенгагена* делится на два этапа: на первом он пытается доказать с помощью разумных и идеальных экспериментов *ошибочность* принципа неопределенности и, следовательно, несостоятельность квантовой теории, на второй стадии он пытается доказать, что квантовая теория является *неполной*.

АКАДЕМУС

На первом этапе этой дискуссии Эйнштейн оказывается побежденным: все придуманные им идеальные эксперименты для выявления принципа неопределенности (т. е. доказательства, что два наблюдаемых, считающихся несовместимыми с точки зрения квантовой теории, на самом деле совместимы) пересмотрены Бором, который доказывает с помощью более тщательного анализа, что эти же самые эксперименты можно использовать для подтверждения положений квантовой теории.

КАНДИДО

Возможно, эта неспособность доказать ложность принципа неопределенности Гейзенберга, даже на принципиальном уровне, на самом деле является для него сильной эмпирической поддержкой. Как, например, наилучшим обоснованием второго закона термодинамики является провал любой попытки получить вечный двигатель (второго рода), т. е. механизм, результат функционирования которого состоял бы единственно в превращении данного количества теплоты в работу.

АКАДЕМУС

Действительно, большинство ученых пытается обосновать свое убеждение в том, что принцип неопределенности имеет существенное значение, именно на результатах множества идеальных вычислительных экспериментов, а не на действительно осуществленных экспериментах.

КАНДИДО

Но тогда люди, которые подобно М. Джаммеру выражают недовольство по поводу слабой экспериментальной поддержки принципа неопределенности, полностью игнорируют основную суть вопроса.

ДЖАММЕР

... Мы не задумываясь говорим, что в истории физики очень редко встречался закон, который имел бы такое принципиальное значение и был бы так слабо подкреплён экспериментально⁴⁰.

КАНДИДО

Может показаться, что экспериментов в этом направлении было так мало не потому, что люди ленивы, а потому что *никто не мог изобрести правдоподобный эксперимент*. Кто же захочет проводить эксперимент, который изначально обречен на провал.

АКАДЕМУС

Я разделяю Вашу точку зрения. Изучение принципа неопределенности потребует критического пересмотра исторического спора между Бором и Эйнштейном. Кое-что уже делается в этом направлении⁴¹.

КАНДИДО

Если человек, обладающий своеобразной гениальностью Эйнштейна придумывать идеальные эксперименты, в конце концов оставит попытки найти слабую сторону принципа неопределенности, мы тогда действительно должны поверить, что такой принцип твердо займет свое место в нашей культуре. Но это всего лишь предположение, и важно, чтобы были приняты все возможные теоретические усилия для его проверки.

АКАДЕМУС

Но Эйнштейн не относился к тому типу людей, которые с легкостью бросают борьбу: не достигнув успехов в нападках на принцип неопределенности, он обратил все свои силы на *полноту, локальность и реализм* теории.

⁴⁰ M. Jammer, *The philosophy of quantum mechanics*, Wiley, 1974, p. 81.

⁴¹ Dennis Dieks, *Einstein's photon box and Bohr's uncertainty argument*, in 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science, August 19–25 (1995), Florence, Volume of Abstracts, p. 455.

КАНДИДО

И на этот раз, если не теория, то, по крайней мере, ее интерпретация настолько сильно пострадала от безжалостных нападков рациональной критики, что была потрясена и пребывала в шоке в течение десятилетий.

АКАДЕМУС

Прежде чем слушать этот эпический спор, мы лучше объясним, насколько это возможно и безо всяких технических тонкостей, квантовую дискретность в принципе неопределенности и причины, которые убедили людей в том, что такой принцип должен быть включен в число незыблемых теоретических достижений современной науки.

III.7. Физические основы принципа неопределенности

КАНДИДО

Мне кажется вполне очевидным, что а priori должно существовать ограничение на знание как на экспериментальное знание. Мне странно только, что такое ограничение появилось лишь с возникновением квантовой теории.

АКАДЕМУС

Физические корни каждого принципа неопределенности находятся в существовании таких дискретных наблюдаемых величин (которые также называются квантованными), что они не могут неограниченно делиться, а могут лишь изменяться целыми множествами, составляющими невидимую и неделимую минимальную единицу, которая называется *квантом* рассматриваемого наблюдаемого.

КАНДИДО

Но существование таких величин не характерно для квантовой теории. Электрический заряд является классическим примером величины, обладающей таким свойством.

АКАДЕМУС

Да, но это касается только определенного типа взаимодействий, в то время как согласно концепции квантовой физики *каждое взаимодействие реализуется посредством обмена квантами*, т. е. дискретными количествами.

КАНДИДО

Это другая идея, которую, на мой взгляд, трудно визуализировать: согласно теории поля *объекты искривляют пространство*, и взаимодействие между объектами состоит в том, что каждый из них *воспринимает* искажения пространства, вызванные другими объектами.

Квантовая теория, напротив, вносит идею о том, что различные физические объекты взаимодействуют посредством обмена квантами. Согласно этой теории сами поля квантованы.

ШРЁДИНГЕР

При серьезном рассмотрении идея о том, что физический процесс состоит в непрерывном обмене дискретными пакетами между микросистемами, — это всего лишь полезная в некоторых случаях метафора⁴².

АКАДЕМУС

Дискретность квантов действия подразумевает, что интенсивность взаимодействий не может быть меньше некоторой базовой величины, при этом можно доказать, что эта величина имеет порядок универсальной постоянной, называемой *постоянной Планка*. Поэтому любое взаимодействие (особенно измерение) вызовет *искажение* взаимодействующих систем, интенсивность которого не может иметь порядок величины ниже, чем постоянная Планка. Особенно в случае, когда размерности одной из двух взаимодействующих систем (например, измеряемого объекта) имеют порядок постоянной Планка, такое искажение значительно изменит его условия.

КАНДИДО

Существование кванта действия подразумевает поэтому необходимость минимального искажения, которое не может больше уменьшаться в какой-либо процедуре измерения.

АКАДЕМУС

То же самое происходит и с электрическим зарядом, а на микроскопическом уровне и того больше. Знание постоянной Планка в числовом выражении позволяет помимо прочего количественно оценить порядок величины такого искажения и сделать вывод о том, что в контексте атомного и субатомного явления оно часто имеет тот же порядок, что и исследуемое явление. Из этих двух утверждений следует *невозможность контролировать* минимальное — более не уменьшаемое — искажение, и эта бесконтрольность играет основную роль в установлении априорных ограничений возможности получения информации о системе посредством взаимодействия с ней.

КАНДИДО

Из вышесказанного следует, что неконтролируемость элементарного искажения помимо квантования взаимодействий включает различие между *макроскопическим* и *микроскопическим*.

⁴²E. Schrödinger, *Statistical Thermodynamics*, Cambridge university press, 1967.

АКАДЕМУС

Именно так. Более того, эта разница не должна зависеть от человека, размерности, которую он выбирает, порядка его восприятия, а только (в универсальном смысле) от размерности постоянной Планка.

Другими словами, существование постоянной Планка позволяет выявить различие между макроскопическим и микроскопическим в абсолютном смысле и безотносительно размерностей человека.

КАНДИДО

Подведем итог: три взаимосвязанных аспекта принимают участие в анализе, ведущем к выражению принципа неопределенности:

- (i) невозможность избавиться от искажений, обусловленных квантами,
- (ii) теоретическая неконтролируемость такого искажения,
- (iii) в микроскопическом мире искажение имеет тот же порядок величины, что и исследуемое явление.

АКАДЕМУС

Я должен сказать, что одинаковость всех доказательств принципа неопределенности сводится к следующему: поскольку все взаимодействия в природе, особенно процессы измерения, осуществляются посредством квантового обмена, из этого следует, что при измерении наблюдаемого B значение другого наблюдаемого A меняется неконтролируемо и дискретно. Увеличение точности измерения B означает усиление его взаимодействия с измерительным прибором и, следовательно, искажение значений A . Невозможность в принципе сделать сколь угодно малыми или контролировать значения искажений, вызванные измерениями B , влечет за собой, как правило, невозможность одновременных измерений A и B с произвольной точностью.

Дальнейшие детали этого анализа требуют специального знания физики и не добавляют какой-либо информации с концептуальной точки зрения.

III.8. Индетерминизм или неопределенность?

ГЕЙЗЕНБЕРГ

... Квантовая механика определенно подтверждает тот факт, что закон причинности не имеет значения⁴³...

⁴³W.Heisenberg, (I) *Quantentheoretische Mechanik*, Deutsche Mathematiker Vereinigung, Jahresber, 36, 1927, 24–25; (II) *Über die Grundprinzipien der Quantenmechanik*, Forschungen und

ЭЙНШТЕЙН

... Квантовая механика заслуживает уважения, однако внутренний голос говорит мне, что она не решает пока еще всех проблем.

Эта теория о многом говорит нам, но не объясняет нам секретов Отца Создателя. Как бы то ни было, я уверен, что он не играет в кости с миром⁴⁴ ...

БОРН

[Квантовая теория привносит] ... нечто вроде произвола или отсутствия законов, основных и несводимых к детальному поведению мира⁴⁵ ...

ПАУЛИ

... eine prinzipielle Unbenstimmtheit, nicht nur Unbekanntheit⁴⁶.

ЭЙНШТЕЙН

... Меня также очень сильно беспокоит сущность причинности. Может ли поглощение или излучение света квантами быть значимым в смысле абсолютной причинности, или же имеет место статистическое распределение? Я должен согласиться с тем, что у меня недостаточно смелости для твердой уверенности, но, тем не менее, мне действительно было бы жаль, если бы пришлось оставить абсолютную причинность⁴⁷ ...

АКАДЕМУС

Проблема причинности долго не давала покоя Эйнштейну.

ЭЙНШТЕЙН

... Для меня совершенно неприемлема идея о том, что электрон, подвергнутый облучению, может свободно выбирать момент и направление, в котором он может сделать скачок. Если б это было так, то я предпочел бы скорее стать сапожником или хозяином игорного дома, чем физиком⁴⁸ ...

АКАДЕМУС

Эта фраза Эйнштейна относится к тому факту, что в природе существуют элементы, называемые *радиоактивными* (например, уран), которые спон-

Fortschritte 3 (10 apr.), 1927, 83; цитата из P. Forman, *Kausalität, Anschaulichkeit und Individualität, or How cultural values prescribed the characters and lessons ascribed to Quantum Mechanics*, Fisica e società negli anni '20, CLUP - CLUED, Milano, 1980.

⁴⁴ A. Einstein, *letter to Max Born*, 1926, цитата из Abraham Pais, *Sottile è il Signore*, Boringhieri, 1986, p. 472.

⁴⁵ M. Born, *Causality and chance in modern physics*, Routledge and Kegan Paul, London, 1957.

⁴⁶ ... Неопределенность в принципе еще не означает невежество ... [Немецкий язык особенно точен в афоризмах.] Цитата из E. T. Jaynes, *Probability in quantum theory*, in *Complexity, entropy and the physics of information*, W. H. Zurek (ed.), Santa Fe Institute VIII, Addison Wesley, 1990, p. 381.

⁴⁷ A. Einstein, *Letter to Born*, 27th January 1920, in Einstein, Born, *Scienza e vita*, Einaudi, 1973.

⁴⁸ A. Einstein, *Letter to Born*, 29th April 1924, as above.

танно распадаются, излучая частицы. Квантовая физика описывает такой распад, приписывая каждому временному интервалу вероятность, с которой элемент испускает частицу в данном временном интервале.

КАНДИДО

Мы должны спросить себя: отражает ли этот вероятностный закон тот факт, что распад является чисто случайным (мгновенным вследствие мгновенного *свободного выбора*, сделанного атомами) или же этот распад происходит в соответствии с определенным законом, который ускользает от нас и поэтому заменяется в математической модели статистической зависимостью?

АКАДЕМУС

Принцип неопределенности не утверждает, что электрон свободно выбирает момент и направление, в котором он совершит скачок, он только говорит о том, что квантовая теория не может предсказать их точно, а лишь статистически.

КАНДИДО

Не каждый согласится с Вашей интерпретацией. Кое-кто полагает, что электрон вообще не следует никаким законам в момент скачка.

БОРН

... Сам я склонен отказаться от детерминизма в случае атомного мира⁴⁹...

ЭЙНШТЕЙН

... Наши научные взгляды в настоящее время диаметрально противоположны. Вы верите в то, что Бог играет с миром в кости, я же в то, что в мире объективной реальности все подчиняется закону, который я пытаюсь понять странным умозрительным способом⁵⁰...

ШРЁДИНГЕР

В то время как мэтры классической эпохи, начиная Лапласом и кончая Анри Пуанкаре, всегда утверждали, что явления природы детерминированы и что вероятность, когда она привнесена в физические теории, является результатом нашего невежества или невозможностью следовать слишком сложному детерминизму, в принятой сегодня интерпретации в квантовой физике мы имеем дело с *чистой вероятностью*, которая не является результатом скрытого детерминизма⁵¹.

⁴⁹М. Born, *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge* (Vorläufige Mitteilung), ZS f. Phys. 37 (ric. 25th June 1926), 863–867; цитата из P. Forman, *Kausalität, Anschaulichkeit und Individualität*, или *How cultural values prescribed the characters and lessons ascribed to Quantum Mechanics*, Fisica e società negli anni '20, CLUP – CLUED, Milano, 1980.

⁵⁰A. Einstein, *Letter to Born*, 27th January 1944.

⁵¹Цитата из Лошака...

ВЕЙЛЬ

Квантовая физика являет собой кризис старой идеи о причинности... Но ее отрицанием строгой причинности мы интересуемся меньше, чем условиями, в которых этот процесс демонстрирует нам существующий пробел между наблюдениями и реальными процессами, между объектом и субъектом шире, чем в классической физике⁵².

ЭКЕЛАНД

Поэтому мы пришли к идее о том, что случай, имеющий место в квантовой механике, не может быть упрощен до подчеркнутого детерминизма⁵³.

ЛЕВИ-ЛЕБЛОНД

Возможно, в квантовой теории работает что-то вроде основной случайности, которая не может быть сведена до более глубоко спрятанного механизма.

АКАДЕМУС

Мы могли бы сказать, что с помощью принципа неопределенности мы продвинулись от мировоззрения, согласно которому порядок подчинялся хаосу, до мировоззрения, в котором хаос подчиняется порядку.

КАНДИДО

Это утверждение изумляет меня. Из ранее сделанного анализа формулировки принципа неопределенности я понял, что квантовая теория не может точно предсказать время и направление, в котором электрон совершит скачок, но в состоянии сделать это лишь статистически. Идея о том, что электрон *свободно выбирает*, не возникает ни на одной из стадий.

АКАДЕМУС

Это именно то место, где спор о *полноте* квантовой теории пересекается с проблемой *внутреннего детерминизма*: если Вы принимаете, что невозможно избавиться от статистического компонента *в описании* природы, и в то же время Вы утверждаете, что это описание *полное*, то Вы должны согласиться с наличием статистического компонента *в тех же самых законах природы*.

КАНДИДО

Но в этом случае я должен отказаться от важности принципа достаточной причинности.

АКАДЕМУС

Вы бы оказались в хорошей компании: некоторые авторы обсуждали возможность того, что принцип неопределенности опровергает квантовое раз-

⁵²Н. Weyl, *Mind and Nature*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1934, p. 81–82.

⁵³Ivar Ekeland, *A casom: la sorte, la scienza e il mondo*, Bollati Boringhieri.

личие между *миром необходимости* и *миром свободы*, предсказывая возникновение *выбора, свободной воли* не только в поведении человека, но и в явлениях природы.

КАНДИДО

Думаю, что если принцип неопределенности принят, то эти утверждения настолько же нельзя доказать, насколько нельзя и опровергнуть.

АКАДЕМУС

Допустим, принцип неопределенности ограничен утверждением о существовании первичного статистического уровня, которого не может избежать ни одно описание природы, достаточно утонченное для того, чтобы включать величины кванта действующих размерностей. Вторичный статистический уровень, связанный с нашей недостаточной информацией, может, возможно, перекрывать первый. Более того, согласно принципу Гейзенберга, вторичный уровень, в отличие от первого, может, как правило, отсутствовать.

КАНДИДО

На этой стадии спонтанно возникает вопрос: отражает ли первичный статистический уровень в нашей теории базовый индетерминизм законов природы, или же такие законы существуют, а принцип неопределенности только выражает недоступность их знанию.

АКАДЕМУС

Это знаменитая проблема *полноты квантовой теории*, связанная, в свою очередь, с проблемой *физической реальности*.

КАНДИДО

Однако эта проблема касается не физики, а метафизики, потому что...

ФАЙН

... Гейзенберг показал, что альтернативу — важна или нет причинность (или детерминизм) — нельзя установить эмпирически. На этом основании нельзя сказать с определенностью, является ли реальный мир каузальным. Напротив, можно задать вопрос, доказывает ли теория детерминизма себя лучше, чем теория индетерминизма⁵⁴.

⁵⁴ A. Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, 1986.

ГЛАВА IV

IV.1. Математические модели, физическая реальность и полнота

КАНДИДО

Физика изучает мир, окружающий человека, не интересуясь его проблемами, чувствами, историей и самим его существованием. Мы пытаемся охватить мерцание этой внешней реальности, этих *вещей*, окружающих нас. Концептуальными инструментами, которые физики используют для этого исследования, являются математические модели. Мы строим модели, вдохновленные окружающим миром, а затем мы *читаем свойства этого мира в свойствах моделей*. Иногда эти две структуры настолько переплетены, что их трудно отличить друг от друга.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

Вещь в себе для физика-ядерщика, если он использует эту концепцию, просто математическая структура, но она в отличие от кантовской не напрямую выводится из опыта¹.

КАНДИДО

Два представления о *полноте теории и физической реальности* тесно связаны.

АКАДЕМУС

Это очевидно, поскольку полная теория — это по определению теория, которая полно описывает реальность.

КАНДИДО

Тогда невозможно понять, является теория полной или нет, без метафизического обсуждения вопроса о том, что такое реальность.

АКАДЕМУС

Совсем не обязательно: Эйнштейн, Подольский и Розен попытались дать определение полной теории, приемлемое для всех, которое подразумевает включение формулировок только о наблюдаемых величинах и предсказания о результатах и измерениях.

¹W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, 1958, p. 55; it. tr. *Fisica e Filosofia*, Milano, 1961, 1982.

ЭПР

... В полной теории имеется элемент, соответствующий любому элементу реальности. Достаточным условием реальности физической величины является возможность его предсказания с определенностью без нарушения системы²...

КАНДИДО

Так в примере Редже, который мы обсуждали в разд. II.10, *физическими величинами* являются цвета шариков; *возможность предсказать их с определенностью* соответствует тому факту, что если я наблюдаю (т. е. измеряю) цвет шарика, находящегося в моем кармане, и определяю, что он черного цвета, то я могу заключить наверняка, что цвет шара в кармане моего друга — белый, и наоборот. Наконец, пункт *не нарушая системы* означает, что, наблюдая цвет шара, находящегося в моем кармане, я не нарушаю цвет шара, находящегося в кармане моего друга, который может находиться сколь угодно далеко от меня.

АКАДЕМУС

Да, этот наивный взгляд на реальность был у физиков до появления квантовой теории.

КАНДИДО

Эта позиция имеет глубокие корни. Обычно для подтверждения этой точки зрения приводят аргументы типа: предположим, мы не знаем, в каком состоянии находится система. Если бы я решил произвести измерение положения в момент t , то я нашел бы четкое значение этого наблюдаемого. Это позволяет мне думать, что система в момент t должна иметь четко выраженное местоположение.

С другой стороны, если бы я решил измерить скорость системы в момент t , то, рассуждая подобным же образом, я бы пришел к выводу, что система в момент t имела четко выраженную скорость.

Я делаю вывод, что частица, должно быть, имела *как* четкое местоположение, *так и* четко выраженную скорость.

АКАДЕМУС

Это *аргументация от противного*: мы часто будем иметь с ней дело.

ПОППЕР

Основным пунктом полемики, которую вели Эйнштейн и Бор, являлось то, что они оба называли достаточно туманно и не совсем правильно *вопросом о полноте квантовой механики*. Термин *полнота* во время этого спора

²A. Einstein, B. Podolsky, R. Rosen, *Can quantum mechanical description of reality be considered complete?*, Phys. Rev. 47 (1935), 777–780.

использовался в разных значениях: но и в начале, и в ходе дискуссии он главным образом использовался для обозначения *проблемы, действительно ли квантовая теория наметила (по крайней мере теоретически) конец пути в физике...*

КАНДИДО

Я думаю, что Поппер под термином *конец пути* вовсе не подразумевает, что после квантовой механики в физике уже больше нечего открывать, а только то, что *те вещи, которые квантовая механика считает невозможными в принципе, таковыми и останутся в любой теории будущего.*

АКАДЕМУС

Если он имеет в виду принцип неопределенности, то я думаю, что все, включая и Вас, согласятся с ним.

ПОППЕР

Эйнштейн *не имел в виду признание за квантовой механикой свойства быть подытоживающей, не говоря уже о том, чтобы полно представлять явления.* Я думаю, что термин подытоживающая (*endgültig*) здесь надо понимать как *заключительная* — на самом деле как *конец пути*³.

БЕЛЛ

Что делает ученого уверенным в том, что в научном исследовании есть доля правды, так это возможность предсказывать существование еще не наблюдавшихся явлений, т. е. быть впереди экспериментальных результатов относительно ранее не наблюдавшихся явлений⁴.

ЭПР

... В квантовой механике при рассмотрении двух физических величин, описанных не коммутирующими операторами, знание одной величины исключает знание другой. Тогда либо описание реальности с помощью волновой функции квантовой механики является неполным, либо эти две величины не могут одновременно быть реальными...

КАНДИДО

Но если мы соглашаемся с идеей о том, что существует определенный механизм, который заставляет электрон перескакивать в заданный момент в заданном направлении, и если квантовая механика не имеет возможности описать такой механизм, то мы должны заключить, вместе с Эйнштейном, что *квантовая теория является неполной.*

³K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca scientifica*, Il Saggiatore, 1984, pp. 25–26. См. Albert Einstein, Hedwig und Max Born, *Briefwechsel: 1916–1955, 1969, or The Born–Einstein letters*, 1971, pp. IX–X; it. tran. *Scienza e vita. Lettere 1916–1955*, Torino 1973, p. XII (перевод был несколько видоизменен из соображений единообразия, см. гл. I).

⁴Phys. Rep. 137 (1986), 7–9.

ПОППЕР

1927–1932. Этот период ознаменовался тем, что позже я назвал *теорией конца пути*: квантовую механику рассматривали как Последнюю Революцию в физике, поскольку она достигла внутренних пределов знания. Это на самом деле было действительным содержанием отношений неопределенности. (Мой ответ: они не являются таковыми — это лишь отношения диффузии.)

1932–1936. Некоторые сомнения возникли с появлением первых новых частиц (что на самом деле отметило конец периода, в котором квантовая механика могла рассматривать себя в качестве вершины электромагнитной теории вещества). Эйнштейн ясно увидел абсурдность теории, согласно которой квантовая механика была конечной целью — *была полной*. Это привело к появлению ЭПР (статьи Эйнштейна, Подольского, Розена) и ответа Бора, который подтвердил ее полноту.

1936–1948. Теория конца пути отвергается Паули⁵.

ПУТНАМ

Основная интерпретация квантовой механики, напротив, начинается с допущения того, что *в природе могут возникать только такие экспериментальные ситуации, которые могут быть выражены в терминах математического формализма*⁶.

КАНДИДО

Существует мнение, что процесс измерения является еще одной причиной неполноты квантовой теории.

ПОППЕР

Дискретное уменьшение волновых пакетов, которое нельзя вывести из уравнения Шрёдингера, является . . . следствием перехода от возможного к действительному. Но, конечно же, нельзя, с одной стороны, придерживаться мнения о том, что формализм является полным, а с другой стороны, полагать, что его применение к действительности требует этапа, который может быть из него выведен⁷.

КАНДИДО

Обе точки зрения интерпретируют формализм теории в том смысле, который можно продемонстрировать на следующем примере.

⁵К. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, pp. 15–16.

⁶Н. Putnam, *A philosopher looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed.), *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965.

⁷Н. Putnam, p. 130.

Давайте рассмотрим очень простую систему, например, свободную частицу, квантовое состояние которой определяется только значением местоположения (т. е. максимумом информации о системе, получаемым экспериментально). Предположим, мы измерили положение в момент t и обнаружили, что оно имеет четкое значение. Тогда из предыдущего обсуждения следует, что для любого другого наблюдаемого, не являющегося функцией местоположения, в момент t мы можем определить не точные значения, а только распределение вероятностей этих значений.

На этой стадии можно продолжить рассуждения следующим образом: если квантовая теория является полной, а в момент t она дает точные значения только для наблюдаемых положения, то это означает, что только эти наблюдаемые имеют точные значения, в то время как другие величины в данное время не имеют точных значений, а лишь, так сказать, *потенциальную возможность* принимать такие значения.

Поскольку хорошо определяемые свойства системы соответствуют тому, что некоторые наблюдаемые принимают четкие значения, то, как считают эти авторы, можно сделать вывод, что хорошо определяемые свойства системы зависят от того, какие измерения мы осуществляли в данной системе.

ШИМОНИ

Если квантовое состояние системы является полным описанием системы, то величина, которая имеет неопределенное значение в квантовом состоянии, является объективно неопределенной, ее значение не просто неизвестно ученому, который пытается описать систему⁸.

ПОППЕР

Бор и копенгагенская интерпретация . . . подтвердили, что электрон не может одновременно иметь определенные местоположение и время. Эта догма — ядро тезиса Бора о том, что квантовая теория является полной предположительно в том смысле, что частица не может иметь свойства, которые теория (предположительно) не позволяет измерить⁹.

АКАДЕМУС

Этот тезис принадлежит не только Бору.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

Основная интерпретация квантовой механики, напротив, берет начало с допущения того, что в природе могут возникать только те эксперименталь-

⁸ A. Shimony, *The Reality of the Quantum World*, «Scientific American», January (1988) 36–43.

⁹ K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore, 1984, p. 76.

ные ситуации, которые могут быть выражены в терминах математического формализма¹⁰.

КАНДИДО

Должны ли мы заключить, что физики поэтому *делают вывод*, что все, что недоступно теории, не существует? Таким образом, теория становится *полной*, т. е. она *по определению* описывает все, что существует.

Другими словами, они *постулируют*, что *то, чего они не могут познать, не существует*.

АКАДЕМУС

Из этого, как мы только что видели, следует, что процесс измерения не *фиксирует* значение, а лишь *определяет* его.

Действительно, предположим, мы не знаем, в каком состоянии находится система. Если мы решили произвести измерение ее местоположения в момент t , то мы обнаружим точное значение. Но, согласно постулату реализма, такое точное значение не может зависеть от процедуры измерения. Таким образом, система в момент времени t должна иметь, независимо от измерения, четко определяемое местоположение. Поэтому оно, а также величины, выражаемые как его функции, в соответствии с ранее изложенными доводами, должны быть ее единственными свойствами в данный момент. С другой стороны, если мы решили измерить скорость системы в момент t , то, рассуждая аналогичным образом, мы бы пришли к заключению, что единственными четко определяемыми свойствами системы в данный момент времени являются те свойства, которые выражаются через скорость. Вывод этих авторов поэтому сводится к тому, что решение произвести данное измерение в данный момент определяет, какие свойства система имеет в данный момент.

КАНДИДО

Я думаю, что такие точки зрения основаны на предубеждении, согласно которому, если при определенных экспериментальных условиях вообще невозможно определить значение величины, то это означает, что при этих условиях эта величина не принимает какого-либо значения. Поскольку такую интерпретацию совершенно невозможно вывести из принципа неопределенности, такие выводы абсолютно не обоснованы.

АКАДЕМУС

Некоторые авторы считают квантовую теорию неполной, потому что, описывая явление, она не учитывает, что *элемент реальности* обусловлен точным законом, а заменяет его статистическим соотношением.

¹⁰W. Heisenberg, *Physics and philosophy*, 1958; it. tran. *Fisica e Filosofia*, Milano, 1961, 1982, «Catalogo», p. 55.

КАНДИДО

Сторонники квантовой теории утверждают, что она является полной. Поэтому то, что не описывается этой теорией, — реально не существует. Особенно это касается распада атома, который не может происходить в соответствии с каким-либо точным законом, поскольку теория дает не точное описание этого распада, а лишь статистическое.

АКАДЕМУС

Таким образом, альтернатива, по всей видимости, такова: либо мы соглашаемся с тем, что квантовая теория не является полной, либо мы должны отрицать тот факт, что элементарные процессы (такие как радиоактивность) управляются точными причинными законами.

КАНДИДО

Напротив, некоторые ученые заявляют, что такая альтернатива вызвана неправильным пониманием и использованием термина *полная теория* в отношении квантовой теории, со значением в том смысле, которое приписывается ему в механистических теориях, т.е. объяснение, по крайней мере виртуально, *всех* свойств системы. Поэтому именно статистическая теория не может быть полной с механистической точки зрения. С другой стороны, принцип неопределенности подразумевает, что а priori существуют ограничения на количество информации, которое можно получить с помощью измерений в данный момент на данной системе, и что, в особенности, никакая экспериментальная установка не может отвечать, даже виртуально, за все свойства системы в заданное время.

АКАДЕМУС

В этом контексте термин *полное описание* не может относиться ко всем свойствам системы в данный момент времени (если кто-то хочет, чтобы такое описание было сопоставимо с экспериментом), а только к тем, которые выявляются одновременно, т.е. являются совместимыми. В соответствии с этим значением термина *полнота*, теория действительно может быть полной и статистической: она будет полной (в механистическом смысле), если она ограничена совместимыми наблюдаемыми; но как только значения таких наблюдаемых становятся известны, информация о всех других наблюдаемых, которые не являются их функциями, будет иметь статистический характер. Существование возможных причинных связей между несовместимыми наблюдаемыми не исключается, а лишь ограничивается контекстом тех формулировок, которые не могут быть подвергнуты экспериментальной проверке (следуя Попперу, мы должны были бы сказать *которых нельзя*

экспериментально подделать), и, следовательно, не является предметом исследования физики.

КАНДИДО

Как в механистических, так и в квантовой теории состояние системы однозначно определяется приписыванием значений максимального набора (что означает, что он не может быть расширен нетривиальным образом) независимых совместимых наблюдаемых. Но в случае механистической теории все наблюдаемые являются совместимыми, и поэтому приписывание некоего состояния точно определяет значения всех наблюдаемых системы и, следовательно, все ее свойства. Напротив, в случае квантовой теории приписывание некоего состояния будет определять точные значения класса наблюдаемых и лишь распределения вероятностей значений других величин. В особенности, единственной формой возможного детерминизма в квантовой механике будет являться статистический детерминизм, состоящий в возможности выявления с определенностью распределения вероятностей таких наблюдаемых в некий момент, следующий за данным моментом t' , как функции распределений вероятности таких наблюдаемых в момент t .

Подведем итог: *квантовая теория отрицает не существование законов причинности, а возможность того, что все в этих законах можно получить с помощью экспериментов; она не привносит элемент индетерминизма в законы, которые управляют элементарными процессами, но утверждает неустранимость статистического компонента в нашем описании таких процессов.*

АКАДЕМУС

В то время как мировоззрение, выражаемое механистической программой (или классической теорией поля), включает четкую позицию о типе законов, действующих в природе (точные законы, детерминизм Лапласа, ...), программа, вытекающая из принятия принципа неопределенности, не требует какой-либо определенной позиции в отношении этой темы и ограничивает себя таким состоянием, что нельзя выбрать одну из альтернатив: *хаос подчеркивает необходимость или необходимость подчеркивает хаос* — только на основании экспериментов, а также подвергнуть ее экспериментальной проверке.

Принцип неопределенности, коротко говоря, не утверждает необходимость наличия причинного компонента в законах природы, а лишь в нашем описании законов природы.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

Эйнштейн считает мой способ описания физического мира *неполным*¹¹.

АКАДЕМУС

Давайте остановимся и обобщим ситуацию, когда концептуальная новизна квантовой теории, в сравнении со всеми классическими теориями, заключается во введении состояний суперпозиции. Для системы, находящейся в таком состоянии, квантовая механика может предсказать с определенностью (в смысле приписывания им вероятности 0 или 1) значения *некоторых* наблюдаемых, но для других наблюдаемых она может лишь предсказать вероятность¹².

Согласно ортодоксальной интерпретации, такое описание является *полным* в том смысле, что только те наблюдаемые, значения которых теория может точно предсказать, имеют четко определяемые значения, в то время как те наблюдаемые, для значений которых теория предсказывает только вероятности, имеют лишь виртуальные значения, *объективно неопределяемые*. В этом смысле мы говорим об *объективных вероятностях*, или об *объективной причинности*, в противоположность обычным вероятностям, отражающим лишь незнание таких значений, предположительно существующих и хорошо определяемых независимо от наблюдателя (реализм).

КАНДИДО

Эта точка зрения не делает различий между *полнотой в отношении экспериментально полученной информации* и *полнотой Платона*, т. е. знания бергсоннианского состояния системы. С точки зрения Платона, любая статистическая теория непременно является неполной. В особенности, поскольку квантовая теория принимает принцип неопределенности Гейзенберга, она непременно является статистической теорией (см. разд. III.5) и поэтому неполной с платоновской точки зрения. Коль скоро мы это произнесли, нужно разъяснить значение термина *квантовое состояние*.

АКАДЕМУС

Различные принципы неопределенности будут отличаться друг от друга не только потому, что они относятся к разным наблюдаемым, но и по способу определения того, *каким образом* два наблюдаемых являются несовместимыми (и именно в этой формулировке имеется постоянная Планка). Однако, независимо от способа математического выражения принципа неопределенности, качественное выражение, заданное только формулировкой (I_1), име-

¹¹ W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, 1958, p. 55; it. tran. *Fisica e Filosofia*, Milano, 1961, 1982.

¹² Такие вероятности понимаются здесь как отличные от 0 или 1.

ет несколько важных концептуальных значений. Для того, чтобы тщательно проанализировать эти значения, упомянутые впервые в гл. III, давайте вспомним концепцию полноты набора совместимых наблюдаемых.

Набор совместимых (т.е. измеряемых одновременно с любой точностью) наблюдаемых называется *полным* или *максимальным*, если наблюдаемые данного набора не зависят друг от друга и если информация, содержащаяся в значениях, приписываемых таким наблюдаемым, в данный момент не может быть расширена при сохранении этих свойств без изменений.

Как уже было доказано в разд. III.5, слабая форма принципа неопределенности подразумевает, что теория, принимающая такой принцип, непременно является статистической теорией.

Любое утверждение относительно состояния системы как комплекса всех физических свойств системы в данный момент в контексте принятия принципа неопределенности Гейзенберга (бергсониянское состояние) является ненаучным утверждением с точки зрения Поппера, т.е. экспериментально не фальсифицируемым, даже с помощью идеального эксперимента.

ГЛАВА V

V.1. Вероятностные корни проблем

КАНДИДО

Из того, что до сих пор было сказано, ясно, что проблемы, связанные с другими физическими понятиями, такими как локальность, сепарабельность, дальное действие . . . , возникают из *проблемы объективной реальности*, т. е. из факта принятия таких *виртуальных реальностей*, которые становятся реальными под воздействием наблюдателя. Поэтому причины, заставившие физиков принять такие *виртуальные реальности*, заслуживают того, чтобы их исследовали более тщательно.

ПРОСПЕРИ

. . . Появление так называемых интерференционных членов при выражении вероятности переходов не дает нам возможности приписывать определенной величине значение, не зависящее от того, наблюдается она в данный момент или нет¹.

КАНДИДО

Я согласен с Проспери: все парадоксы квантовой теории происходят вследствие приписывания физической реальности состояниям суперпозиции. Точнее, из-за настаивания на формулировке, что *если система находится в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого, то такое наблюдаемое может принимать только виртуальные значения*.

АКАДЕМУС

С другой стороны, как показали Гейзенберг, Фейнман, . . . введение таких состояний необходимо для того, чтобы объяснить интерференционные полосы, которые являются экспериментальным фактом.

АКАДЕМУС

Я понимаю, что Вы не ставите под сомнение значимость квантовой теории в отношении ее предсказательной силы, а лишь в отношении ее обычной интерпретации. Вы это говорили много раз . . . С другой стороны, аргу-

¹G. M. Proserpi, *Macroscopic physics and the problem of measurement in quantum mechanics*, in *Foundations of Quantum Mechanics*, Varenna IL Corso, 1971, Academic Press, New York.

менты Гейзенберга, Фейнмана, ... основываются только на появлении интерференционных полос, которые можно измерить экспериментально, не обращаясь к математической модели или формулам.

КАНДИДО

Осторожно: здесь различие между математическим формализмом и его интерпретацией гораздо важнее, чем где бы то ни было. Никто не отрицает введения *принципа суперпозиции* в качестве математической формулы. Мы только сомневаемся в том, что нельзя интерпретировать эту формулу, не допуская, что соответствующие наблюдаемые не имеют определенного значения, а имеют только виртуальные.

КАНДИДО

Действительно, из их рассуждений следует, что введение этих *виртуальных реальностей* является *способом* объяснения возникновения интерференционных полос, но из этого не следует, что это единственный способ. Как бы то ни было, поскольку это является сутью вопроса, я полагаю, что большая часть огромного количества литературы по основам квантовой теории посвящена детальному анализу этого *доказательства*.

АКАДЕМУС

Вот в этом Вы совершенно не правы. Помимо ранее упомянутых работ Гейзенберга и Фейнмана, литература, посвященная *доказательству* необходимости утверждения того, что в состоянии суперпозиции *наблюдаемое не может принять какое-либо из своих значений*, практически отсутствует.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что выводы, сделанные на основании этих работ, рассматриваются с тех пор в том виде, в каком были получены, и каждая новая формулировка проблемы начинается с них и принимает их как само собой разумеющееся?

АКАДЕМУС

Именно. Нет смысла возвращаться к вещам, которые уже были многократно доказаны.

КАНДИДО

Но мы видели, что многие не были удовлетворены ранее, да и сейчас также не удовлетворены ортодоксальной интерпретацией. Разве возможно, чтобы они не чувствовали необходимости вернуться назад к истокам, как к историческим, так и концептуальным, этой проблемы?

АКАДЕМУС

Настолько возможно, что это вполне реально: с 30-х гг., т.е. с того времени, когда основные направления ортодоксальной интерпрета-

ции полностью сформировались, реальное существование состояний суперпозиции являлось скорее *предпосылкой*, нежели *предметом* дискуссии.

КАНДИДО

Все это напоминает мне те времена, когда люди говорили о *ipse dixit* (Голосе Самого) и *ipse* был Аристотель. Создается впечатление, что в наше время *ipse* — это Гейзенберг, Бор, Фейнман, ...

АКАДЕМУС

Это не имеет никакого отношения к *ipse dixit*, а относится к *формулировке*; в то время как мы говорим о *доказательстве*. Это совсем другое дело.

КАНДИДО

Что я нахожу удивительным, так это то, что, несмотря на всю важность дискуссии относительно интерпретации квантовой теории, очень мало кто обращался вновь к анализу этого доказательства.

АКАДЕМУС

Дело не в том, что мало кто вновь обращался к нему, в литературе достаточно много примеров анализа эксперимента с двумя отверстиями. Дело в том, что при всем этом изобилии я не вижу никакого прогресса по сравнению с анализом Гейзенберга и Фейнмана... Зачем вновь обращаться к рассуждениям, если Вы убеждены в их правильности?

КАНДИДО

Математики также уверены, что их доказательства верны, и все же они любят приводить несколько различных доказательств наиболее важных и глубоких теорем. Всесторонне обоснованная формулировка похожа на многогранный алмаз: новое доказательство подобно новой оправе драгоценного камня: ценность его повышается, если оно отражает новые, до сих пор не замеченные, стороны.

АКАДЕМУС

Мы, физики, заинтересованы в том, чтобы говорить о новых вещах, а не улучшать старые.

КАНДИДО

В таком случае, Вы отказываетесь перепроверять более тщательно тот анализ, на основании которого физики ввели эти новые состояния материи, ставшие источником множества парадоксов?

АКАДЕМУС

Я не отказываюсь..., а нахожу это бесполезным. Результатом этого анализа стали обычные знания. Они отлично суммированы в высказывании Проспери, приведенном в начале этого раздела.

КАНДИДО

Я помню эту фразу, но для того, чтобы прийти к выводу о том, что *появление интерференционных членов ... предостерегает нас от приписывания определенной величине некоего значения, независимо от того, наблюдаем ли мы ее в настоящее время ...*, существует процесс дедукции, который я хотел бы рассмотреть более подробно.

АКАДЕМУС

И с чего Вы хотели бы начать?

КАНДИДО

Естественно начать с эксперимента с двумя отверстиями и утверждения, что он доказывает необходимость различать две следующие ситуации:

- (I') Частица проходит через одно и только одно из двух отверстий: через первое отверстие с вероятностью $p(1)$, через второе отверстие с вероятностью $p(2)$.
- (II') Частица теряет свою локализацию в пространстве и проходит одновременно через оба отверстия: ее *доля* в отверстии 1 составляет $p(1)$, а в отверстии 2 — $p(2)$.

В случае (I') мы говорим, что частица находится в *смешанном состоянии* (или в смеси); в случае (II') — в *состоянии суперпозиции*. Смерть, шарик рулетки, ... являются смешанными состояниями; состояния суперпозиции не существуют в классической физике, а что-либо значат только в квантовом контексте.

АКАДЕМУС

Мы также видели, что ситуации (I') и (II'), описанные выше для случая с двумя отверстиями, могут быть обобщены и уточнены следующим образом: назовем B наблюдаемую величину данной физической системы, а b_1, b_2, \dots — ее значения. Давайте рассмотрим два случая:

- (I.) Наблюдаемая величина B принимает одно и только одно из своих значений: значение b_1 с вероятностью $p(1)$, значение b_2 с вероятностью $p(2)$, ...
- (II.) Величина B не принимает ни одно из своих значений, а участвует одновременно во всех своих значениях: в значении b_1 доля участия равна $p(1)$, в значении b_2 доля участия равна $p(2)$, ...

В случае (I.) говорят, что система находится в *смешанном состоянии* в отношении величины B ; в случае (II.) говорят, что система находится в *состоянии суперпозиции* в отношении величины B .

КАНДИДО

Важно подчеркнуть, что утверждение (II.) относится к одной частице, одной системе: если в соответствии с наивной интуицией классической физики наблюдаемое B принимает одно и только одно из своих значений, то согласно ортодоксальной школе мы придем к математической формуле, отличающейся от той, которая должна быть в соответствии с принципом суперпозиции. В частности, не будет никаких *интерференционных полос*.

АКАДЕМУС

Интуитивно представить состояние суперпозиции нелегко. Действительно, утверждение (II.) — это просто перевод на повседневный язык точной математической формулы, так называемого *принципа составных амплитуд*². Таким образом, подлинное значение утверждения (II.) заключается в том, что, когда говорят, что частица находится в состоянии суперпозиции, необходимо использовать именно эту специфическую формулу. Поскольку она отличается от формулы, используемой в случае смешанных состояний (которая, как мы увидим позже, соответствует теореме составных вероятностей), делается вывод, что этим двум математическим формулам должны соответствовать две различные физические реальности. То, что обе эти физические реальности действительно возникают в природе, можно подтвердить при сравнении, например, кривых, полученных в эксперименте с двумя отверстиями в двух случаях, когда не было предпринято попытки выяснить, через какое отверстие проходят две частицы, с полученными тогда, когда это выясняется. В первом случае экспериментальная кривая, описывающая вероятность $P(X)$, аналогична кривой на рис. 1, представленном ниже, и очень хорошо согласуется с теоретически ожидаемыми, полученными при использовании математических формул принципа суперпозиции. Во втором случае экспериментальная кривая, описывающая вероятность $P(X)$, аналогична кривой, изображенной на рис. 2, и очень хорошо согласуется с теоретически ожидаемыми,

²Следуя замечаниям Фейнмана, этот принцип может быть выражен математически следующим образом: обозначив через ψ_{xy} вероятностную амплитуду величин x, y , имеем уравнение: $\psi = \sum_b \psi_{ab} \psi_{bc}$, в котором суммированы значения b . Эквивалентом в классической вероятности является *теорема составных вероятностей*: $P_{ac} = \sum_b P_{ab} P_{bc}$, где P_{xy} — вероятность заданных x, y . Используя отношение $P_{xy} = |\psi_{xy}|^2$ и вычитая $\sum_b P_{ab} P_{bc}$ из $|\psi_{ac}|^2$, получаем явную форму пресловутых *интерференционных членов*.

полученными при использовании формул классической теории вероятностей.

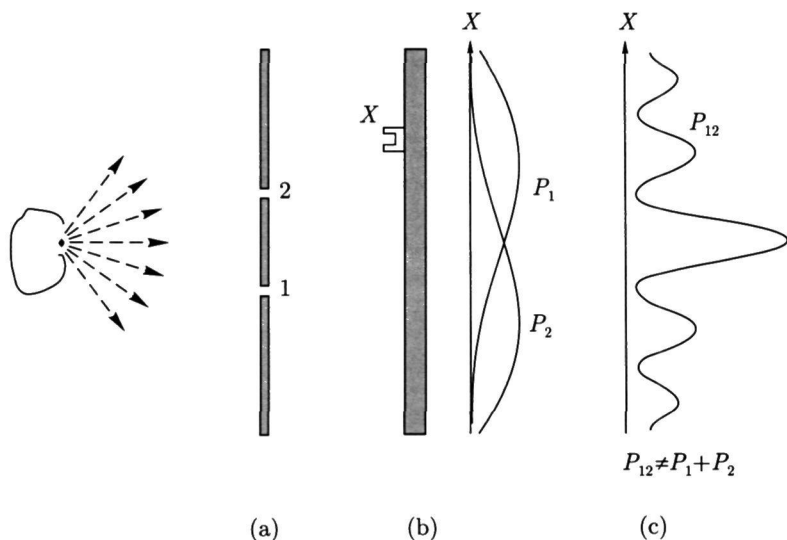


Рис. 1

КАНДИДО

Кроме того, поскольку *наблюдаемые, которых наблюдают*, всегда принимают одно и только одно из своих значений, понятие физической суперпозиции может относиться только к *наблюдаемым, которых не наблюдают*. Состояния, в которых наблюдаемое не принимает какое-либо из своих значений, а виртуально принимает их все, но с различной *потенциальной возможностью*, экспериментально не наблюдаются, они являются теоретическими моделями, введенными для того, чтобы избежать противоречий, подобных тем, что описаны в разд. II.6.

АКАДЕМУС

Для того, чтобы примирить тот факт, что экспериментальные данные ясно показывают, что наблюдаемые принимают одно и только одно из своих значений, с понятием физической суперпозиции, ортодоксальная школа прибегает к понятию *коллапса (или разрушения) волнового пакета*.

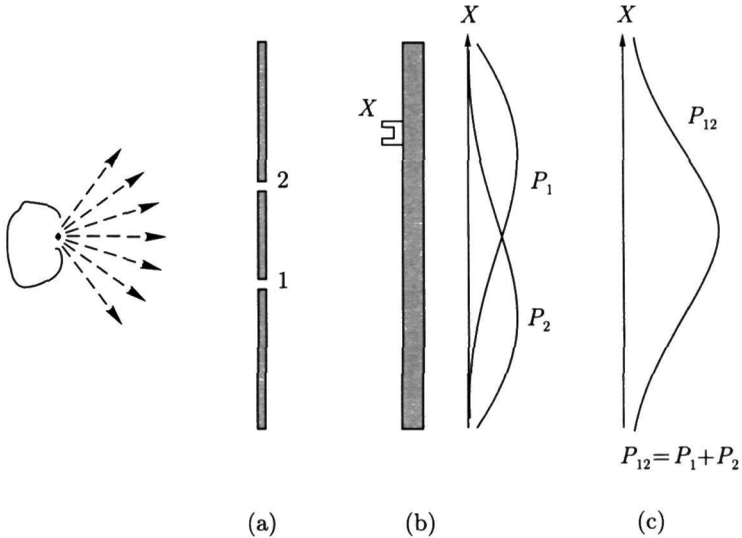


Рис. 2

КАНДИДО

Думаю, это означает, что в коллапсе можно различить две стадии:

— взаимодействие между системой и измерительным прибором, во время которого система переходит из *состояния суперпозиции (чистого)* в *смешанное состояние* (в котором наблюдаемое имеет четкое значение, но мы не знаем, какое именно);

— считывание показаний прибора, во время которого система переходит из смешанного состояния в чистое состояние, а именно в состояние, которое соответствует значению наблюдаемого, полученному во время измерения.

АКАДЕМУС

Первая стадия наиболее хрупкая: когда система находится в смешанном состоянии, ситуация возвращается к уже известной ситуации рулетки или игральных костей: мы знаем, что возникла только одна из ряда взаимоисключающих альтернатив, и мы знаем вероятность каждой из них.

КАНДИДО

Думаю, нельзя отрицать утверждение, что все проблемы интерпретации квантовой теории происходят из нижеперечисленных пунктов, утверждение, которому я, как и Фейнман, тоже хочу дать название, поскольку в

дальнейшем мы будем на него ссылаться: мы назовем его *утверждением С* (С от collapse — коллапс).

УТВЕРЖДЕНИЕ С

Существует новый тип физического состояния материи, которое называется состоянием суперпозиции и имеет следующие свойства.

В состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого А это наблюдаемое на самом деле не может принимать ни одно из своих значений.

Только процесс измерения вызывает коллапс физического состояния, так что наблюдаемое А принимает одно и только одно значение.

Этот коллапс (или разрушение) волнового пакета относится к реальному изменению физического состояния системы, а не только нашего знания о ней.

АКАДЕМУС

Это то, чему учат каждого студента, изучающего квантовую теорию.

КАНДИДО

Не думаю, что это еще долго будут преподавать . . .

АКАДЕМУС

Я не согласен с тем значением, которое Вы приписываете *утверждению С*. Оно касается только проблемы объективной реальности, в то время как наиболее глубокие проблемы, связанные с интерпретацией квантовой теории, касаются нелокальности, несепарабельности и существования *сцепленных состояний* между различными системами . . .

КАНДИДО

Новая теория, которая развивалась в течение последних пятнадцати лет, *квантовая вероятность*, заявляет, что она может доказать, что то, что Вы цитируете, просто является следствием *утверждения С*. Другими словами, эти проблемы, связанные с физическими понятиями, такими как локальность, сепарабельность, дальнеедействие . . . , происходят из отставания *реального существования* этих *виртуальных реальностей*, которые должны стать реальными под воздействием наблюдателя.

АКАДЕМУС

Если бы это было правдой, нужно было бы заключить, что в течение многих лет дискуссия об основах была сфокусирована на выводах, а не на исследовании корней этой проблемы.

КАНДИДО

Давайте оставим социологическую подоплеку и сосредоточимся на научном и концептуальном аспектах проблемы.

Допустим, мы принимаем *утверждение С*, т. е. то, что в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого *A* наблюдаемое *A* не может в действительности принимать одно из своих значений и что только сам процесс измерения вызывает разрушение (коллапс) физического состояния системы, так что наблюдаемое *A* принимает одно и только одно из своих значений.

АКАДЕМУС

Я удовлетворен теми доказательствами этого утверждения, которые обсуждали Фейнман и Гейзенберг... Напротив, квантовая вероятность утверждает, что она способна доказать, что три типа парадоксов, с которыми мы уже сталкивались, а именно:

- парадоксы типа *эксперимента с двумя отверстиями* (положение ненаблюдаемого электрона рассредоточено в доступном физическом пространстве);
- парадоксы типа ЭПР (измерение, осуществляемое в данном месте, вызывает изменение физической реальности в другом месте);
- парадоксы *макроскопического микроскопического* типа или, более неформально, парадоксы типа *кошки Шрёдингера* являются просто следствием принятия *утверждения С*.

КАНДИДО

Для начала отметим, что наличие состояния суперпозиции является общей чертой всех трех типов парадоксов:

- в первом случае имеет место суперпозиция между состояниями, которые описывают прохождение частиц через два отверстия;
- во втором случае имеет место суперпозиция между состояниями, описывающими спин системы, состоящей из двух частиц, в любых двух направлениях;
- в третьем случае имеет место суперпозиция между живой и мертвой кошкой.

Кроме того, очевидно, что парадокса не было бы, если бы мы ограничились таким состоянием, когда *мы не знаем*, через какое отверстие прошел электрон, каково значение спина в данном направлении, кошка — живая или мертвая... и что, следовательно, все это описано с вероятностной точки зрения.

АКАДЕМУС

Это правда, но в этом нет ничего нового. Каждый знает, что только при наличии состояний суперпозиции можно подчеркнуть неклассическое поведение вещества. Каждый знает, что если бы было возможно использовать классическое вероятностное описание, то не было бы проблем. И каждый

знает, что применение такого описания невозможно, поскольку это ведет к противоречию с экспериментами, например, с экспериментом с двумя отверстиями.

КАНДИДО

Забавно, что каждый раз, когда Вы хотите обратиться к какому-либо *доказательству*, Вы вспоминаете эксперимент с двумя отверстиями. Очевидно, *repetita iuvant* (повторение помогает)... Однако помните, что я все еще жду от вас демонстрации *доказательства*, которое не являлось бы просто вариантом аргумента с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Вы его получите, когда мы будем говорить о Белле.

КАНДИДО

Вы действительно уверены, что аргумент Белла не является вариантом эксперимента с двумя отверстиями?

АКАДЕМУС

Что Вы говорите? Как Вы можете так думать?

КАНДИДО

Мы будем говорить об этом в надлежащем месте. Как бы то ни было, мы можем согласиться с тем, что если бы можно было найти ошибку в доказательстве утверждения:

в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого А наблюдаемое А не может не самом деле принимать ни одно из своих значений, тогда больше не было бы необходимости настаивать на *физической реальности* состояний суперпозиции. Поэтому так называемые *парадоксы* квантовой теории, созданные при помощи вариаций на тему *разрушения волнового пакета*, автоматически исчезнут.

АКАДЕМУС

Я понял, что с помощью квантовой вероятности хотели бы доказать, что электрон имеет четкое положение, даже если его не наблюдают, тогда даже в синглетном состоянии спины или поляризация будут иметь четкие значения...

Но со времен Хьюма известно, что такое доказательство невозможно. Кроме того, со времен Бора также известно, что это бесполезно, потому что физика больше не интересуется тем, *что происходит тогда, когда никто не наблюдает.*

КАНДИДО

Я на это смотрю иначе, т. е. полагаю, что с помощью квантовой вероятности не пытаются доказать, что ненаблюдаемый электрон имеет определенное

положение, а показывают только то, что *доказательство, сформулированное Фейнманом, Гейзенбергом и другими их последователями того, что он не может иметь определенное положение*, — не верно. В течение ряда лет говорилось, что квантовая теория заставляет вводить эти новые физические состояния материи, состояния суперпозиции. Квантовая вероятность утверждает, что *единственное* существующее доказательство этой необходимости **не верно**.

АКАДЕМУС

Но Фейнман не может ошибаться в доказательстве . . . , кроме того, Вы тоже видели, что доказательство, о котором мы говорим, совершенно элементарно, почти тривиально.

КАНДИДО

Существуют ошибки, которые может сделать любой, и существуют ошибки, связанные с историческими предрассудками человечества, которые могут сделать только специалисты. Люди, которые пытались прояснить непонятные проблемы, выявляли их суть и фокусировали на них внимание других людей. *Ошибки* такого рода в тысячу раз полезнее для прогресса в области знания, чем сотни страниц, заполненных формально правильными, но неуместными с точки зрения их содержания утверждениями.

АКАДЕМУС

Хотелось бы взглянуть на такую ошибку.

КАНДИДО

Давайте начнем прямо с эксперимента с двумя отверстиями.

Я помню, что эксперимент описывает источник S , испускающий частицы (например, электроны или фотоны), которые отфильтровываются экраном Σ_1 , имеющим два отверстия, и собираются на другом экране Σ_2 . Эксперимент осуществляется в трех различных физических условиях:

- a) отверстие 2 закрыто, а отверстие 1 открыто, частицы *приготовлены* для прохождения через отверстие 1;
- b) отверстие 1 закрыто, а отверстие 2 открыто, частицы *приготовлены* для прохождения через отверстие 2;
- c) оба отверстия открыты, частицы *не приготовлены* для прохождения только через одно отверстие.

Предполагается, что все частицы испускаются в одном и том же (квантовом) состоянии, и спрашивается, какова вероятность того, что частица будет находиться в области X на экране Σ_2 .

АКАДЕМУС

Я полагаю, что под вероятностями понимается, как это всегда бывает в физике, ожидание относительных частот, которые, в нашем случае, равны количеству частиц, пришедших в область X , деленному на количество частиц, пришедших на Σ_2 .

КАНДИДО

Именно так: теория позволяет *предсказать относительные частоты*; а эксперименты предоставляют *реальные относительные частоты*. Если теория хороша, то предсказания близки к реальности.

АКАДЕМУС

Но тогда, строго говоря, мы должны различать *теоретические вероятности* — вероятности, предсказываемые теорией, и *экспериментальные вероятности*, т. е. *действительно наблюдаемые относительные частоты*.

КАНДИДО

Это хорошее замечание. Давайте тогда назовем

$$P_{\text{exp}}(X | 1), \quad P_{\text{exp}}(X | 2), \quad P_{\text{exp}}(X) \quad (\text{V.1.1})$$

— аппроксимированные относительные частоты прибытия в область X в случаях (а), (b), (с) соответственно и назовем

$$P_{\text{theor}}(X | 1), \quad P_{\text{theor}}(X | 2), \quad P_{\text{theor}}(X) \quad (\text{V.1.2})$$

соответствующими вероятностям, предсказанными теорией. $P_{\text{exp}}(X | 1)$ (соответственно $P_{\text{theor}}(X | 2)$) интерпретируется как условная вероятность того, что частица прибывает в X , если известно, что она проходит через отверстие 1 (соответственно 2).

АКАДЕМУС

Что вы имеете в виду, говоря об *условной вероятности того, что частица прибывает в область X , если известно, что она проходит через отверстие 1*?

КАНДИДО

Когда мы говорим об условной вероятности, то всегда подразумеваем следующее: я знаю наверняка, что частица проходит через отверстие 1 и, задав такое *условие*, я предсказываю относительную частоту прибытия в область X .

АКАДЕМУС

Но тогда, если все так же, как и в теоретической вероятности, и теория хороша, то мы должны получить, по крайней мере в пределах границ аппроксимации экспериментальных ошибок (хотя в этом случае они очень

малы)

$$P_{\text{exp}}(X) = P_{\text{exp}}(1)P_{\text{exp}}(X | 1) + P_{\text{exp}}(2)P_{\text{exp}}(X | 2), \quad (\text{V.1.3})$$

где $P_{\text{exp}}(1)$ и $P_{\text{exp}}(2)$ обозначают соответственно относительные частоты прохождений через отверстие 1 или отверстие 2.

КАНДИДО

Почему вы так уверены, что соотношение (V.1.3) верно?

АКАДЕМУС

Да потому, что это простое доказательство Фейнман описывает много раз! Даже тот, кто совершенно не знает математики, может понять это: соотношение

$$P_{\text{theor}}(X) = P_{\text{theor}}(1)P_{\text{theor}}(X | 1) + P_{\text{theor}}(2)P_{\text{theor}}(X | 2) \quad (\text{V.1.4})$$

является одной из наиболее известных формул классической вероятности. Настолько известной, что она даже имеет название и называется *теоремой составных вероятностей*. Если проводятся эксперименты, описанные выше, (а), (б), (с), то мы находим, что относительные частоты прибытий в область X , происходящих в трех случаях, т. е. то, что мы называем *экспериментальными вероятностями*, очень хорошо аппроксимированы теоретическим вероятностям $P_{\text{theor}}(1)$, $P_{\text{theor}}(2)$, $P_{\text{theor}}(X | 1)$, $P_{\text{theor}}(X | 2)$, $P_{\text{theor}}(X)$, предсказано квантовой теорией.

Но, если (V.1.4) верно и вероятности в (V.1.4) правильно аппроксимированы экспериментальными данными, это означает, что равенство (V.1.3), выведенное из (V.1.4) путем замены теоретических вероятностей на экспериментальные, будет верно с очень хорошей аппроксимацией. Напротив, оказывается, что оно никогда не выполняется (и это происходит независимо от выбора вероятностей $P(1)$ или $P(2)$ и, возможно, независимо от того, являются они теоретическими или экспериментальными).

КАНДИДО

Ваш аргумент — это более точный вариант аргумента Фейнмана. В частности, Ваша формула (V.1.3) является математическим выражением его утверждения, приведенного в разд. II.1, согласно которому кривую можно рассматривать как сумму двух составляющих. Поэтому очевидно, что вы пришли к тому же выводу.

АКАДЕМУС

Противоречия между теорией и экспериментами кажутся очевидными, как это видно из рис. 1 и 2, которые мы обсуждали совсем недавно. На обоих

графиках экраны уменьшены настолько, чтобы передать их суть — до вертикальных осей; на горизонтальной оси находятся вероятности; область X определяется точкой на экране. На рис. 1 три кривые (а), (b), (с) соответственно описывают, каким образом вероятности

$$P_{\text{exp}}(X | 1), \quad P_{\text{exp}}(X | 2), \quad P_{\text{exp}}(X) \quad (\text{V.1.5})$$

изменяются при изменении положения точки X на экране.

На рис. 2 мы имеем то же самое для теоретических вероятностей

$$P_{\text{theor}}(X) = \frac{1}{2}P_{\text{theor}}(X | 1) + \frac{1}{2}P_{\text{theor}}(X | 2). \quad (\text{V.1.6})$$

Как видим, для двух первых кривых теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются. Напротив, для третьей кривой различие таково, что оно не может быть обусловлено ошибками измерения.

АКАДЕМУС

Анализ квантовой вероятности ведет поэтому к тому же выводу, который был сделан и Фейнманом: ход наших рассуждений для обоснования правильности выражения (V.1.1) зиждется на ничем не обоснованном допущении.

КАНДИДО

Этот вывод тот же самый. Нам, однако, все еще нужно идентифицировать данное допущение. Для того, чтобы это сделать, давайте проанализируем все этапы рассуждений, ведущих к заключению, при котором *должно* иметь место (V.1.3).

Этап 0. Отразим тот факт, что каждая частица, попадающая на экран Σ_2 , должна была пройти либо через отверстие 1, либо через отверстие 2, с помощью равенства:

$$1 \cup 2 = I \quad (\text{тривиальное событие}), \quad (\text{V.1.7})$$

а тот факт, что она не могла пройти через оба отверстия одновременно, равенством:

$$1 \cap 2 = \emptyset \quad (\text{невозможное событие}). \quad (\text{V.1.8})$$

Этап I. Символ $(X \cap 1)$ означает *совместное событие*, согласно которому частица прибывает в область X и проходит через отверстие 1. Символ $(X \cap 2)$ означает то же самое. Отношения

$$X = (X \cap 1) \cup (X \cap 2), \quad (\text{V.1.9a})$$

$$\emptyset = (X \cap 1) \cap (X \cap 2) \quad (\text{V.1.9b})$$

выражают тот факт, что частица приходит в область X , проходя либо через отверстие 1, либо через отверстие 2 ((V.1.9a)), но она не может прийти, пройдя через оба отверстия ((V.1.9b)). Это следует из (V.1.7) и (V.1.8) при использовании известного закона классической логики (так называемый *дистрибутивный закон* де Моргана).

Этап II. Соотношения (V.1.7), (V.1.8), (V.1.9) и тот факт, что вероятности несовместных событий суммируются, означает, что:

$$P(X) = P(X \cap 1) + P(X \cap 2), \quad (\text{V.1.10a})$$

$$1 = P(1) + P(2). \quad (\text{V.1.10b})$$

Этап III. *Совместные вероятности*

$$P(X \cap 1), \quad P(X \cap 2)$$

связаны с *условными вероятностями*

$$P(X | 1), \quad P(X | 2)$$

соотношением Байеса:

$$P(X | 1) = \frac{P(X \cap 1)}{P(1)}, \quad (\text{V.1.11a})$$

$$P(X | 2) = \frac{P(X \cap 2)}{P(2)}. \quad (\text{V.1.11b})$$

Этап IV. Умножая и деля на то же самое число, мы можем написать (V.1.10a) в форме:

$$P(X) = P(1) \frac{P(X \cap 1)}{P(1)} + P(2) \frac{P(X \cap 2)}{P(2)}. \quad (\text{V.1.12})$$

Используя соотношения (11), преобразуем последнее равенство:

$$P(X) = P(1)P(X | 1) + P(2)P(X | 2). \quad (\text{V.1.13})$$

Этап V. На всех предыдущих этапах под вероятностями мы подразумевали теоретические вероятности. Экспериментальные данные, напротив, доказывают, что

$$P_{\text{exp}}(X) \neq P_{\text{exp}}(1)P_{\text{exp}}(X | 1) + P_{\text{exp}}(2)P_{\text{exp}}(X | 2). \quad (\text{V.1.14})$$

Вывод: поскольку эксперименты противоречат (V.1.13) и поскольку четыре этапа, которые привели к нему, просто согласуются с математической точки зрения, мы должны заключить, что по крайней мере один из этих этапов основан на допущении, противоречащем опыту.

АКАДЕМУС

Если соотношения (V.1.10) и (V.1.11) приняты, то с помощью тривиального математического преобразования мы можем получить (V.1.12). Поэтому на этапе IV не нужны никакие допущения. *Скрытая гипотеза может относиться только к одному из этапов: 0, I, II, III.*

КАНДИДО

Интересно отметить, что все интерпретации квантовой теории можно классифицировать в соответствии с одним из четырех этапов, перечисленных выше, и каждый из них выявляет причину различия между теоретическими и экспериментальными данными.

АКАДЕМУС

Это доказывает, что Фейнман был прав: действительно, эксперимент с двумя отверстиями *содержит в себе все загадки квантовой теории.* Этому стоит уделить немного времени.

V.2. Ортодоксальное решение

ФЕЙНМАН

... Исходя из логических рассуждений, мы пришли к выводу, что поскольку $P \neq P_1 + P_2$, то не верно предположение, что электрон проходит либо через отверстие 1, либо через отверстие 2...³

КАНДИДО

Поскольку соотношение $P \neq P_1 + P_2$ — это то же выражение, что и (V.1.13) в записях Фейнмана, это означает, что уравнения (V.1.7) и (V.1.8) на этапе 0 с физической точки зрения не обоснованы: другими словами, нельзя утверждать, что электрон проходит через одно и только одно отверстие.

АКАДЕМУС

Такая точка зрения кажется мне вполне приемлемой: то, что мы называем электроном, является довольно сложным объектом. Первые эксперименты, которые были осуществлены с помощью этого объекта, позволили предположить, что он ведет себя в соответствии с интуитивной идеей, имеющейся у нас в отношении частиц, и это подтвердило тот факт, что для

³R. P. Feynman, *The concept of probability in quantum mechanics*, in II-d Berkeley Symp. on Math. Stat. and Prob.; Univ. of California Press, Berkeley, Los Angeles (1951), 533–541, p. 536.

того, чтобы интуитивно представить поведение электрона, мы экстраполировали на микроскопический мир обычное для нас поведение шариков и других макроскопических объектов. Неравенство (V.1.14) является как раз экспериментальным доказательством того факта, что такая экстраполяция не обоснована, и поэтому, в частности, соотношения (V.1.7) и (V.1.8), на которых основаны все остальные рассуждения, также не обоснованы.

КАНДИДО

Представлять электрон в виде жесткого и неделимого шара, конечно же, очень наивно. Но в Вашей аргументации подразумевается наличие предпосылки, т. е. если равенства (V.1.7) и (V.1.8) были справедливы (т. е. если электрон действительно прошел через одно и только через одно из двух отверстий), то все последующие этапы анализа были бы тоже справедливы, и, в особенности, будет справедливо равенство (V.1.12).

АКАДЕМУС

Но следующие этапы настолько просты, что кажется, будто они являются всего лишь комбинаторной или логической тавтологией. Который из них должен быть неверным?

КАНДИДО

Мы это увидим, но давайте сначала подытожим выводы, вытекающие из ортодоксальной интерпретации.

АКАДЕМУС

Думаю, что это бесполезно, поскольку мы их уже рассматривали в разд. II.1 и V.2.

КАНДИДО

Возможно, кто-нибудь забыл их. Однако достаточно сказать, что все удавшиеся эксперименты подтверждают допущение, что все эти события:

1 = частица прибывает в Σ_2 , проходя через отверстие 1,

2 = частица прибывает в Σ_2 , проходя через отверстие 2

исключают друг друга и исчерпали все возможности.

АКАДЕМУС

Всем известно, что для того, чтобы *определить*, через какое из двух отверстий в Σ_1 проходит частица, необходимо установить прибор, например, источник света S между двумя экранами. Но взаимодействие с этим аппаратом вызывает *нарушения* в поведении частицы, что портит интерференционные полосы.

КАНДИДО

Но до сих пор мы говорили о вероятности. Каково происхождение этих интерференционных полос?

АКАДЕМУС

Это просто разные способы говорить об одном и том же. Вы конечно помните, что основной вывод из эксперимента с двумя щелями заключается в том, что экспериментальная вероятность $P_{\text{exp}}(X)$ отличается от теоретической $P_{\text{theor}}(X)$. Можно доказать, используя формулы квантовой теории, что различие

$$P_{\text{exp}}(X) - P_{\text{theor}}(X) \quad (\text{V.2.1})$$

между теоретическими вероятностями (согласно классической теории вероятностей) и экспериментальными вероятностями выражается как сумма различных элементов. Это и есть те самые знаменитые *интерференционные члены*. Именно они обуславливают пики и плато, которые мы видим на рис. 2.

КАНДИДО

Но тогда разрушение интерференционных полос, т. е. процесс измерения, также может быть описано в терминах вероятности.

АКАДЕМУС

Верно. Этого достаточно, чтобы назвать

$$P_{\text{exp}}(X | 1 \cap S), \quad P_{\text{exp}}(X | 2 \cap S), \quad P_{\text{exp}}(X | S)$$

экспериментальными относительными частотами, полученными в эксперименте, в котором источник света находится между двумя экранами. Говорить о *нарушении интерференционных полос* все равно что говорить, что эти новые экспериментальные данные соответствуют теореме составных вероятностей, т. е. соотношению (V.1.12).

Другими словами:

$$P_{\text{exp}}(X | S) = P_{\text{exp}}(1 \cap S)P_{\text{exp}}(X | 1 \cap S) + P_{\text{exp}}(2 \cap S)P_{\text{exp}}(X | 2 \cap S). \quad (\text{V.2.2})$$

КАНДИДО

Таким образом, построив кривые, соответствующие этим вероятностям, мы должны получить три кривые, аналогичные тем, которые представлены на рис. 2.

АКАДЕМУС

Действительно, получены *точно* такие же три кривые, что и на рис. 2.

КАНДИДО

Но если все эти свойства легко и непосредственно выражаются с помощью формул для вычисления вероятностей, которые очень давно и хорошо

известны, почему физики создали такой непонятный и завуалированный жаргон? Почему они не говорят *правильность теоремы составных вероятностей* вместо *разрушение (коллапс) волнового пакета* или, еще хуже, *объективизация*? Почему они говорят о виртуальной реальности, об отходе от классических концепций, ... вместо *несостоятельность теоремы составных вероятностей*?

АКАДЕМУС

Я не знаю, что ответить.

КАНДИДО

То, о чем Вы говорите, означает, что если производится эксперимент для того, чтобы выяснить, через какое отверстие прошла частица, тогда

$$P(1 | S) = P(2 | S) = \frac{1}{2}, \quad (\text{V.2.3})$$

т. е. частицы проходят с одинаковой вероятностью через любое отверстие. Более того, вероятности прибытия в область X изменены таким образом, что выполняется теорема составных вероятностей:

$$P(X | S) = \frac{1}{2}P(X | 1 \cap S) + \frac{1}{2}P(X | 2 \cap S). \quad (\text{V.2.4})$$

АКАДЕМУС

Справедливость теоремы составных вероятностей в данном случае очевидна, поскольку условные относительные частоты, полученные в эксперименте, когда источник света установлен между двумя экранами, нельзя получить, закрыв одно из отверстий, а возможно только при простом подсчете, сколько частиц прошло через отверстие 1 и сколько через отверстие 2. Экспериментальные относительные частоты не были получены в трех различных экспериментах, а только при объединении тремя различными способами данных одного эксперимента. Следовательно, (V.2.4) **не выражает какое-либо физическое свойство, а только комбинаторную тождественность.**

КАНДИДО

Если новый эксперимент рассматривается независимо от предыдущих, то, что вы говорите, верно. Но если, как Вы утверждали всего минуту тому назад, кривые вероятности, *полученные* в новом эксперименте с источником света, расположенном между двумя экранами, совпадают с кривыми, построенными на основании классической вероятности для старого эксперимента, без источника света, то нужно заключить, что нарушения, вызываемые прибором S , меняют распределение вероятностей $P(X)$, полученное,

когда оба отверстия открыты, — но не условные распределения $P(X | 1)$ и $P(X | 2)$ — полученные, когда одно отверстие закрыто.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что мы имеем:

$$P(X) \neq P(X | S), \quad (\text{V.2.5})$$

хотя

$$P(X | 1) = P(X | 1 \cap S); \quad P(X | 2) = P(X | 2 \cap S). \quad (\text{V.2.6})$$

Это именно то, что происходит на самом деле. Фейнман тоже говорит об этом в своей знаменитой статье⁴.

КАНДИДО

Я не понимаю, почему, согласно неравенству (V.2.5), нарушения, вызванные взаимодействием с источником света, вызывают разное поведение *наблюдаемого электрона* (т. е. в присутствии S) и *ненаблюдаемого электрона*, если два отверстия открыты. Однако, в соответствии с равенством (V.2.6), нет различий в поведении электронов, если открыто *только одно* отверстие.

АКАДЕМУС

Согласно Фейнману, это — экспериментальный факт.

КАНДИДО

Таким образом, при наличии *возмущений* правила классической вероятности (в нашем случае — теорема составных вероятностей) применимы, в то время как при невозмущенном поведении частиц (в отсутствие прибора S) эти правила не применимы.

АКАДЕМУС

Это обычная роль *возмущения* во всей ортодоксальной интерпретации квантовой теории измерений: в только что рассмотренном нами случае возмущение нарушает квантовое поведение (интерференционные полосы) и вызывает классическое поведение (справедливость теоремы составных вероятностей).

В общем случае происходит то же самое: возмущение, вызванное измерением, разрушает (обычно квантовое) состояние суперпозиции и вынуждает наблюдаемое принимать одно и только одно из своих значений, как в классическом случае.

⁴The concept of probability in quantum mechanics, in Proc. II-d Berkeley Symp. on Math. Stat. and Prob.; Univ. of California Press, Berkeley, Los Angeles (1951) 533–541, p. 537.

КАНДИДО

Я вижу разницу между тем, что Вы называли *общим случаем*, и случаем эксперимента с двумя отверстиями: в первом случае Вы говорили о применимости и о неприменимости правила вычисления классической вероятности (теорема составных вероятностей); это утверждение о *способе описания природы*. Во втором случае Вы говорили о том, что *наблюдаемое принимает одно и только одно из своих значений*, а это уже заявление в отношении самой природы.

АКАДЕМУС

Но мы доказали, что первое влечет за собой второе: должна существовать физическая причина для того, чтобы теорема составных вероятностей, которая всегда выполняется в макроскопическом мире, была невыполнима в микроскопическом мире. Поскольку эта теорема является следствием принятой идеи о том, что электрон проходит через одно и только одно из двух отверстий, делается вывод, что поведение электрона не может быть таковым.

КАНДИДО

Строго говоря, вывод ортодоксальной интерпретации состоит в том, что *ненаблюдаемые* частицы не могут проходить через одно и только одно из двух отверстий.

Действительно, экспериментальные данные показывают, что *наблюдаемые* частицы ведут себя так, как нам подсказывает наша интуиция.

ФЕЙНМАН

... Если не предпринято никаких попыток для того, чтобы определить, через какое отверстие проходит электрон, нельзя сказать, что он должен пройти через любое отверстие⁵...

КАНДИДО

Однако я думаю, что последнее замечание заставило нас сделать важный шаг вперед: теперь ясно, где находится *экспериментальное доказательство* необходимости отрицать, что ненаблюдаемый электрон может иметь те же физические свойства, что и наблюдаемый электрон (например, локализацию в пространстве): если он прошел через одно и только одно отверстие, теорема составных вероятностей должна выполняться; экспериментальные данные, напротив, показывают, что это не так.

АКАДЕМУС

Не понимаю, почему Вы говорите о *важном шаге вперед*. Мне кажется, что Вы просто выразили более эмоционально то, что сказал Фейнман в

⁵R. P. Feynman, *The concept of probability in quantum mechanics*, in Proc. II-d Berkeley Symp. on Math. Stat. and Prob.; Univ. of California Press, Berkeley, Los Angeles (1951) 533-541, p. 538.

разд. II.1: он говорил о *кривых, которые должны являться результатом суммирования, но таковыми не являются*, а Вы говорите о *теореме составных вероятностей*. Суть не изменилась.

КАНДИДО

Шаг вперед должен состоять в том, что если раньше мы все вместе с Фейнманом были уверены в том, что некоторые кривые должны были являться результатом суммирования, то теперь мы понимаем, что эта идея основана на применении математических формул: *теоремы составных вероятностей*.

Но *математические формулы не могут применяться без разбора: необходимо всегда точно определять условия их применения и затем каждый раз уточнять, что эти условия выполняются*.

Таким образом, если бы кто-то доказал, что в эксперименте с двумя отверстиями условия для применения теоремы составных вероятностей отсутствуют, ортодоксальная интерпретация потеряла бы свое свойство логической и экспериментальной необходимости.

АКАДЕМУС

Вы подразумеваете, что аргумент Фейнмана не устоит, потому что во время его доказательства он использует допущение, которое не собирался делать?

КАНДИДО

Насколько я понял, это — критика утверждения ортодоксальной интерпретации о *доказанности* физического существования состояний суперпозиции.

АКАДЕМУС

Такой критики много. Например, существует позиция квантовой логики.

V.3. Решение квантовой логики

КАНДИДО

Существует объяснение эксперимента с двумя отверстиями, альтернативное ортодоксальному, предложенное *квантовой логикой*. В чем оно заключается?

АКАДЕМУС

Это можно суммировать следующим образом: квантовая логика признает значимость этапа 0 анализа в разд. V.1, но выявляет слабый момент в анализе на этапе 1. Последний действительно требует использования так называемого *дистрибутивного закона классической логики*.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что, согласно квантовой логике, положения квантовой теории не сочетаются с правилами классической логики, и, в частности, дистрибутивный закон не важен для этих положений?

АКАДЕМУС

Именно так.

КАНДИДО

Но в эксперименте с двумя щелями применение дистрибутивного закона классической логики эквивалентно утверждению о том, что для того, чтобы достигнуть области X , частица должна пройти только через отверстие 1 или 2, и она прошла либо через отверстие 1, либо через отверстие 2. Квантовая логика действительно отрицает это?

АКАДЕМУС

Не думаю, что это еще больший бред, чем идея о том, что ненаблюдаемых частиц нигде нет. Эта теория была впервые предложена двумя знаменитыми математиками Биркхоффом и фон Нейманом в 1937 г. С тех пор на эту тему были написаны сотни статей.

КАНДИДО

Как могли Биркхофф и фон Нейман думать о чем-либо подобном?

АКАДЕМУС

Они применили часто используемую схему взаимного общения между физикой и математикой: для того, чтобы объяснить некоторые экспериментальные данные, была построена математическая модель: иногда основываясь на свойствах математической модели, выдвигают новые идеи в отношении физического явления.

В случае Биркхоффа и фон Неймана в математической модели предложили соответствие один к одному между положениями квантовой теории и определенными математическими объектами, называемыми *ортогональными проекторами*. Авторы обнаружили, что с помощью проекторов можно определить некоторые математические операции, аналогичные *логическим связкам*. Аналогичные, но не те же самые, однако эти новые логические связки на самом деле имели только *некоторые* из свойств обычных логических связок. В частности, они не подчиняются дистрибутивному закону. Согласно им, положения квантовой теории сочетаются не в соответствии с правилами, используемыми основными логическими связками классической логики, а по правилам, установленным математическими операциями над ортогональными проекторами. Исходя из того, что такие правила нарушают дистрибутивный закон, они делают вывод, что, говоря о квантовых явлении-

ях, некорректно применять такой закон. Вот почему квантовая логика идентифицирует слабое место анализа этапа I в эксперименте с двумя щелями.

КАНДИДО

Но тогда легко проверить с помощью эксперимента значимость дистрибутивного закона: достаточно рассмотреть два положения — *A* и *B*, экспериментально проверить их связь (как *A*, так и *B* верны) или отсутствие связи (либо *A*, либо *B*, либо оба верны) и, повторяя эксперимент несколько раз для разных положений, выяснить, сочетаются ли они по правилам классической логики или по правилам, установленным квантовой логикой.

АКАДЕМУС

Дело в том, что каждый раз, когда можно осуществить такую проверку, результаты подтверждают правильность классической логики.

КАНДИДО

Вы полагаете, что положения, касающиеся наблюдаемых объектов, подчиняются всем правилам классической логики?

АКАДЕМУС

Таковы результаты экспериментов.

КАНДИДО

Но ситуация аналогична той, которую мы встречаем в анализе ортодоксальной интерпретации: правила квантовой логики можно применить только к формулировкам, касающимся ненаблюдаемых объектов. Поэтому эта попытка решить проблемы, связанные с интерпретацией квантовой теории, выходит за рамки галилеевой науки, так как она вносит формулировки, которые в принципе нельзя экспериментально проверить.

АКАДЕМУС

Решение, предложенное квантовой логикой, с одной стороны, открыто для любой критики, направленной на ортодоксальную логику, с другой стороны, заставляет нас отбросить не обычную интуицию физической реальности, согласно которой свойства объектов все еще существуют в отсутствие какого-либо субъекта, проверяющего их, а возможность применения правил дедукции классической логики к *ненаблюдаемым объектам*.

КАНДИДО

С логической точки зрения, обе позиции одинаково произвольны и их невозможно проверить; поэтому мне они кажутся равноценными.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, все знания, основанные на опыте, т. е. индуктивные, полностью основываются на возможности экстраполяции на *ненаблюдаемые объекты* свойств, которые мы выявляем на *наблюдаемых объектах*. По-

сколько такая экстраполяция всегда происходит в соответствии с правилами классической логики, кажется понятным, что с психологической точки зрения жертвоприношение со стороны квантовой логики больше, чем со стороны ортодоксальной интерпретации: если ненаблюдаемые частицы подчиняются совершенно иной логике, нежели наблюдаемые частицы, как я могу использовать *мою собственную логику* для того, чтобы вывести их свойства?

КАНДИДО

Может быть, это объясняет тот факт, что ортодоксальная интерпретация имеет более широкие последствия, чем интерпретация, основанная на квантовой логике. Но что может сказать квантовая логика в отношении основной проблемы интерпретации квантовой теории: являются или не являются состояния суперпозиции новым способом существования материи, при котором некоторые наблюдаемые принимают только виртуальные значения?

АКАДЕМУС

В основных работах на эту тему, также, как и во всех известных мне статьях, данная проблема не рассматривается. Однако из того, что я читал, у меня сложилось впечатление, что большинство последователей квантовой логики принимают ортодоксальную точку зрения.

КАНДИДО

Но тогда, принимая философскую точку зрения квантовой логики, мы должны отбросить не только реализм, но также и классическую логику... Столкнувшись с такой шаткостью философского равновесия, не совсем понятно, почему же еще находятся люди, которые настаивают на принятии этого решения?

АКАДЕМУС

Аргумент, который П. Суппес рассматривал в качестве самого веского для использования неклассической логики в квантовой механике, заключается в том, что не всегда сочетание двух элементарных физических формулировок квантовой теории является формулировкой, физическое содержание которой действительно можно выявить, и поэтому она не является частью рабочей логики квантовой механики. Мы поэтому должны оставить обычные пропозициональные вычисления классической логики, основанные на *булевой алгебре*, и прибегнуть к новым пропозициональным вычислениям, основанным на *частично булевой алгебре*, в которой логические связки *и* и *или* не везде являются определенными. Набор проекторов в гильбертовом пространстве, рассмотренный Биркхоффом и фон Нейманом, является примером *частично булевой алгебры*. В этом смысле предложение Суппеса обобщает предложение Биркхоффа и Неймана.

КАНДИДО

Но разве формулировка Суппеса не подразумевается в формулировке принципа Гейзенберга?

АКАДЕМУС

Формулировка Суппеса действительно сильнее, и ее можно выразить следующим образом: *если A и B являются несовместимыми наблюдаемыми, любое одновременное измерение A и B лишено какого-либо операционного смысла, а не только, как в принципе Гейзенберга, их нельзя одновременно измерить с любой степенью точности.*

КАНДИДО

С физической точки зрения, это идея не кажется очень убедительной: на самом деле не понятно, почему нельзя одновременно измерять местоположение и момент частицы, если принимается довольно большой допустимый предел ошибок.

АКАДЕМУС

Аргумент, выдвинутый Суппесом для поддержания этой теории, состоит в том, что если A обозначает положение, B — момент и I, J — любые два набора вещественных чисел, утверждение $[A \in I]$ и $[B \in J]$ бессмысленно, поскольку статистические распределения значений A и B в отношении любого произвольного квантового состояния не могут оба быть выведены из квантовой модели из одного распределения связанных вероятностей. В некотором смысле эту теорию можно рассматривать в качестве предшественника квантовой вероятности.

КАНДИДО

Существует главное различие: в анализе Суппеса отсутствует основное положение теории квантовой вероятности, т. е. *необходимость анализа независимо от модели*. Напротив, что Суппес может доказать, так это только то, что в пределах обычной математической модели квантовой теории связанное распределение, удовлетворяющее некоторым очень специфическим условиям (так называемое распределение Вигнера), существовать не может.

В то время как достаточно легко выяснить, что для каждого квантового состояния существует бесчисленное множество связанных распределений A и B , чьи крайние распределения предсказаны квантовой механикой (простой пример: произведение распределений A и B в этом состоянии). Сам Суппес в последующей статье с М. Занотти⁶ рассматривает эту возмож-

⁶P. Suppes, M. Zanotti, *Stochastic Incompleteness of quantum mechanics*, in *Logic and Probability in Quantum mechanics*, P. Suppes (ed.), Reidel (1976), pp. 303–322.

ность без объяснений, однако почему распределение Вигнера среди других возможных ρ должно играть особую роль.

АКАДЕМУС

Программа квантовой логики предлагает нам строить математическую модель всех важных с физической точки зрения предложений. Иными словами, если \mathcal{L} является такой моделью, то мы хотим построить соответствие между формулировками физической теории, например, квантовой механики, и элементами \mathcal{L} таким образом, чтобы обычные логические связи между формулировками соответствовали бы операциям между математическими объектами, соответствующими им. Например, если A и B являются несовместимыми формулировками в смысле квантовой теории, а a и b являются элементами \mathcal{L} , соответствующими им, то нам хотелось бы, чтобы пересечение $a \cap b$, являющееся элементом \mathcal{L} , выражало каким-то образом общее содержание этих двух формулировок.

КАНДИДО

Например, если Q — положение частицы, движение которой происходит вдоль прямой линии, а P — ее момент, то утверждения:

i) *местоположение частицы находится в интервале I ,*

ii) *момент частицы находится в интервале J ,*

безусловно важны с физической точки зрения, так что, согласно программе квантовой логики, два математических объекта (проектора), обозначенные соответственно q_I и p_J , должны им соответствовать. С другой стороны, если интервалы I и J достаточно велики, чтобы быть совместимыми с принципом неопределенности, то объединенная формулировка:

iii) *положение частицы находится в интервале I , а ее момент — в интервале J*

важна с физической точки зрения и поэтому должна соответствовать *пересечению* $q_I \wedge p_J$ (точнее, проекции на пересечение интервалов).

АКАДЕМУС

Да, так должно быть. Однако можно доказать, что величина $q_I \cap p_J$ всегда равна нулю, т. е. она соответствует утверждению, которое всегда неверно.

КАНДИДО

Вы думаете, что, согласно квантовой логике, всегда неверно утверждать, что частица присутствует в комнате с меньшей скоростью, чем квант света?

АКАДЕМУС

Согласно и квантовой логике, и ортодоксальной интерпретации. Это то, что подразумевают физики, когда говорят, что *частица не может быть одновременно локализована в пространстве и во времени.*

КАНДИДО

Этот пример, на мой взгляд, демонстрирует, что *код перевода* между физической реальностью и математической моделью, принятый как ортодоксальной интерпретацией, так и квантовой логикой, приводит к выводам, противоречащим не только здравому смыслу, но и опыту. Действительно, принцип неопределенности вовсе не исключает измерения *одновременного* и для одной и той же частицы как местоположения, так и скорости, при условии, что приняты достаточно высокие допустимые пределы погрешности.

ГЛАВА VI

VI.1. Решение, предложенное квантовой вероятностью

КАНДИДО

Согласно квантовой вероятности, противоречие между теорией и опытом, вытекающее из эксперимента с двумя отверстиями, имеет вероятностные корни.

АКАДЕМУС

Я никогда не слышал об этой *квантовой вероятности*, но в 1927 г. М. Борн уже говорил о . . .

БОРН

. . . любопытном слиянии механики и вероятности . . .

АКАДЕМУС

На идее о том, что вероятностный формализм имеет место в квантовой теории, несомненно настаивал П. Йордан¹, а впоследствии Гильберт, Нордхайм и фон Нейман², а затем уже Фейнман и многие другие . . .

Эти авторы точно описывают новый формализм и выделяют его основные отличия от классического формализма.

КАНДИДО

Однако эти авторы оставляют открытым следующий вопрос: либо новый вероятностный формализм, который был привнесен квантовой теорией, не нужен, либо он является следствием больших различий между предпосылками, т. е. аксиомами, классической статистики и квантовой статистики.

АКАДЕМУС

Для выявления глубоких корней существующего различия между двумя формализмами было бы необходимо разделить их предпосылки, т. е. различные аксиомы.

¹P. Jordan, *Über quantenmechanische Darstellung von Quantensprüngen*, Zeitsch. f. Phys. **38** (1926) 50, а также *Über eine neue begründung der Quantenmechanic*, Zeitsch. F. Phys. **40** (1927) 809, *Über eine neue begründung der Quantenmechanic*, Zeitsch. F. Phys. **44** (1927) 1.

²D. Hilbert, L. Nordheim and von Neumann, *Über die Grundlagen der Quantenmechanik*, in J. von Neumann, Coll. Works, Pergamon Press, vol. I, 104–133.

КАНДИДО

Квантовая вероятность утверждает, что она решила эту проблему и этим обогатила органичное, полное и окончательное решение так называемого парадокса квантовой теории.

АКАДЕМУС

Многие теории делают такие же заявления . . .

КАНДИДО

Если такие заявления ничем не оправданы, то их легко изобличить во лжи: достаточно разоблачить возможные неоправданные утверждения и противопоставить им точную с физической и математической точки зрения критику.

АКАДЕМУС

Если эту теорию можно проверить, то нужно произвести ее тестирование.

КАНДИДО

Такого рода проверки полезны для преодоления предрассудков. Во время подобных дискуссий я часто сталкивался с людьми, скользкими как угри, которые вместо того, чтобы отвечать на Ваши вопросы, непрерывно повторяют избитые и бессвязные аргументы, как будто повторение этих доводов дает им то, что не могла бы дать железная логика.

АКАДЕМУС

Такая позиция часто имеет успех.

КАНДИДО

Да, они имеют успех у аудитории. Они даже могут быть востребованы с социальной точки зрения, но они совершенно не способствуют пониманию и прогрессу науки.

АКАДЕМУС

Каков же основной тезис *квантовой вероятности*?

КАНДИДО

Существует критика, согласно которой несправедливо утверждение о том, что мы противоречим экспериментальным данным, если говорим, что электрон прошел через одно и только одно из двух отверстий, что спин частицы имеет значение и до начала измерения и, вообще говоря, что объекты существуют, даже если никто за ними не наблюдает. Иными словами, квантовая вероятность утверждает, что *доказательства*, с помощью которых физики объясняют возникновение этих противоречий, ошибочны.

Есть и конструктивная часть, которая показывает, что, введя слабую формулировку принципа неопределенности непосредственно в аксиомы теории вероятности, можно определить всю структуру квантовой теории,

включая принцип суперпозиции, о котором так много говорилось (см. конец разд. III.5).

АКАДЕМУС

Короче говоря, согласно квантовой вероятности, расширение аксиом классической теории вероятностей, подобно тому, что произошло в геометрии в конце XIX в., было бы достаточным для того, чтобы восстановить на совершенно последовательной и строгой основе интерпретацию квантовой теории и освободить ее от парадоксов и эффектных метафизических украшений.

Если бы то, о чем Вы говорите, было бы правдой, это имело бы такое же значение для философии и культуры, как изменение классической логики или самой концепции физической реальности.

КАНДИДО

Если Вы детально проанализируете аргументы этой теории, Вы сможете сами оценить их значимость.

АКАДЕМУС

Первое возникающее сомнение состоит в следующем: если *квантовая вероятность* подтверждает принцип неопределенности (как Вы говорите, даже выводит его), она непременно столкнется со всеми трудностями, возникающими из-за *разрушения волнового пакета*.

КАНДИДО

Вовсе нет, потому что *квантовая вероятность* лишает принцип неопределенности всей метафизической сверхструктуры, которая была на нем построена, и возвращает его к тому, что он есть на самом деле: к формуле для вычисления вероятностей переходов, т. е. изменения состояния системы посредством вычисления вероятности способом, отличающимся от классического.

Именно *квантовая вероятность отрицает* наличие доказательства того, что в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого это наблюдаемое может принимать только виртуальные значения. Она отрицает утверждения Гейзенберга и Фейнмана... о том, что они доказали следующее: если эта история с виртуальными значениями не принимается, а от реализма никто не отказывается, то мы приходим к противоречию с экспериментальными данными.

АКАДЕМУС

Вы имеете в виду, что, согласно квантовой вероятности, Гейзенберг, Фейнман, ... допустили ошибки в доказательстве этого утверждения?

КАНДИДО

Я бы предпочел говорить не об *ошибках*, а о необъясненных *неявных постулатах и допущениях* в их рассуждениях.

АКАДЕМУС

Какого рода эти допущения?

КАНДИДО

Для того, чтобы понять это, Вы прежде всего должны представить, что противоречие с экспериментальными данными, полученными в опытах, аналогичных эксперименту с *двумя отверстиями*, вытекает из вероятностных рассуждений.

АКАДЕМУС

Это не очевидно, потому что можно говорить об эксперименте с двумя отверстиями, не вводя вероятности, а ограничиваясь только вычислением частот. Но, предположим, что это утверждение принято, что же в таком случае представляли бы собой эти *неявные постулаты и допущения*?

КАНДИДО

Это же ясно: *все эти авторы неявно постулируют*, что ряд статистических данных, полученных в различных и иногда даже взаимоисключающих экспериментах, может быть описан одной моделью с позиций классической вероятности.

Все так называемые *экспериментальные доказательства* необходимости отбросить реализм основаны на таком неявном постулате. *Это один из основных тезисов квантовой вероятности*. Попытка противопоставить *вероятностным предположениям* предположительно безвредные *вычисления* наивна, поскольку при этом не учитываются глубинные связи между этими двумя вещами. Эту точку зрения мы обсудим подробнее в разд. IX.1.

АКАДЕМУС

Все это выглядит достаточно абстрактно. Не могли бы Вы привести примеры?

КАНДИДО

Давайте рассмотрим основной пример: два отверстия. Фейнман отрицает, что *ненаблюдаемая* частица может пройти через одно и только одно из двух отверстий, другими словами, он принимает ортодоксальную точку зрения на основании тех соображений, что . . .

ФЕЙНМАН

...если бы она должна была пройти либо через одно, либо через другое отверстие, то мы могли бы разделить все прибытия в область X на два класса: на те, которые произошли в результате прохождения через

отверстие 1, и те, которые произошли в результате прохождения через отверстие 2, а частота P прибытий в область X действительно равнялась бы суммарному значению частоты P_1 прибытий через отверстие 1 и частоты P_2 прибытий через отверстие 2, ...³.

КАНДИДО

Заметим, что в этой формулировке Фейнмана имеется два неявных отождествления.

Используя символы и нумерацию, введенную в разд. V.1:

- i) отождествление частот с вероятностями (и, следовательно, статистических правил с правилами вычисления);
- ii) отождествление совместных вероятностей с условными вероятностями

$$P_1 = P(X \cap 1) \text{ (связан.)} = P(X | 1) \text{ (условн.)}, \quad (\text{VI.1.1})$$

$$P_2 = P(X \cap 2) \text{ (связан.)} = P(X | 2) \text{ (условн.)}. \quad (\text{VI.1.2})$$

Следовательно, он говорит о суммарных частотах там, где специалист по теории вероятности говорил бы, по-видимому, о теореме составных вероятностей.

АКАДЕМУС

Это бесполезный педантизм: каждый знает, что совместные вероятности пропорциональны условным вероятностям: мы видели это на этапе III анализа эксперимента с двумя отверстиями. Они отличаются только коэффициентом умножения, который в нашем случае может равняться 1/2. Следовательно, отождествление, неявно сделанное Фейнманом, не важно с числовой точки зрения.

КАНДИДО

Напротив, квантовая вероятность утверждает, что корни проблемы интерпретации квантовой теории находятся именно в этом неявном отождествлении, которое большинство физиков считает доказанным. Это отождествление вплоть до пропорциональности, играющее существенную роль в выводах Фейнмана, скрывает запутанный предрассудок, имеющий глубокие корни. Например в случае эксперимента с двумя отверстиями, если такое отождествление принято, больше уже невозможно различать незначимость равенства, выражающего аддитивность вероятности несовместных

³The concept of probability in quantum mechanics, in Proc. II-d Berkeley Symp. on Math. Stat. and Prob., Univ. of California Press, Berkeley, Los Angeles (1951) 533-541, p. 536.

событий, и незначимость теоремы составных вероятностей, т. е. равенства:

$$P(X) = p(1)P(X | 1) + p(2)P(X | 2).$$

С физической точки зрения, напротив, эти два утверждения имеют экспериментально совершенно разный смысл.

АКАДЕМУС

Мне кажется, что различие между этими двумя концепциями является бесполезным математическим педантизмом, и я не вижу, как это может помочь прояснить нашу проблему.

КАНДИДО

Математика не имеет ничего общего с этим, это отождествление имеет физические корни: дело в том, что *экспериментальные методики, используемые для оценки совместных вероятностей, совершенно отличны от методик, используемых для оценки условных вероятностей.*

АКАДЕМУС

Наконец-то Вы используете язык, в котором я узнаю черты своего собственного. Я допускаю, что чувствую дискомфорт среди всех этих запутанных различий. В конце концов, на мой взгляд, вероятность, как и вся математика, является лишь инструментом, языком, . . . , чем-то действительно отличающимся от реального концептуального содержания.

КАНДИДО

Я слышал, некоторые психологи полагают, что очень трудно отделить мысли от языка. Иногда, особенно когда мы сталкиваемся с непонятными и сложными ситуациями, полезно немного сосредоточиться на том, какое значение мы приписываем словам.

АКАДЕМУС

Я не ожидал, что Вы столь расположены к логическому позитивизму.

КАНДИДО

Давайте суммируем, без ярлыков, интуитивные значения символов, возникшие в предыдущих дискуссиях. Начнем со следующих событий:

$$X = \text{частица прибывает в область } X \text{ экрана } \Sigma_2, \quad (\text{VI.1.3})$$

$$1 = \text{частица проходит через отверстие 1 экрана } \Sigma_1, \quad (\text{VI.1.4})$$

$$2 = \text{частица проходит через отверстие 2 экрана } \Sigma_1 \quad (\text{VI.1.5})$$

и опишем *совместные события*:

$$X \cap 1 = \text{частица прибывает в область } X \text{ и проходит через отверстие 1,} \quad (\text{VI.1.6})$$

$X \cap 2 =$ частица прибывает в область X и проходит через отверстие 2, (VI.1.7)

по определению совместные вероятности

$$P(X \cap 1), \quad P(X \cap 2) \quad (\text{VI.1.8})$$

являются вероятностями совместных событий.

АКАДЕМУС

Это обычный способ определения совместных событий в теории вероятностей: если событие (например, X) может происходить при наличии многих других событий (например, 1 и 2), то мы говорим о связанном событии в том случае, если оно происходит в сочетании с одним из таких событий.

КАНДИДО

Совершенно верно! Если говорить более точно, подразумевается, что вероятности $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$ должны оцениваться в связи с подготовкой, в ходе которой оба отверстия открыты: не было бы никакого смысла говорить о совместных вероятностях, если бы одно отверстие было бы закрыто (даже если кажется, что кто-то думает иначе, см. разд. VII.2 рядом с примечанием (15)).

АКАДЕМУС

Но если даже рассматривать тот случай, когда оба отверстия открыты, необходимо уточнить, имеется ли между двумя экранами прибор S , позволяющий определить, через какое отверстие проходит отдельная частица. Это хорошо объяснил Фейнман. Поэтому лучше всего использовать запись

$$P(X \cap 1 | S); \quad P(X \cap 2 | S), \quad (\text{VI.1.9})$$

если между двумя экранами расположен прибор S , и запись $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$, если между экранами такого прибора нет.

КАНДИДО

Заметим, что только вероятности $P(X \cap 1 | S)$, $P(X \cap 2 | S)$ имеют экспериментальное значение, потому что для того, чтобы оценить относительные частоты событий $X \cap 1$ и $X \cap 2$, необходимо различать, через какое отверстие прошла частица, и поэтому нужно установить прибор S , позволяющий это определить.

Аналогично, необходимо а priori различать вероятности $P(1)$, $P(2)$, не сопоставимые с экспериментальными данными, и $P(1 | S)$, $P(2 | S)$, которые, напротив, сопоставимы.

АКАДЕМУС

Но для того, чтобы оценить вероятность $P(X \cap 1)$, разве не будет достаточно закрыть отверстие 2?

КАНДИДО

Нет, потому что в этом случае частица смогла бы пройти только через отверстие 1 и Вы не сможете посчитать $P(X \cap 1)$, а лишь условную вероятность $P(X | 1)$. Кроме того, очевидно, что при закрытом отверстии 2 вероятность прохода через отверстие 1 становится равной 1.

АКАДЕМУС

Вы подразумеваете, что (по определению) условная вероятность $P(X | 1)$ является вероятностью события X , когда отверстие 2 закрыто?

КАНДИДО

Я хочу различать *два условия*: одно, которое Вы только что описали и которое мы можем назвать *физическим условием*. Это условие состоит в том, чтобы заставить частицу сделать выбор (пройти через отверстие 1). Другое, которое мы можем назвать *классическим* (или *тавтологическим*) *условием*, заключается в том, что существует свободный выбор для частицы и подсчет количества частиц, которые в этих условиях выбирают отверстие 2.

Одним из наиболее существенных концептуальных понятий, введенных квантовой вероятностью, является именно это различие между физическим условием, при котором физически исключены некоторые возможности в подготовке прибора, и тавтологическими условиями, при которых a priori не исключается ни одна из возможностей, и существует ограничение на подсчет только тех событий, в которых реализована одна из этих возможностей.

Именно в этот момент впервые на сцену выходит специфичность квантового явления. Действительно, как учит нас анализ Бора, Гейзенберга, Фейнмана, . . . , для того, чтобы осмыслить тавтологические условия, необходимо ввести измерительный прибор, позволяющий отличать друг от друга различные возможности. Но такой прибор играет активную роль, которую мы хотели бы предсказывать с помощью нашей теории.

АКАДЕМУС

Понимаю... Только для тавтологических условий можно сказать, что условная вероятность пропорциональна связанной вероятности.

КАНДИДО

Эта путаница между совместными и условными вероятностями с точки зрения квантовой вероятности является первой безусловной предпосылкой

анализа эксперимента с двумя отверстиями, проведенного Фейнманом и многими другими.

АКАДЕМУС

Почему *первой*? Существуют еще какие-то?

КАНДИДО

Вторая состоит в постулировании того, что эта условная вероятность выражается в терминах связанной вероятности формулой Байеса:

$$P(X | 1) = \frac{P(X \cap 1)}{P(1)}. \quad (\text{VI.1.10})$$

АКАДЕМУС

Я действительно запутался во всех этих условных и связанных вероятностях... Насколько яснее слова Фейнмана, который говорит только о P_{12} , P_1 , P_2 , ...!

КАНДИДО

Часто именно из такой ясности и возникает путаница. То, что Фейнман называет P_{12} , мы называли $P(X)$; а P_1 , P_2 Фейнмана — это наши $P(X | 1)$, $P(X | 2)$. Уравнение, которое Фейнман записывает в виде

$$P_{12} = P_1 + P_2, \quad (\text{VI.1.11})$$

является теоремой составных вероятностей:

$$P(X) = P(1)P(X | 1) + P(2)P(X | 2), \quad (\text{VI.1.12})$$

в которую Фейнман всегда и без колебаний вводит гипотезу о том, что

$$P(1) = P(2) = 1/2, \quad (\text{VI.1.13})$$

и, следовательно, опускает коэффициент $1/2$.

АКАДЕМУС

Но как Вы можете говорить с такой уверенностью о так называемых *неявных допущениях* Фейнмана? Почему уравнение, которое он записывает в виде $P_{12} = P_1 + P_2$, обязательно нужно интерпретировать как неточную формулировку теоремы о составных вероятностях? Разве это не может относиться к тому факту, что *вероятности независимых событий суммируются*? В этом случае P_1 была бы равна составной вероятности $P(X \cap 1)$ и не равна, как и квантовая вероятность, условной вероятности $P(X | 1)$.

Эта последняя интерпретация гораздо ближе к тому виду, в котором она используется физиками, которые никогда не говорили о *теореме составных вероятностей*, а говорили лишь о кривых, которые должны или не должны суммироваться.

ЯУХ

... Тогда, если бы господин Симплисио был прав, утверждая, что события происходят независимо от наблюдения, нужно было бы ожидать, что частицы в некоторых случаях проходят через одно отверстие, а в некоторых — через другое; поэтому одновременное распределение было бы просто суммой распределений, обнаруживаемых в C_1 и C_2 . Реальный же результат оказался совершенно иным: как это показано на экране B , распределение выглядит как картинка оптической интерференции.

Таким образом, экспериментальные данные противоречат ответу господина Симплисио⁴...

АКАДЕМУС

Экран B Яуха является вторым экраном в эксперименте с двумя отверстиями. Если мы назовем P_1 распределение, которое мы получаем в C_1 (эксперимент с закрытым отверстием 2), а P_2 — распределение, которое мы получаем в C_2 , утверждение Яуха сводится к утверждению Фейнмана. В этом случае очевидно, что Яух ссылается на тот факт, что *вероятности независимых явлений суммируются*. Кроме того, сам Фейнман, которого Вы постоянно цитируете, говорит то же самое.

ФЕЙНМАН

Ясно, что результат P_{12} , полученный, когда оба отверстия открыты, не является суммой P_1 и P_2 , т. е. суммой вероятностей для каждого отверстия в отдельности⁵.

КАНДИДО

Да, это верно. Фейнман тоже путает связанную и условную вероятность. Но это лишь подтверждает мою мысль о том, что идеи физиков в отношении столь важного аргумента не совсем определены. Кажется, что физики очень широко используют теорию вероятностей, но изучают ее очень мало.

АКАДЕМУС

У этого факта есть исторические корни: в то время как с момента своего возникновения квантовая теория ассимилирует (в смысле использования и обобщения) самый тонкий инструментарий классической аналитической механики (Зоммерфельд, Борн, Дирак, ...), использование веро-

⁴J. M. Jauch, *Sulla realtà dei quanti*, Adelphi, 1980, pp. 98–99.

⁵R. P. Feynman, *Lezioni di Fisica*, Vol III, Cap. 1.

ятностных методов, не считая методов, введенных в статистическую механику И. Больцманом, находится лишь на первой стадии, ограниченной относительно простым уровнем.

КАНДИДО

Для того, чтобы понять, в чем заключается разница между ролями, сыгранными классической механикой и теорией вероятностей на раннем этапе развития квантовой теории, необходимо вспомнить, что основные принципы новой теории были сформулированы в период 1925–1927 гг., а ее математическая формулировка нашла свое выражение, в общем принятое к настоящему времени, в монографиях Дирака (1930) и фон Неймана (1932), в то время как математическая формулировка теории вероятностей, принятая к настоящему времени, впервые появляется в монографии А. Н. Колмогорова (1933): *Теория вероятностей*⁶.

Тридцатые годы поэтому являются как для квантовой теории, так и для теории вероятностей периодом бурного развития. Обе теории, точно сформулировав свои математические основы, цели и язык, продолжают развивать свою внутреннюю программу. **Обе программы выполняются независимо**, и можно сказать, что в течение более 10 лет взаимодействие между теорией вероятностей и квантовой теорией, как количественное, так и качественное, было незначительным. Это означает, что ни одна из них не стимулировала и не использовала результаты исследований другой.

АКАДЕМУС

Попытка реконструировать причины относительной изоляции этих двух теорий — интересная историческая задача. Недостаточно сказать, что два предмета почти в одно и то же время достигают аксиоматического уровня зрелости и что поэтому вполне возможно ожидать период чисто внутренней концентрации. Точно такая же ситуация возникает с дифференциальной геометрией и относительностью, но в этом случае можно видеть глубокую и очень плодотворную кооперацию между поборниками этих двух дисциплин, начиная с самых ранних этапов теории относительности, тогда как для того, чтобы увидеть тот же самый тип взаимодействия между вероятностью и квантовой теорией, должно было пройти более сорока лет.

⁶ P. A. M. Dirac, *The principles of quantum mechanics*, Clarendon Press, Oxford (1958); J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, (1955); A. N. Kolmogorov, *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Springer, Berlin, 1933 (перевод на итальянский язык и комментарии Л. Аккарди, Эдизиони-Текнос (1995)).

КАНДИДО

Как бы то ни было, существуют также некоторые различия между двумя ситуациями, а именно в отношениях между дифференциальной геометрией и относительностью: новая физическая интуиция обнаруживает, что новая геометрическая интуиция уже существует, тогда как мы можем отметить, что вероятностная интуиция, связанная с квантовой теорией, лишь недавно начала искать математическое обоснование, которое можно было бы считать окончательным.

Однако похоже, что некоторые социальные и культурные течения сыграли свою роль в том, что они не объединились; например, отсутствие глубоко укоренившейся связи между квантовыми физиками и поклонниками теории вероятностей, или психологическое давление, заставляющее рассматривать вероятность как нечто подчиненное квантовой физике и физике вообще.

АКАДЕМУС

Несмотря на то, что теория вероятностей существовала уже почти 300 лет, лишь в конце XIX в. науки о природе начали систематически овладевать этим огромным наследием идей и методов, и первые важные результаты, полученные таким образом, дали толчок процессу развития теории вероятностей, бывшей тогда лишь дополнительным инструментом сбора и обработки статистических данных для технической и интерпретационной поддержки современной философии природы, процессу, который в настоящее время можно считать законченным. Вспомним, например, теоретическую эволюцию понятия теплоты Больцмана с помощью статистических методов; измерение числа Авогадро, осуществленное Перреном (1909) с помощью метода, основанного на вероятностном анализе броуновского движения, сделанного Эйнштейном и Смолуховским четырьмя годами ранее; статистическое распределение энергии излучения черного тела, обнаруженное Планком в 1900 г. . .

КАНДИДО

С одной стороны, между 1900 и 1930 гг. существовала та механика, которая еще со времен Ньютона была основой, если не технической, то определенно интуитивной, для моделирования любого научного анализа природы. С другой стороны, теория вероятностей появилась среди естественных наук не как инструмент, а как носитель нового типа интуиции лишь спустя 300 лет и более, почти одновременно с возникновением квантовой механики. Эта историческая фазовая разница между механической и вероятностной интуицией безусловно сыграла важную роль и в том культурном потрясе-

нии, которое вызвала во многих науках так называемая *статистическая интерпретация Борна*, и в различного рода отрицаниях этой гипотезы.

АКАДЕМУС

Оставляя в стороне техническое содержание, статистическая интерпретация Борна решительно заявляет об осведомленности физиков в необходимости статистической части в *математической модели* квантовой теории.

КАНДИДО

На самом деле, как мы видели в разд. III.5, физическое обоснование необходимости статистического компонента в описании природы подразумевается в соотношениях неопределенности Гейзенберга.

Но эта *необходимость* была осознана физиками только на более позднем этапе. С другой стороны, как подчеркивал Гейзенберг, в квантовой теории математическая модель *предвосхищает* ее интерпретацию.

АКАДЕМУС

Я согласен с этим историческим анализом, но это не означает, что, когда Вы говорите о *безоговорочных постулатах*, Вы не даете случайных формулировок. Как Вы можете *доказать*, что формулировка неявно содержится в другой формулировке? Как Вы можете *доказать*, что именно *Фейнман* путает связанную и условную вероятности, а не *Вы* путаете что-то еще?

КАНДИДО

Когда я говорю о безусловных постулатах, я не ссылаюсь на психологический анализ, на суждения по намерениям. Достаточно продолжить дедукцию с помощью метода исключения.

Предположим тогда, как Вы предлагаете, что в уравнении Фейнмана $P_{12} = P_1 + P_2$ вероятности P_1 и P_2 являются не условными, а связанными вероятностями $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$. Тогда в наших записях уравнение $P_{12} = P_1 + P_2$ должно записываться в виде:

$$P(X) = P(X \cap 1) + P(X \cap 2). \quad (\text{VI.1.14})$$

Но это равенство никак нельзя проверить экспериментально, поскольку в то время как $P(X)$ можно оценить экспериментально, нельзя сделать то же самое для связанных вероятностей $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$: как объясняет сам Фейнман, как только будет предпринята попытка оценить это, необходимо будет ввести инструмент S и, следовательно, нельзя будет оценить вероятность $P(X \cap 1)$, а только $P(X \cap 1 | S)$.

АКАДЕМУС

Могут ли эти две вероятности быть неравными? Как можно исключить

такую возможность, ведь нельзя оценить экспериментально $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$?

КАНДИДО

Мы можем это исключить только с помощью следующего рассуждения: две вероятности $P(X \cap 1 | S)$, $P(X \cap 2 | S)$ удовлетворяют соотношению:

$$P(X | S) = P(X \cap 1 | S) + P(X \cap 2 | S), \quad (\text{VI.1.15})$$

поэтому они не могут быть равны соответственно $P(X \cap 1)$, $P(X \cap 2)$, иначе, благодаря (VI.1.14), должно выполняться равенство

$$P(X | S) = P(X). \quad (\text{VI.1.16})$$

Но из экспериментов мы знаем, что это не так (см. рисунки), поскольку левая часть (VI.1.16) соответствует отсутствию интерференционных колец, а правая — их наличию.

АКАДЕМУС

Хорошо, если Вы действительно настаиваете на том, что все данные равенства $P_{12} = P_1 + P_2$ должны быть сопоставимы с экспериментами, то вероятности P_1 и P_2 на самом деле не могут являться связанными вероятностями, а должны быть условными. Однако, поскольку переход из одних в другие достигается простым умножением на коэффициент, то совершенно очевидно, что такие ученые, как Яух, Фейнман, ... и я считаем их эквивалентными.

КАНДИДО

Вы забываете, что такое изменение возможно лишь в том случае, если допускается, как это безоговорочно делалось до сих пор, что эти вероятности связаны уравнением Байеса:

$$\frac{P(X \cap 1)}{P(1)} = P(X | 1). \quad (\text{VI.1.17})$$

Если это соотношение не принимается, то отождествление, которое делали Вы, Фейнман, Яух и многие другие, абсолютно не оправдано.

АКАДЕМУС

Но соотношение Байеса — это тривиальное свойство относительных частот. Помните, что говорил Фейнман:

ФЕЙНМАН

Если смотреть на вероятность с точки зрения частоты, то (VI.1.12) просто

является результатом, вытекающим из утверждения о том, что в каждом эксперименте, результат которого a , B имел некоторое значение⁷...

АКАДЕМУС

Переводя на наш язык, результат Фейнмана a является событием X , и наблюдаемое B принимает значение 0, если частица проходит через отверстие 1 и значение 1, если она проходит через отверстие 2.

КАНДИДО

Мне кажется, что это просто усложнение того, о чем мы уже говорили многократно: если частица прибывает в X , то она должна была пройти либо через отверстие 1, либо через отверстие 2.

АКАДЕМУС

Фейнман в той статье описывает несколько более общую ситуацию, соответствующую любому количеству отверстий, а не только двум.

КАНДИДО

С концептуальных позиций это ничего не меняет. Напротив, что замечательно, так это то, что утверждение Фейнмана тривиально верно, если относится к *связанным* вероятностям, но становится совершенно неочевидным по отношению к *условным* вероятностям. Фейнман безоговорочно идентифицирует оба этих понятия, поскольку он по умолчанию принимает значимость формулы Байеса, т. е. (VI.1.17). Согласно квантовой вероятности, эта идентификация является большой ошибкой, *не математической, а физической*.

АКАДЕМУС

Как использование этой формулы может быть ошибкой? Попробуйте понять и обратитесь к монографии Колмогорова «*Основные концепции теории вероятности*», которая для классической теории вероятности сыграла такую же роль, как и «*Элементы*» Евклида для геометрии, и Вы увидите, что формула Байеса сформулирована не как аксиома теории, а как *определение понятия условной вероятности*.

КАНДИДО

Это один из шагов вперед, сделанных современной теорией вероятности по сравнению с Колмогоровым. В классической теории вероятностей формула Байеса используется как определение понятия условной вероятности, и означает, что связанная вероятность $P(X \cap 1)$ и маргинальная $P(1)$ *определяют* условную вероятность $P(X | 1)$.

⁷R. Feynman, *Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics*, Rev. of Mod. Phys. 20 (1948), pp. 367–385.

Напротив, и это еще одно важное замечание квантовой вероятности, в случае эксперимента с двумя отверстиями мы сталкиваемся с противоположной ситуацией: условную вероятность $P(X | 1)$ можно оценить экспериментально, а совместную вероятность — нельзя. Действительно, как неоднократно говорил Фейнман, любая попытка оценить ее даст вероятность, которую мы назвали $P(X \cap 1 | S)$ и которая, как мы только что доказали, отлична от $P(X \cap 1)$.

АКАДЕМУС

Не понимаю, почему это замечание кажется Вам важным: в формуле Байеса (VI.1.17) совместная и условная вероятности играют достаточно симметричные роли: я могу использовать любую из двух, для того, чтобы определить вторую. А именно, поскольку в эксперименте с двумя отверстиями связанная вероятность не доступна, а условная доступна, достаточно переписать соотношение (VI.1.17) в виде:

$$P(X \cap 1) = P(1)P(X | 1) \quad (\text{VI.1.18})$$

и определить связанную вероятность как функцию условной вероятности. По той же причине я определяю связанную вероятность прибытия в область X и прохождения через отверстие 2:

$$P(X \cap 2) = P(2)P(X | 2), \quad (\text{VI.1.19})$$

и я могу с определенностью сказать, что экспериментальные данные, т. е. условные вероятности, однозначно определяют связанные вероятности. Поскольку ни $P(1)$, ни $P(2)$ не стремятся к нулю, все правильно.

КАНДИДО

Этот аргумент без колебаний используют и Фейнман, и многие другие. Однако квантовая вероятность доказывает, что этот аргумент ошибочен: не всегда можно определить связанные вероятности из условных.

АКАДЕМУС

Как Вы можете говорить такое? Мы только что видели, что для того, чтобы первая превратилась в последнюю, достаточно перемножить (VI.1.17) или разделить (VI.1.18) на $P(1)$. Что может быть неверно в безобидном умножении?

КАНДИДО

Ошибка может возникать вследствие того, что эти совместные вероятности, которые Вы хотите определять по формулам (VI.1.17) и (VI.1.18), не являются независимыми, а имеют сложные математические связи. Таким

образом, введя эти определения, мы должны убедиться, что такие связи выполняются. Эти связи проясняют, что в квантовой вероятности называют *статистическими инвариантами*. Они являются вероятностными аналогами *геометрических инвариантов*, наиболее известным из которых является *кривизна Гаусса*. В обоих случаях, т.е. и в геометрии, и в вероятности, их значение заключено в их *внутренних* свойствах. Это означает, что эти инварианты *можно однозначно выразить в терминах физически измеряемых величин*, например, вероятностей или корреляций в вероятности, а также углов или поверхностей в геометрии. Следствием этого является то, что, внимательно проанализировав экспериментальные данные, мы можем решить, какую модель (вероятностную или геометрическую) мы должны использовать в данной ситуации.

Как в XIX в. было обнаружено, что существует множество математических моделей законов пространства, и выбор модели, наиболее адекватной данной физической ситуации, можно сделать на основании экспериментов, точно так же и в XX в. то же самое было обнаружено для законов случайных явлений. Это открытие является настоящей концептуальной революцией, посредством которой квантовая теория возвысилась над доминирующими физическими теориями и обогатила культуру человечества.

VI.2. Статистический инвариант двух отверстий

АКАДЕМУС

Эти общие рассуждения смущают меня. Давайте ограничимся экспериментом с двумя отверстиями. Каковы будут в этом случае ограничения или, как Вы их называете, *статистические инварианты*?

КАНДИДО

Их легко объяснить, но необходимо ясно представлять себе разницу между *экспериментальными данными* и величинами, введенными с помощью чисто математических приемов и *в принципе ненаблюдаемыми*.

Как мы видели, теоретические рассуждения ведут к равенству (VI.1.12) (теореме составных (или суммарных) вероятностей), которое противоречит экспериментальным данным. Такие рассуждения не были проведены с *использованием* правил классической вероятности в отношении измеренных или измеряемых относительных частот, а скорее *при допущении* возможности описывать определенные экспериментальные данные (относительные частоты $P(X)$, $P(X | 1)$, $P(X | 2)$) с помощью обычной математической модели классической вероятности.

АКАДЕМУС

Обычная математическая вероятностная модель, которую в дальнейшем мы будем называть *классической вероятностной моделью* или *моделью Колмогорова*, зиждется на двух основных понятиях: *событии* и *вероятности*. События представлены в виде подпоследовательностей данной последовательности S , называемой *пространством событий* или *выборок*, точки которых должны рассматриваться как *элементарные, неделимые явления*.

КАНДИДО

Например, при подбрасывании кости *элементарными событиями* являются числа от одного до шести, а другие события являются *сочетаниями* атомных событий. Например, событие, когда *выпадает четное число*, является сочетанием трех событий: *выпадением 2, выпадением 4 и выпадением 6*.

АКАДЕМУС

Каждое событие, т.е. каждая подпоследовательность из S , связано с числом, его вероятностью, так что вероятность всего S достигает 1, и вероятности суммируются на отдельных последовательностях, т.е. такие формулы, как (VI.1.14) и (VI.1.15), — значимы. Мы несколько раз определяли связанные вероятности, и они так называются потому, что относятся к возникновению нескольких событий, например, одновременное возникновение события X и события 1 было записано в виде $X \cap 1$. Наконец, в классической вероятностной модели условные вероятности определяются формулой Байеса.

КАНДИДО

Как бы то ни было, когда Вы пытаетесь определить совместные вероятности, начиная с условных вероятностей с помощью равенств (VI.1.18) и (VI.1.19), Вы не просто применяете законы классической вероятности, а вносите допущение, что существуют четыре числа

$$P(1), P(2), P(X \cap 1), P(X \cap 2), \quad (\text{VI.2.1})$$

которые не могут соответствовать какому-то количеству, которое можно измерить экспериментально, т.е. они не сопоставимы с какой-либо действительно измеряемой относительной частотой. Результаты любого эксперимента, целью которого является экспериментальная оценка этих величин, на самом деле не дали бы мне никакой информации о них, а только о величинах, которые мы обозначили как

$$P(1 | S), P(2 | S), P(X \cap 1 | S), P(X \cap 2 | S). \quad (\text{VI.2.2})$$

АКАДЕМУС

Но если их нельзя измерить, почему нельзя ввести их теоретически на промежуточном этапе? Важно только то, что все конечные формулировки теории выражены только как функция наблюдаемых величин.

КАНДИДО

Что-то должно быть не так, поскольку эти четыре величины не могут быть произвольными. Во-первых, они должны быть положительными, а во-вторых, должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$P(1) + P(2) = 1, \quad (\text{VI.2.3})$$

все частицы, попавшие на второй экран, прошли либо через отверстие 1, либо через отверстие 2;

$$P(X \cap 1) + P(X \cap 2) = P(X), \quad (\text{VI.2.4})$$

все частицы, попадающие в область X второго экрана, прошли либо через отверстие 1, либо через отверстие 2;

$$\frac{P(X \cap 1)}{P(1)} = P(X | 1), \quad (\text{VI.2.5})$$

формула Байеса при закрытом отверстии 2;

$$\frac{P(X \cap 2)}{P(2)} = P(X | 2), \quad (\text{VI.2.6})$$

формула Байеса при закрытом отверстии 1. Введение совместных вероятностей по определению, как это Вы делали, эквивалентно поэтому допущению того, что всегда существует позитивное решение этих уравнений.

Но существование положительного решения системы четырех линейных уравнений с четырьмя неизвестными величинами не является предметом определений или постулатов, а чем-то, что может и должно быть математически доказано.

АКАДЕМУС

В этих четырех уравнениях, если я правильно понимаю, неизвестными величинами являются четыре значения в формуле (VI.2.1), а коэффициентами являются экспериментальные данные.

КАНДИДО

Именно так, и четыре уравнения (VI.2.3), (VI.2.4), (VI.2.5), (VI.2.6) являются теми ограничениями, которые накладываются математической теорией на статистические данные в случае эксперимента с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Но эти статистические данные получены экспериментально. Есть ли смысл говорить, что математическая теория *накладывает некоторые ограничения* на экспериментальные данные?

КАНДИДО

Эти ограничения лимитируют возможность использования определенной математической модели для описания определенного набора экспериментальных данных. Например, обозначение вероятности просто с помощью (VI.1.18) и (VI.1.19), как Вы бы хотели это сделать явно и как Фейнман это делает неявно, эквивалентно априорному допущению того, что *во всех вероятностях, возникающих в природе, такие математические ограничения выполняются автоматически.*

АКАДЕМУС

Разве квантовая механика *утверждает*, что такие ограничения не выполняются?

КАНДИДО

Квантовая вероятность *доказывает*, что такие ограничения не выполняются.

АКАДЕМУС

И каково же это *доказательство*?

КАНДИДО

Доказательство простое, потому что четыре уравнения действительно просты. Произведя необходимые вычисления, мы находим возможным ввести совместные вероятности, как это угодно Вам и Фейнману, если только число

$$\frac{P(X) - P(X | 2)}{P(X | 1) - P(X | 2)} \quad (\text{VI.2.7})$$

больше 0 и меньше 1. Теперь все члены неравенства можно сравнить с результатами экспериментов, достаточно рассмотреть экспериментальные данные, касающиеся эксперимента с двумя отверстиями, и выяснить, выполняется неравенство или нет. В случае эксперимента с двумя отверстиями это все можно сделать, и ответ очень прост: неравенство не выполняется.

АКАДЕМУС

Какой же из всего этого можно сделать вывод?

КАНДИДО

Вывод таков: *единственное существующее доказательство необходимости введения состояний суперпозиции как новых состояний материи, в которых*

некоторые наблюдаемые не принимают каких-либо реальных значений, — не верно. На самом деле все аргументы Фейнмана основаны на том, что, согласно теории, определенная величина должна быть суммой двух других, т. е. на том факте, что равенство

$$P(X) = P(1)P(X | 1) + P(2)P(X | 2) \quad (\text{VI.2.8})$$

(теорема составных вероятностей) должно быть верно, в то время как эксперименты доказывают, что (VI.2.8) не выполняется. Квантовая вероятность доказывает, что применение *этого равенства к данным, полученным в эксперименте с двумя отверстиями, не следует из теории, а вытекает из необоснованного применения теории*. Доказательство Фейнмана, следовательно, не обосновано.

АКАДЕМУС

Этот аргумент кажется убедительным. Вы уверены, что в обширной литературе, посвященной интерпретации квантовой теории, он всплывает лишь в контексте квантовой вероятности?

КАНДИДО

Основная идея, безусловно, оригинальна, но, как любая основательная теория, квантовая вероятность содержит в себе некоторые элементы всех предшествующих ей представлений о мире.

Возможно, человеком, который наиболее близко подобрался к тезису о квантовой вероятности, является А. Файн⁸. В 1973 г. он уже пытается сформулировать анализ эксперимента с двумя отверстиями способом, весьма похожим на квантовую вероятность, но, по-видимому, небольшое техническое различие привело его к другому выводу, т. е. к выводу в направлении квантовой логики.

АКАДЕМУС

Может быть, стоит вернуться и проследить ход его рассуждений.

КАНДИДО

Файн обсуждает возможную неправомерность аддитивности вероятностей несвязанных событий (которую он называет *законом суммарных вероятностей*) и указывает на то, что . . .

ФАЙН

Отказываться от закона суммарных вероятностей (закона сложения вероятностей) то же самое, что признать неклассическую природу вероятности в

⁸ А. Fine, *Probability and the Interpretation of Quantum Mechanics*, Brit. L. Phil. Sci. 24 (1973) 1–37 (в дальнейшем эту ссылку мы будем обозначать как PIQM).

квантовой механике. Если мы не хотим это делать, остается только один аспект, на котором нужно сосредоточиться. Это — дистрибутивный закон обычной пропозициональной логики⁹.

АКАДЕМУС

Похоже, он не противоречит квантовой логике.

КАНДИДО

В выводах — да, но необходимость анализа вероятностных аспектов возникает в связи с экспериментом с двумя отверстиями.

ФАЙН

Я обсуждал вопрос о том, что это — [в отношении квантовой механики] совершенно нормальное научное использование вероятности, использование в соответствии с теорией классической вероятности¹⁰.

АКАДЕМУС

Почему же тогда этот анализ не приводит его к тому же выводу, что и квантовая вероятность?

КАНДИДО

Анализируя эксперимент с двумя отверстиями, Файн также написал систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными величинами. Для него неизвестные величины также являются совместными вероятностями. Однако как коэффициенты этой системы (не просто равные 1 или 0) Файн рассматривает вероятности $P(X)$, $P(\text{non } X) = P(X^c)$, $P(1)$, $P(2)$.¹¹ Это происходит в силу того, что он считает доказанной возможность применения формулы Байеса. Для него это означает, что наши уравнения (VI.2.5), (VI.2.6) не являются дополнительными, и остаются только уравнения (VI.2.3) и (VI.2.4). По этой причине он всегда может говорить, что эти уравнения имеют решения.

ФАЙН

Эту формулу $[P(X \cap 1) = P(X | 1)P(1)]$ нельзя ему инкриминировать, поскольку она использует только определение условной вероятности¹²...

КАНДИДО

Как видите, Файн упустил из виду важнейший момент в квантовой вероятности. То есть то, что это *определение* на самом деле является аксиомой. Таким образом, Файн поддерживает схему фон Неймана и Макки.

⁹PIQM, p. 7.

¹⁰PIQM, p. 34.

¹¹Записи § 2 в статье PIQM здесь были изменены для того, чтобы они согласовывались с нашими записями.

¹²PIQM, p. 6.

ФАЙН

Я попытаюсь доказать, что при выделении этого подхода [Неймана и Макки] возникает общий контекст для использования вероятностных концепций, контекст, применимый как к квантовой, так и к классической физике, и в терминах которого квантовую физику можно рассматривать как совершенно обычный вариант статистической теории¹³.

КАНДИДО

Этот тезис, конечно же, верен, когда мы ограничиваемся вероятностями *относительно отдельного условия (подготовки)*. Но это не верно, когда, как в случае эксперимента с двумя отверстиями, рассматриваются несовместимые условия. С другой стороны, в те годы Файн вместе с Поппером, по-видимому, разделяли твердую *объективную* точку зрения на вероятность. Точку зрения, которая, как я полагаю, укреплялась в последующие годы.

ФАЙН

В конце концов, если мы настаиваем на том, что вероятности (включая связанные вероятности) являются реальными свойствами, то некоторые наблюдаемые просто не должны иметь их¹⁴.

VI.3. Электроны и бильярдные шары

АКАДЕМУС

В споре по поводу квантовой вероятности есть еще одна вещь, которая озадачивает меня: почему эта *теория с ограниченным применением классической вероятности в описании явлений природы* не возникла раньше? Что такого особенного есть в эксперименте с двумя отверстиями по сравнению с подбрасыванием монеток или бросанием кости? В чем различие?

КАНДИДО

Есть две причины различия: физическая и вероятностная.

Анализируя эксперимент с двумя отверстиями, Фейнман указывает на различие между двумя экспериментальными ситуациями, когда оба отверстия открыты: в одном случае нет прибора, который бы указывал, через которое из двух отверстий прошли частицы, во втором случае такой прибор

¹³A. Fine, *Probability in Quantum Mechanics and other Statistical theories*, p. 79. Для того, чтобы лучше понять последнее утверждение, см. обзорную статью L. Accardi, *L'edificio matematico della meccanica quantistica: situazione attuale*. In *Matematica e Fisica*, ed. E. Donini et al., De Donato (1977) 175–210.

¹⁴A. Fine, *Some Local Models for Correlation Experiments*, *Journ. Math. Phys.* 50 (1982) 279–294, p. 1310.

есть. С другой стороны, три разновидности эксперимента для экспериментальной оценки трех условных вероятностей

$$P(X), \quad P(X | 1), \quad P(X | 2)$$

не только различаются физически, но и несовместимы.

АКАДЕМУС

Это очевидно. В первом случае оба отверстия открыты, во втором открыто только отверстие 1, а в третьем — только отверстие 2. Никто не сомневается в несовместимости этих условий.

КАНДИДО

Но тогда почему Фейнман утверждает, что три различные вероятности, оцениваемые в трех совершенно разных и несовместимых экспериментах, должны непременно удовлетворять такому не совсем очевидному неравенству как (VI.2.7)?

АКАДЕМУС

Фейнман не утверждает этого: он ограничивается применением обычных правил в вычислении вероятностей.

КАНДИДО

Но мы только что доказали, что не всегда можно применять без критического подхода обычные правила вычисления вероятностей: прежде чем использовать их, нужно проверить, что такие неравенства, как (VI.2.7) (статистические инварианты), выполняются.

АКАДЕМУС

Полагаю, Фейнман думал о поведении макроскопических шаров. Если мы повторим эксперимент с двумя отверстиями, но вместо атомных или субатомных частиц используем пули или мраморные шары, то классическая вероятность может быть использована без каких-либо проблем.

Поэтому Фейнман прав, говоря, что электроны ведут себя совершенно иначе, чем шары.

КАНДИДО

Никто никогда не пытался отрицать это. В чем Фейнман ошибается, согласно квантовой вероятности, так это в том, что он утверждает, будто бы он доказал, что единственный способ объяснить такое *отличающееся поведение* — это подтвердить, что ненаблюдаемые шары теряют свою локализацию в пространстве, фактически расплываясь по вселенной и постоянно воссоединяясь в процессе измерения.

АКАДЕМУС

Вы продолжаете говорить, что то-то и то-то — не верно и поддерживать

Ваши утверждения формальными аргументами, которые не производят на меня никакого впечатления. Вы подтверждаете, что электроны ведут себя иначе, чем шары, но Вы ведь и не можете избежать этого, потому что эксперименты ясно говорят об этом; тогда, оставив все формальные разговоры и красноречие, Вы должны объяснить *физические причины столь различного поведения*. А поскольку все физические условия одинаковы как в микроскопическом, так и в макроскопическом случае, я не понимаю, каким образом Вы приходите к иным выводам, нежели Фейнман.

КАНДИДО

Квантовая вероятность, после разъяснения многих неявных допущений в анализе Фейнмана, приходит к диаметрально противоположному выводу: что удивительно, так это то, что три группы статистических данных, *полученных в различных и несовместимых экспериментах*, можно описать в пределах *той же самой классической вероятностной модели*. Ни один классический статистик не прибегнет к такому некритическому априорному допущению. Фейнман же, наоборот, явно допускает, что эта классическая вероятностная модель существует, и он поражен тем, что это ведет к противоречию с экспериментальными данными, и интерпретирует эти противоречия как доказательство того, что ненаблюдаемые объекты ведут себя иначе, чем наблюдаемые, не осознавая, что *противоречие существует не между теорией и экспериментом, а между его неявным допущением и экспериментом*.

АКАДЕМУС

Замечательно! Переходя на язык физики, то, о чем Вы говорите, равносильно утверждению, что согласно квантовой вероятности удивительным является то, что законы классической вероятности применимы к макроскопическим объектам, а не то, что они не применимы к микроскопическим объектам. Тогда, например, Фейнман должен быть поражен не тем, что идентичность (VI.2.8) не (всегда) справедлива в квантовой физике, а тем, что это справедливо для макроскопических объектов.

КАНДИДО

То, что Вы сказали, — несколько туманно и неопределенно. Правильная формулировка заключается в том, что *когда некоторые статистические данные получены в различных и несовместимых экспериментах, обычные правила классической вероятности a priori нельзя применять к этим данным: такое применение требует теоретической проверки независимо от того, касаются эти данные макроскопических или микроскопических объектов*. Именно эта проверка отсутствует в анализе Фейнмана.

АКАДЕМУС

Таким образом, Вы вновь подтверждаете, что согласно квантовой вероятности *поразительным является то, что законы классической вероятности применимы к пулям и не применимы к электронам.*

КАНДИДО

Если статистические данные о пулях получены в разных и несовместимых экспериментах, то я поддерживаю это. Квантовая вероятность, с одной стороны, пытается объяснить физические причины, в силу которых можно ожидать, что правила классической вероятности в одних случаях могут быть применены, а в других случаях — нет, и, с другой стороны, она обеспечивает посредством статистических инвариантов математический критерий, который позволяет решать, независимо от физических причин, *можно ли применить эти правила или нет.*

АКАДЕМУС

Вы объясняли математическое обоснование в предыдущем разделе. Давайте теперь послушаем, что Вы можете сказать о физических причинах.

КАНДИДО

Тот факт, что в эксперименте с двумя отверстиями мы столкнулись с тремя различными и несовместимыми экспериментами, означает, что невозможно осуществить три измерительные процедуры тогда, когда физические граничные условия являются одинаковыми в трех случаях.

Эти различия между тремя граничными условиями могут не восприниматься *достаточно крупными* объектами, например, пулями или макроскопическими объектами вообще, но может оказаться, что они важны для микроскопических частиц, таких как электроны.

АКАДЕМУС

Ясно, что никто не ожидает, что в том случае, когда пулями стреляют в экран, важно, имеется ли на экране одно или два отверстия и имеются ли отверстия вообще.

КАНДИДО

То, чего ожидают или не ожидают — менее важно, чем результаты экспериментов.

АКАДЕМУС

Но я ссылаясь именно на эти данные: каждый знает, что если эксперимент с двумя отверстиями повторен с использованием макроскопических частиц вместо электронов или нейтронов, результаты полностью согласуются с предсказаниями классической вероятности, как в том случае, когда во время эксперимента открыты два отверстия и когда производится сбор

данных в трех различных экспериментах, как в случае с атомными частицами.

КАНДИДО

Кроме того, в случае с макроскопическими частицами распределение частот на втором экране не меняется, когда прибор, который определяет, через какое отверстие прошла частица, расположен между двумя экранами. Это будет именно так, если Вы достаточно умны, чтобы расположить аппарат таким образом, чтобы он не мешал слишком большому числу пролетающих шариков.

АКАДЕМУС

Общеизвестно, что в таком случае никто не думает о проверке неравенств (VI.2.7), даже если относительные частоты были измерены в различных, несовместимых экспериментах. В этих случаях правила классической вероятности применяются без обсуждения, и при этом не возникает никаких противоречий.

КАНДИДО

Тот факт, что никто никогда не думал о проверке, не означает, что не предпринимать такой проверки — правильно.

Кроме того, для макроскопических объектов, таких как пули, априорное применение правил классического вычисления вероятности для статистических данных, полученных в несовместимых экспериментах, оправданы только в том случае, если выполняются определенные физические условия. Например, если рассматриваются шарики и экран из магнитного вещества, то для макроскопических шариков мы тоже ожидаем, что количество и положение отверстий на первом экране может влиять на распределение частиц на втором экране, по крайней мере тогда, когда скорость шариков не очень велика.

АКАДЕМУС

Это очевидно.

КАНДИДО

Тем не менее когда Фейнман изумлен тем, что не может применить правила классической вероятности к электронам, он явно экстраполирует это *безразличие к граничным условиям* от макроскопических к микроскопическим объектам.

Почему такая априорная экстраполяция считается физически обоснованной?

АКАДЕМУС

Эта экстраполяция не является самой собой разумеющейся с физической

точки зрения. Кроме того, все силовые линии каждого поля, например, гравитационного, зависят от граничных условий. Представление о том, что мелкие объекты более чувствительны к граничным условиям, чем макроскопические, не является неприемлемым.

В случае двух отверстий эти граничные условия представлены различными ситуациями, в которых рассматривается первый экран: оба отверстия открыты, открыто только отверстие 1 или только отверстие 2.

КАНДИДО

Почему при внесении источника света между двумя экранами восстанавливаются правила классической вероятности?

АКАДЕМУС

Это явление включено, по крайней мере, качественно, в квантовую теорию и имеет два аспекта: более простой, который уже объяснил Фейнман и согласно которому различия между тремя граничными условиями каким-то образом *скрываются* при внесении источника света.

КАНДИДО

Нетрудно понять, что *различие* имеется. Но трудно понять, почему это различие влечет за собой восстановление значимости правил классической вероятности.

АКАДЕМУС

Тот факт, что введение этого препятствия — источника света — восстанавливает правила классической вероятности, является более трудным для понимания явлением и для того, чтобы его понять до конца, необходимы некоторые формулы.

С качественной точки зрения мы можем сказать, что несправедливость правил классической вероятности, т. е. интерференционные кольца, обусловлены величиной, называемой *фазой*. Действие источника света, расположенного между экранами, вызывает *рандомизацию фаз*. Можно доказать, что такая рандомизация восстанавливает значимость теоремы составных вероятностей, т. е. правил классической вероятности.

Объяснение процесса разрушения интерференционных колец можно найти в уже упомянутой монографии Неймана, и оно пересматривалось многими авторами. Намики весьма изящно сформулировал эту теорию¹⁵. Другой автор, Экс¹⁶, допускал даже математическое обобщение принципа

¹⁵Mikio Namicki, Saverio Pascazio, *The Many-Hilbert-Space Approach to Quantum Measurements*, in *The interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, november 1994.

¹⁶J. Ax, *Group-Theoretic Treatment of the Axioms of Quantum Mechanics*, Reprinted from *Foundations of Physics* 6 (1976).

рандомизации фаз как основную аксиому, из которой выводится весь математический аппарат квантовой теории (см. разд. VII.3).

КАНДИДО

Как бы то ни было, я бы хотел подчеркнуть, для того, чтобы Вы могли понять суть этой проблемы, что строгого доказательства этого явления рандомизации фаз (в смысле не постулирования его, а вывода из законов квантовой динамики) пока не существует, за исключением отдельных моделей. Общая проблема в течение ряда лет оказывала упорное сопротивление усилиям многих хороших ученых.

Возвращаясь к эксперименту с двумя отверстиями, мы можем заключить, что приведенный выше анализ доказывает, что считать, будто результаты этого эксперимента свидетельствуют о классическом поведении (т. е. с хорошо определяемыми в пространстве и времени траекториями) частиц, — не верно: никто не может вывести возможность того, что микрообъекты перемещаются по хорошо определяемым траекториям с динамическими законами классического типа, но различными во всех трех случаях для различных граничных условий (т. е. для случаев с различным расположением экрана).

АКАДЕМУС

Но квантовая вероятность — это теория скрытых параметров: ее цель — вернуть траектории в квантовую теорию.

КАНДИДО

Это тоже не верно: говорить, что тот факт, что микрообъекты имеют четкие траектории во времени и пространстве, нигде не следует, это не то же самое, что говорить, что целью квантовой физики является детальное описание таких траекторий. Согласно принципу Гейзенберга (разд. III.5), такое описание вообще-то возможно. Анализ квантовой вероятности ограничился идентификацией ошибок всех тех доказательств, которые требовали выкинуть понятие траектории из физической интуиции, заявляя, что простейшее подтверждение ее существования ведет к противоречию с экспериментальными данными.

АКАДЕМУС

Но идентификация ошибки не является положительным результатом.

Может ли квантовая вероятность доказать, хотя бы в случае эксперимента с двумя отверстиями, что экспериментальные данные не противоречат утверждению о том, что ненаблюдаемые частицы ведут себя как наблюдаемые, т. е. они проходят через одно и только одно из двух отверстий или движутся по определенной траектории?

КАНДИДО

Это просто. Предположим, что N частиц достигли экрана Σ_2 , а $N(X)$ — число частиц, пришедших в область X : это наблюдаемые величины, т. е. измеряемые экспериментально.

Допуская, что частицы проходят через одно и только одно из двух отверстий, $N(1)$ частиц, прошедших через отверстие 1, и $N(2)$, прошедших через отверстие 2, попадут в Σ_2 .

Таким же образом именно $N(X \cap 1)$ частиц, прошедших через отверстие 1, и $N(X \cap 2)$ частиц, прошедших через отверстие 2, попадут в область X .

АКАДЕМУС

Отметим, что значения

$$N(1), N(2), N(X \cap 1), N(X \cap 2) \quad (\text{VI.3.1})$$

являются чисто *платоновыми*: они не наблюдаются без введения другого измерительного прибора, который, если частицы микроскопичны, может вызвать изменение в поведении частиц, так что значения, которые мы измеряем, совершенно отличны от тех, которые *существуют* в отсутствие измерения.

КАНДИДО

Мы действительно не можем экспериментально измерить значения в (VI.3.1). Но согласно реалистической гипотезе мы должны признать, что общее число частиц, пришедших на второй экран, эквивалентно количеству частиц, прошедших через отверстие 1, плюс количество частиц, прошедших через отверстие 2. В формуле это выглядит:

$$N = N(1) + N(2). \quad (\text{VI.3.2})$$

АКАДЕМУС

Точно также Вы должны допустить, что количество частиц, пришедших в область X , на экране равно количеству частиц, пришедших в область X и прошедших через отверстие 1, плюс частицы, пришедшие в область X , пройдя через отверстие 2. Другими словами:

$$N(X \cap 1) + N(X \cap 2) = N(X). \quad (\text{VI.3.3})$$

КАНДИДО

Именно так. Кроме того, поскольку приняты реалистические гипотезы

зы (VI.3.2) и (VI.3.3), фракция частиц, пришедших в область X , записывается как:

$$\frac{N(X)}{N} = \frac{N(1)}{N} \frac{N(X \cap 1)}{N(1)} + \frac{N(2)}{N} \frac{N(X \cap 2)}{N(2)}, \quad (\text{VI.3.4})$$

и левая часть равенства соответствует наблюдаемой относительной частоте, т. е. $P(X)$. Кроме того, используя те же записи предыдущего обсуждения и обозначив относительные частоты как вероятности:

$$P(1) = N(1)/N, \quad P(2) = N(2)/N,$$

(VI.3.4) превращается в

$$P(X) = P(1) \frac{N(X \cap 1)}{N(1)} + P(2) \frac{N(X \cap 2)}{N(2)}. \quad (\text{VI.3.5})$$

АКАДЕМУС

Но тогда Вы приходите к тому же противоречию, что и Фейнман. Если заменить относительные частоты на условные вероятности, равенство (VI.3.5) можно записать в виде:

$$P(X) = P(1)P(X | 1) + P(2)P(X | 2), \quad (\text{VI.3.6})$$

поскольку экспериментальные данные (для каждого выбора $P(1)$, $P(2)$):

$$P(X) \neq P(1)P(X | 1) + P(2)P(X | 2). \quad (\text{VI.3.7})$$

КАНДИДО

Ваша ошибка заключается в том, что Вы выводите (VI.3.6) из (VI.3.5). Оба соотношения (VI.3.5) и (VI.3.7) верны, но теперь они не противоречат друг другу. Первое на самом деле является замечанием относительно частиц *Платона*, второе — соотношением между величинами, измеряемыми экспериментально. Единственный вывод, который мы можем сделать, если оба соотношения одновременно справедливы, это:

$$P(X | 1) \neq \frac{N(X \cap 1)}{N(1)} \quad \text{или} \quad P(X | 2) \neq \frac{N(X \cap 2)}{N(2)}. \quad (\text{VI.3.8})$$

Но из неравенств (VI.3.8) не следует никаких противоречий с экспериментальными данными, поскольку обе их части относятся к совершенно

разным условиям экспериментов. Кроме того, левая часть — наблюдаемое. А правая — не наблюдаемое в принципе. Слабым местом в анализе Фейнмана является допущение, что в (VI.3.8) значимы равенства, а не неравенства.

АКАДЕМУС

Эйнштейн говорил, что Творец знает эти числа. Так что для него величины $N(1)$, $N(2)$, $N(X \cap 1)$, $N(X \cap 2)$ являются наблюдаемыми.

КАНДИДО

Это не меняет дела: даже если господь в духе Лапласа мог узнать величины $N(1)$, $N(X \cap 1)$, ..., единственное, что он мог вывести из неравенств (VI.3.8), — это то, что количество прибытий в область X через отверстие 1 изменяется в зависимости от того, проводился ли эксперимент при открытом или же при закрытом отверстии 2. То же самое справедливо и для другого отверстия.

Такой вывод абсолютно нормален с физической точки зрения: это означает только, что микрочастицы весьма чувствительны к взаимодействию с экраном Σ_1 и поэтому к различным ситуациям на этих экранах (открыто одно или два отверстия...). Такой вывод, конечно же, не противоречит какому-либо факту или теории.

АКАДЕМУС

Если я правильно понял, анализ квантовой вероятности выдвигает некоторые новые предложения, возникшие в ходе обсуждения основ квантовой теории.

I) Предложение интерпретировать результат эксперимента с двумя отверстиями, как экспериментальное доказательство того факта, что некоторые законы классической вероятности (а именно, все те, в формулировке которых принимает участие простая формула условных вероятностей) должны интерпретироваться как утверждения, *зависящие от определенной математической модели*, а не как универсальные законы вероятности.

II) Утверждение о существовании множества вероятностных моделей, так же как и множества геометрических моделей: математика должна изучать, развивать и классифицировать эти модели, физика же должна устанавливать, которая из них наилучшим образом подходит для описания природы.

III) Утверждение, что все так называемые *парадоксы квантовой теории* происходят из-за необоснованного применения правил классической вероятности (как правило, теоремы составных вероятностей) для статистических данных, которые нельзя описать классической вероятностной моделью.

IV) Утверждение, что нет никакой необходимости постулировать *объективную вероятность*, соответствующую внутреннему индетерминизму природы, обычно квантовому, в противоположность *субъективной вероятности*, которая отражала только незнание и была типичной для классической физики. На самом деле, как мы это увидим в разд. IX.3, в некоторых случаях *единственным способом интерпретировать экспериментальные данные квантовой теории является допущение существования детерминистского поведения.*

КАНДИДО

Второе утверждение особенно важно: поскольку операции, с помощью которых оцениваются так называемые *квантовые вероятности*, являются точно такими же, как и те, с чьей помощью оценивается любая другая вероятность в физике, нет никаких оснований для того, чтобы приписывать термину *вероятность* в квантовой теории значение, отличающееся от обычного.

ФЕЙНМАН

... Концепция вероятности не меняется в квантовой механике... и не требуется никаких отклонений от концепций классической статистики...

КАНДИДО

В особенности, в полном соответствии с тезисом, который в полемике многократно поддерживал Эйнштейн, ничто не мешает утверждать, что информация, которую дают вероятности в квантовой теории, касается множеств идентично подготовленных наборов, совсем как в статистической механике. В обоих случаях представляется одна и та же система...

ГЕЙЗЕНБЕРГ

... чтобы стать образцом, случайно выбранным из безграничного статистического множества идентично построенных систем...

АКАДЕМУС

Даже принимая идентичность *интерпретаций* вероятности в квантовой теории и в любой статистической теории, все еще остается проблема определения *источника* такой вероятности: обусловлен ли вероятностный элемент в описании микроскопического мира нашим ошибочным знанием законов, управляющих его явлениями, или, скорее, микросистемы не следуют точным детерминистским законам, но делают выбор на основе того, что Поппер называл *склонностями*, объективным отражением которых является вероятность? Эта проблема уже обсуждалась в разд. II.4.

КАНДИДО

Поппер определенно великий философ, но ограниченность его анализа, касающегося квантовой физики, заключается в том, что ему никогда не удава-

лось понять ее специфические элементы, отличающие ее от других статистических теорий. В особенности, в его *теории склонности* нет ничего, что могло бы иметь значение для *любой* статистической теории. Это говорит о том, что такая теория не способна объяснить новые явления, возникающие в квантовой вероятности по сравнению с классической вероятностью, а именно интерференционные члены.

VI.4. Квантовый парадокс Зенона

КАНДИДО

Другой интересный случай, в котором запрещенное применение формул для вычисления классической вероятности ведет к парадоксальным ситуациям, — это так называемый *квантовый парадокс Зенона*.

АКАДЕМУС

Вы подразумеваете, что в этом случае мы находимся в ситуации, аналогичной той, которая имеет место в эксперименте с двумя отверстиями?

КАНДИДО

Аналогичной, но менее глубокой: статистические данные по эксперименту с двумя отверстиями не могут быть описаны в рамках *какой бы то ни было* модели классической вероятности, в этом случае стандартные правила классической вероятности неприменимы.

Напротив, квантовый парадокс Зенона возникает из попытки применить модель классической вероятности весьма специфического типа (так называемые *Марковские процессы*). В этом случае правильное применение стандартных правил классической вероятности достаточно для преодоления непонимания, и нет необходимости прибегать к более изощренному методу статистических инвариантов.

АКАДЕМУС

Смысл так называемого *квантового парадокса Зенона* состоит в том, что непрерывное наблюдение остановило бы эволюцию.

КАНДИДО

Означает ли это, что если я непрерывно наблюдаю за предметом, то он не может измениться?

АКАДЕМУС

Да.

КАНДИДО

Тогда, если я возьму радиоактивное вещество, помешу его в комнату, а

вокруг него установлю счетчики Гейгера, вещество никогда не будет распадаться, поскольку я за ним наблюдаю?

АКАДЕМУС

Вовсе нет! Конечно же оно начнет, рано или поздно, распадаться и именно с той скоростью, которую предсказывает квантовая теория.

КАНДИДО

Так что же мы собираемся делать с так называемым *квантовым парадоксом Зенона*?

АКАДЕМУС

Некоторые думают, будто этот парадокс демонстрирует, что постулат о периодическом и мгновенном коллапсе должен быть заменен более реалистической трактовкой.

КАНДИДО

У меня есть идея! Мы должны обратиться к квантовому эффекту Зенона для объяснения всего того, что физики хотели бы видеть, но не могут увидеть. По крайней мере некоторые проблемы были бы решены . . .

АКАДЕМУС

Не кажется ли Вам, что Вы смешны? В одном авторитетном физическом журнале есть статья¹⁷, в которой авторы пытаются объяснить неудачную попытку показать распад протонов в ядре с помощью квантового эффекта Зенона. Однако общественность отреагировала на это крайне негативно.

КАНДИДО

Как если бы они сказали: разглагольствуя об основах, можете спокойно произносить вслух все, что приходит Вам в голову, но не смейте смешивать этот бред с реальной физикой.

АКАДЕМУС

Не думаю, что негативная реакция вызвана идеологическими причинами. Статью восприняли так же, как и любую другую научную статью.

АКАДЕМУС

С другой стороны, этот парадокс также имеет научную основу. Но на этот раз не экспериментальную, как в случае с двумя отверстиями, а математическую: если мы вычисляем связанную вероятность, когда частица находится в положении x_1 в момент t_1 , в положении x_2 в момент t_2 , . . . , в положении x_n в момент t_n , то когда n , т. е. число измерений, становится большим,

¹⁷Physical Review Letters Val 50 (1983) 1184; L. P. Horwitz, E. Katznelson, *Is proton decay measurable?*

эта величина действительно не отличается от 1. Эта идея возникла благодаря Мисре и Сударшану¹⁸.

КАНДИДО

Я хорошо знаком с ней и поражен, что она все еще существует, хотя хорошо известно, что в ее основе лежит простое математическое непонимание: авторы этого парадокса применяют формулы, используемые для вычисления связанных вероятностей в цепях Маркова с непрерывным временем для вероятностей перехода, вычисляемых по правилам квантовой механики. Однако для того, чтобы применять эти формулы, необходимо, чтобы выполнялось определенное условие совместимости¹⁹, условие, которое не выполняется в соответствии с вероятностями перехода, предсказанными квантовой механикой²⁰. Это было выяснено много лет тому назад²¹.

Легко строить парадоксы с помощью математических формул, когда а priori известно, что в данных ситуациях такие формулы использовать нельзя.

АКАДЕМУС

Вы всегда хотите все свести к математике и забываете, что физика — это экспериментальная наука. В данном случае, несмотря на Вашу сложную математику, эксперименты говорят прямо. Итано, Хайнзен, Боллингер и Вайнланд²² осуществили следующий эксперимент: подготовили некоторое количество (около пяти тысяч) атомов бериллия таким образом, что все они находились в своем основном состоянии (т. е. в состоянии, когда энергия минимальна). При помещении в магнитное поле атомы возбуждаются, т. е. переходят на более высокий энергетический уровень. Но если мы станем рассматривать их с помощью лазерного луча, процент возбужденных атомов уменьшится, и чем чаще производится такое наблюдение, тем больше уменьшение, и оно будет продолжаться до тех пор, пока такие атомы не исчезнут вовсе, когда наблюдения станут очень частыми (около 0,004 сек.).

¹⁸Due to Baidyanath Misra and George Sudarshan, *The Zeno's paradox in quantum theory*, Journal of Mathematical Physics (1977).

¹⁹Известное как уравнение Чепмана — Колмогорова.

²⁰О математическом анализе квантового парадокса Зенона, см. L. Accardi, *The probabilistic roots of the quantum mechanical paradoxes*, in *The wave-particle dualism*, ed. S. Diner et al., Reidel (1984) 297–330, а также критическую дискуссию по поводу результатов эксперимента в статьях V. Frerich, A. Schenzle, Phys. Rev. A (1991) 1962 и S. M. Chumakov, K. E. Hellwig, A. L. Rivera, Phys. Letters A (1995) 73–82.

²¹L. Accardi, *The probabilistic roots of the quantum mechanical paradoxes*, in *The Wave Particle Dualism*, ed. S. Diner et al., Reidel (1984) 297–330.

²²W. H. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger and D. J. Wineland, Physical Review A 41 (1990) 2295–2300.

Вот Вам и экспериментальное доказательство квантового парадокса Зенона.

КАНДИДО

Поскольку речь зашла о математике, я бы хотел подчеркнуть, что в настоящее время многие физики принимают то объяснение *парадокса*, которое я только что описал. Поскольку речь идет о физике, я был бы очень осторожен.

Часто погоня за сенсацией может сыграть злую шутку. Для того, чтобы доказать квантовый парадокс Зенона, было бы необходимо показать, что *любое* частое наблюдение предотвращает *любой* переход. То, о чем Вы говорите, кажется мне интересным экспериментом, рассматривающим определенный процесс подавления относительно определенной ситуации. Совершенно очевидно, что существует много таких процессов, но этот не имеет ничего общего с универсальностью явления, предсказанного парадоксом Зенона.

Если бы такая универсальность действительно имела место, я бы ожидал, что начиная с 1900 г. осуществлялась бы огромная исследовательская работа для того, чтобы получить лучшее управление этой возможностью космического вето. Цена действительно велика. Это повод . . .

ГРЕКО

. . . приписать наблюдателю ту же силу, которую еврейский бог дал Джошуа на один только день: останавливать время. Огромную силу²³.

КАНДИДО

Если бы такое было возможно, можно было бы получить синтез без вытекания плазмы из магнитной бутылки, а болезни могли бы лечить *квантовые сиделки*, и т.д. . . .

АКАДЕМУС

На самом деле я не думаю, что упомянутая Вами работа вызвала появление в течение всего периода, начиная с 1900 г., того количества работ, которое мы могли бы ожидать в случае, если это на самом деле не было бы одним из множества процессов подавления, а действительно было бы всеобщим явлением.

КАНДИДО

Однако изоляция представляет собой явление с социологическими причинами, и это не означает, что результат не имеет значения. Этот эксперимент ставит передо мной несколько вопросов о том, что имеется в виду под *экспе-*

²³Pietro Greco, *I «guardoni» del tempo*, L'Unità 29.10.1992.

риментальной проверкой утверждения в современной науке. Я думаю, что необходимо и дальше размышлять над этим экспериментом и разъяснить раз и навсегда всем, что же на самом деле доказано.

АКАДЕМУС

Некоторые соображения в этом направлении уже имеются, и результаты не кажутся авторам этой работы обнадеживающими.

БАЛЛЕНТАЙН

Путаница и противоречия начались с объяснения эксперимента Итано и др., которые интерпретировали его, исходя из того, что реальность коллапса доказана. Это вызвало поток теоретических статей²⁴. В каждой из них доказывалось, что результаты экспериментов могли быть полностью объяснены без допущения коллапса вектора состояния²⁵.

КАНДИДО

Подведем итог: если кто-то хочет назвать *квантовый парадокс Зенона* набором обычных явлений подавления, то это касается всего лишь названия, и, преодолев определенную неприязнь к погоне за сенсациями, это можно принять. Если же напротив, кто-то провозглашает, как в оригинальной статье Мисры и Сударшана, что мы имеем дело с *всеобщим явлением*, возникают следующие философские вопросы.

Предположим, физики хотят принять аргумент, основанный на квантовом эффекте Зенона, для объяснения явления, которого они не могут наблюдать.

Как они тогда объяснят то, что они могут наблюдать?

АКАДЕМУС

Я предлагаю оставить этот вопрос для философии науки и продолжить разговор о предмете нашего обсуждения, иначе мы рискуем не добраться до конца.

КАНДИДО

Рассматривая попытки ввести вероятности связанных событий (также называемых *историями* в физической литературе), я недавно услышал о *теории квантовых историй*. Что это такое?

АКАДЕМУС

Это очень просто. Как мы уже видели, различие между классической и квантовой ситуациями представлено *интерференционными членами*. Вооб-

²⁴A. Peres, A. Ron, Phys. Rev. A 42 (1990) 5720; L. E. Ballentine, Phys. Rev. A 43 (1991) 5165; E. Block, P. R. Berman: Phys. Rev. A 44 (1991) 1962.

²⁵L. A. Ballentine, *The outlook from the quantum theory of measurement*, in *The interpretation of quantum theory: Where do we stand?*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana (1994).

ше в квантовой ситуации связанные вероятности, т. е. вероятности *историй*, нельзя определить.

КАНДИДО

Но не все связанные вероятности касаются *историй*, они могут также касаться *конфигураций* или многих других вещей...

АКАДЕМУС

Приверженцы этой теории ограничиваются рассмотрением связанных вероятностей *одного и того же наблюдаемого в разные моменты времени*. На это можно корректно сослаться как на *вероятности историй*.

КАНДИДО

А что нового дает эта теория?

АКАДЕМУС

Она утверждает, что, когда интерференционные члены исчезают, можно определить связанные вероятности, и поэтому имеет смысл говорить об истории системы в обычном смысле.

КАНДИДО

И это все?

АКАДЕМУС

Некоторые говорят, что это утверждение ... *можно было бы рассматривать как основную формулу квантовой механики*²⁶.

КАНДИДО

Думаю, что высказывание о том, что если интерференционные члены исчезают, то мы приходим к классической ситуации, является тривиальным или даже тавтологией, поскольку, по определению, интерференционные кольца являются просто разницей между классическим и квантовым случаями. С другой стороны, имеются ситуации, когда эти интерференционные члены стремятся исчезнуть через достаточно большой промежуток времени. Для физики интересно проанализировать эти механизмы, однако я не вижу ничего *фундаментального* в этой любопытной технической проблеме.

²⁶M. Gell-Mann, J. B. Hartle, *Quantum Mechanics in the light of Quantum Cosmology*, in *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, ed. W. Zurek, Addison-Wesley (1991) 425–458.

ГЛАВА VII

VII.1. Сравнение различных решений

КАНДИДО

До сих пор мы обсуждали три различных вывода, вытекающих из противоречия между теоретическими ожиданиями и экспериментальными данными, полученными в опыте с двумя отверстиями:

- ортодоксальное объяснение: в отличие от того, что происходит с *наблюдаемыми* частицами, некоторые наблюдаемые, рассматриваемые как *ненаблюдаемые частицы*, находящиеся в состоянии суперпозиции, имеют только *виртуальные*, а не действительные значения;
- объяснение с позиций квантовой логики: в отличие от того, что происходит с наблюдаемыми частицами, заключения в отношении ненаблюдаемых частиц, находящихся в состоянии суперпозиции, не сочетаются с правилами Аристотеля;
- объяснение с позиций квантовой вероятности: статистические данные, полученные в эксперименте с двумя отверстиями (т.е. вероятности $P(X)$, $P(X | 1)$, $P(X | 2)$), в результате трех несовместимых экспериментов не могут быть описаны одной только моделью Колмогорова.

АКАДЕМУС

Ортодоксальное объяснение и объяснение с позиций квантовой логики защищены от каких-либо опровержений, не отрекаясь при этом от чего-либо, действительно представляющего интерес для физики, т.е. наблюдаемых ожиданий.

КАНДИДО

Верно: если я говорю, что что-то происходит только тогда, когда никто не пытается проверить, действительно ли это происходит, я защищен от каких-либо опровержений, сделанных на основании экспериментальных данных, но при этом нахожусь вне каких-либо утверждений, сделанных на

основании экспериментальных данных же, и поэтому я нахожусь вне науки. Таким образом, логика физики сохраняется с помощью введения на уровне интерпретационных основ метафизического допущения. Старый враг становится союзником и спасителем.

АКАДЕМУС

Но ортодоксальная интерпретация по крайней мере говорит мне что-то о реальности. Это может быть неприятно для интуиции простых людей, но это касается природы, реальности. . . квантовая же вероятность, напротив, является чем-то абстрактным и рассматривает модели, аксиомы, определения. . .

КАНДИДО

Кажется странным защищать именем реальности теорию, которая требует отхода от реализма.

Точка зрения с позиций квантовой вероятности, напротив, приходит к своим выводам только на основании математического анализа экспериментальных данных, т. е. относительных частот $P(X)$, $P(X | 1)$, $P(X | 2)$. Поэтому она должна быть ближе стилю мышления физиков.

АКАДЕМУС

Тогда квантовая вероятность хочет доказать правильность *наивной* точки зрения на физическую реальность или логику Аристотеля.

КАНДИДО

Ничего подобного! Хотя квантовая вероятность, освобождая себя от необходимости допускать различное поведение *наблюдаемых* и *ненаблюдаемых* объектов, освобождает и нас от необходимости сохранять логику физики, обращаясь к таким метафизическим приемам, как *коллапс волнового пакета*.

АКАДЕМУС

Но должен же существовать некий *коллапс*, если вы допускаете существование состояний, в которых некоторые наблюдаемые принимают только виртуальные значения.

КАНДИДО

Ортодоксальная точка зрения и точка зрения с позиций квантовой логики вынуждены допускать физическое существование таких состояний для того, чтобы избежать противоречий с экспериментальными данными. К сожалению, как мы видели ранее, все парадоксы квантовой теории являются неизбежными следствиями таких допущений.

Квантовая вероятность не требует ничего подобного: математический результат, показывающий, что лишь некоторые статистические данные поз-

воляют построить модель на базе классической вероятности, физически оправдан различием и несовместимостью граничных условий, т. е. условиями той подготовки, с помощью которой и были получены эти данные.

АКАДЕМУС

Этого обращения к граничным условиям, конечно же, недостаточно для того, чтобы гарантировать а priori использование неклассической вероятностной модели.

КАНДИДО

Но его достаточно для того, чтобы оправдать это а posteriori, т. е. тогда, когда получены экспериментальные данные.

АКАДЕМУС

Но все еще остается фактом, что выбор того, хочу ли я принимать интерпретацию квантовой вероятности, квантовой логики или ортодоксальную, зависит исключительно от моего желания. Каждый имеет свое представление о том, что правильно, а что неверно, и все эти представления заслуживают уважения.

КАНДИДО

Я согласен с тем, что любая идея заслуживает уважения, но это не означает, что все они одинаково сильны: их теоретический статус на самом деле может быть различным.

Например, если принята точка зрения с позиций квантовой вероятности, гипотезы, выдвинутые ортодоксальной интерпретацией или квантовой логикой, становятся *лишними* в том смысле, что нет необходимости обращаться к странному поведению ненаблюдаемых объектов для того, чтобы оправдать невозможность применения модели классической вероятности к определенному набору экспериментальных данных: достаточно обратиться к различным несовместимым условиям проведения экспериментов, в которых были получены эти данные.

Напротив, совершенно неверно, что если приняты ортодоксальная точка зрения или точка зрения с позиций квантовой логики, то теория квантовой вероятности становится ненужной.

АКАДЕМУС

Я не вижу причину такой асимметрии.

КАНДИДО

Невозможность описания статистических данных, полученных в эксперименте с двумя отверстиями, в рамках модели классической вероятности доказана с использованием только этих данных и *не зависит от каких-либо интерпретаций*.

АКАДЕМУС

Я понимаю, что Вы имеете в виду: и ортодоксальную интерпретацию, и интерпретацию с позиций квантовой логики *нельзя считать альтернативами квантовой вероятности, а лишь ее дополнением*. Это означает, что тот, кто принял одну из этих точек зрения, *помимо отхода от интуитивных представлений о физической реальности или логики Аристотеля, должен также отойти от модели классической вероятности*. Отход от такой модели поэтому не может обойти вниманием *ни одна* интерпретация, как современная, так и будущая, какой бы заумной она не являлась. Это неверно для реализма или классической логики.

КАНДИДО

Ортодоксальная точка зрения и точка зрения с позиций квантовой логики должны использовать положения, которые в принципе экспериментально нельзя проверить. Они могут *доказать* свою необходимость лишь основываясь на предположении (которое оказалось беспочвенным) об универсальной значимости модели, построенной на классической вероятности.

Напротив, квантовая вероятность позволяет играть роль только экспериментально измеряемым величинам и, начиная с них, доказывает, что она необходима, приводя к тому, что две другие точки зрения становятся лишними.

АКАДЕМУС

Эта точка зрения строго противоположна той, которая, по-видимому, достаточно широко распространена и согласно которой...

ШТРАУС

...ограничение применения обычной вероятностной теории обусловлено только тем, что обычные вычисления теорем не являются правильными¹.

ФИНКЕЛЬШТЕЙН

... *Какими бы ни были проблемы, которые должны были бы остаться при анализе вероятностей, они не имеют ничего общего с квантовой механикой*²...

АКАДЕМУС

Штраусс и П. Суппес выявляют корни недостаточности классической логики при ограниченном использовании соединений *и* и *или* в изложении кван-

¹M. Strauss, *The logic of complementarity and foundations of Quantum Mechanics*, in C. A. Hooker (ed.), *The Logico-Algebraic approach to Quantum Mechanics*, Vol. 1, pp. 27-44, Reidel, 1975.

²D. Finkelstein in C. A. Hooker (ed.), *The Logico-Algebraic approach to Quantum Mechanics*, Vol. 1, Reidel, 1975, p. 194.

товых событий; другими словами, в невозможности придать общее значение связанным событиям (или группе событий). Напротив, Финкельштейн и Путнам находят их в повсеместном отсутствии значимости дистрибутивного закона.

КАНДИДО

Однако мы видели, что повсеместное отсутствие значимости дистрибутивного закона касается области *ненаблюдаемого в принципе* и потому не касается физики. Относительно возможности определения связанных вероятностей $P(A \text{ и } B)$, $P(A \text{ и } B')$, начиная с условных, используя формулу Байеса, нужно отметить, что такое определение может иметь математическое значение *даже в том случае, если события A , B (соответственно A , B') являются несовместимыми* и такие вероятности поэтому сравнимы с любыми экспериментальными данными. Это означает, в частности, что в противоположность утверждению Штраусса и Суппеса, из того факта, что вероятности, *сравнимые с экспериментальными данными*, могут не определяться сочетанием двух событий, не вытекает возможность того, что вообще существует классическая модель. В этом случае ограничение применения вычислений классической логики также не обязательно подразумевает ограничение вероятностной модели.

С другой стороны, нельзя даже утверждать, что булевское представление данного набора положений, вообще говоря, подразумевает существование по крайней мере одной классической статистической модели для набора статистических данных, относящихся к таким положениям.

АКАДЕМУС

Не только наличие наблюдаемых событий, сочетание которых не является наблюдаемым событием, является типичным лишь для квантового контекста. Это было показано Купманом с помощью следующего примера со счетчиком: давайте рассмотрим два типа крысиного яда 1 и 2 и группы одинаково подготовленных к эксперименту мышей. Давайте рассмотрим две наблюдаемые величины:

A = количество дней выживания мыши, которой был введен только яд 1;

B = то же самое для яда 2.

Два события $[A = n]$ и $[B = m]$, где n и m являются целыми числами, можно очень хорошо наблюдать, но объединение их, т. е. $[A = n] \text{ и } [B = m]$ не имеет значения в том случае, если относится к одному индивидууму, потому что мелкие животные могут погибнуть либо только от яда 1, либо только от яда 2, а не *только от яда 1 и только от яда 2*. Поэтому два

наблюдаемых A и B нельзя измерить у одного и того же индивидуума в одно и то же время.

КАНДИДО

Да, но мы должны сказать, что эти идеальные эксперименты с цианидом и кошками, а также с отравленными мышами при рассуждениях об основах квантовой теории — вещь довольно жестокая. Тем не менее давайте суммируем:

- ограничение применения классического исчисления предложений к системе утверждений не вызывает ограничения применимости классических вероятностных моделей к такой системе, а также не характерно для квантовой теории;
- из безусловного применения классического исчисления предложений к системе утверждений не следует, что классическая вероятностная модель может быть применена к такой системе.

АКАДЕМУС

Но тогда *не может быть никакого вероятностного аргумента в пользу использования неклассической логики, также как и не может быть никакого логического аргумента в пользу использования неклассической вероятности.*

КАНДИДО

Мы должны отметить не только это, но и то, что относительно *необходимости* введения неклассического исчисления предложений для того, чтобы иметь дело с утверждениями, касающимися квантовой теории, в противоположность тому, что происходит с вычислениями вероятностей:

- в литературе нет доказательства этой *необходимости*, основанной только на экспериментальных данных;
- такое доказательство в принципе не может существовать, потому что классическая логика экспериментально подтверждается каждый раз, когда имеет дело с утверждениями о совместимых событиях, в частности, каждый раз, когда эксперимент производится с целью ее проверки.

Таким образом, неклассические аспекты исчисления предложений (например, отсутствие значимости дистрибутивного закона) могут рассматривать только положения, относящиеся к ненаблюдаемым объектам как таковым. Иными словами, по определению, они не могут проявляться, если

эксперимент производится для того, чтобы выявить их наличие (объект наблюдается). Это автоматически ставит вопрос о необходимости использования небулевых моделей исчисления предложений вне вычислений, которые могут быть выполнены посредством сочетания критического анализа экспериментальных данных с явным утверждением посылок умозаключений (в отличие от того, что имеет место для вероятностных моделей), что находится вне галилеевых наук. Квантовая логика представительна лишь как спекуляция. Но ее заявления по поводу того, что она может быть проверена экспериментально, абсолютно беспочвенны.

РОДАРИ

Я бы хотела узнать, является ли квантовая логика просто названием или же научной дисциплиной во всех отношениях³.

АКАДЕМУС

Конечно же она является научной дисциплиной: многие люди говорят, что они интересуются *квантовой логикой*, на эту тему написано множество статей, имеется даже общество, которое, несмотря на туманное название, на самом деле состоит в основном из людей, занимающихся этой темой. Что еще Вам нужно для существования научного направления?

КАНДИДО

Возможно, вопрос был не об академических структурах и количестве адептов, а о *научном содержании*.

АКАДЕМУС

Неопределенность! Кто может заранее думать о научном содержании? Если имеется достаточное количество адептов для продолжения деятельности, получения финансирования для организации конгрессов и позиций для нового поколения, то это направление существует по определению.

КАНДИДО

Если все сводится только к этому, то я не вижу, каким образом можно отличить научное направление от религиозной секты. Я думаю, что научное направление должно также иметь дело с ответами, которые оно может дать на те вопросы, благодаря коим оно и возникло. Ни одна научная дисциплина никогда не решает всех стоящих перед ней вопросов, но когда неразрешимые проблемы остаются десятилетиями, в течение которых невозможно понять, есть ли какой-либо прогресс, и если есть, то в каком направлении, то, вероятно, настало время, чтобы подумать о теоретическом статусе данной дисциплины.

³Paola Rodari, in *Meccanica Quantistica*, SISSA, Quaderni di divulgazione, CUEN (1995), p. 63.

VII.2. Критика квантовой вероятности

АКАДЕМУС

Эта квантовая вероятность не кажется мне чем-то по-настоящему новым: физики уже в течение почти 70 лет знают о том, что вероятностная модель квантовой теории не является классической.

КАНДИДО

Они научились использовать эти правила, но не различать их теоретически от правил классической вероятности. Из этого вырос огромный замок на песке: некритическое применение правил классической вероятности привело их к ожиданию того, что опровергалось результатами экспериментов. Вместо того, чтобы удивляться, если при применении таких правил к таким данным получался хороший результат, они пытались объяснить эти противоречия, вводя странные физические свойства, такие как нереальность, нелокальность и несепарабельность...

Анализ Фейнманом эксперимента с двумя отверстиями действительно типичен для такого отношения. Примерно через двадцать лет после Фейнмана Белл, сам того не понимая, вновь пойдет по этому же пути.

АКАДЕМУС

Но тогда не прав был не только Фейнман, но и все специалисты в мире, занимающиеся вероятностью, которые применяли эти правила без тени сомнения в течение более чем двухсот лет.

КАНДИДО

Это неверно, поскольку невозможность применения некоторых правил классической вероятности к определенным наборам данных не противоречит никакому *результату* классической теории вероятностей, а лишь следует из существования ограничения на *применение* этой теории в описании явлений природы.

Эти ограничения могут подвергаться априорному изучению, т. е. можно развивать теорию, позволяющую решить а priori, применимы ли правила классической вероятности к данному набору статистических данных.

Специалисты в области классической вероятности узнали о существовании таких ограничений в 30-х гг., благодаря работам Рамсея и де Финетти, и назвали их *условиями совместимости*. Статистические инварианты, введенные квантовой вероятностью, являются способом соединения этой идеи с экспериментальными данными.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что идея о множественности вероятностных моделей, схожая с идеей о множественности геометрических моделей, возникла уже в классической теории вероятностей?

КАНДИДО

Спор о вероятностных аксиомах — очень старый и в течение первой половины XX в. он был особенно жарким. Фон Мизес возродил теорию Бернулли о том, что понятие вероятности основывается на понятии относительной частоты. Де Финетти и Сэвидж возродили аксиоматический подход Рамсея, целью которого являлся вывод основных правил вероятности из кодификации понятия *последовательного пари*. Колмогоров создал современную теорию вероятностей, которая основывается на понятии абстрактного интегрирования. Фон Нейман сделал то же самое для вероятностной модели квантовой теории, хотя и частично, поскольку ему не удалось вставить в квантовый контекст понятие *условной вероятности*, которое играет основную роль в классической⁴ . . .

АКАДЕМУС

Таким образом стала выявляться множественность моделей, идея о согласованности была строго связана с идеей о статистическом инварианте. Короче говоря, было много причин для того, чтобы предпринять в отношении вероятности то же самое, что почти век назад было сделано в отношении геометрии.

КАНДИДО

Причины были, но были также и препятствия — культурные и психологические. Связь мира классической вероятности с миром квантовой теории практически отсутствовала. Кроме того, спор об основах вероятности ничего не дал для аналогичного спора по поводу основ математики и физики и развивался в направлении, которое можно назвать *метафизическим*. Ученые хотели определить предположительную сущность понятия вероятности и много времени и чернил было потрачено на споры о том, можно ли вводить некоторые технические свойства в определение этой концепции⁵. *Субъективисты* боролись за утверждение относительности вероятностных оценок, но идея о существовании неэквивалентного множества вероятностных аксиом бросила бы их в дрожь, хотя их коллеги-геометры в течение

⁴Эта задача была выполнена несколько десятилетий спустя в контексте квантовой вероятности.

⁵Наиболее известным из этих технических свойств является так называемая *счетная аддитивность*.

длительного времени соглашались с аналогичным множеством при описании пространства.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что если бы физики и специалисты в области теории вероятностей того времени больше бы общались друг с другом, то никогда бы не возник так называемый парадокс квантовой теории и никто бы никогда не предложил забыть про такие понятия, как *физическая реальность*, *локальность*...?

КАНДИДО

Я в этом твердо уверен.

АКАДЕМУС

Но, по крайней мере в некоторых случаях, применимость правил классической вероятности должна быть очевидна и не должна подвергаться какому-либо теоретическим ограничениям. Иначе классическая теория вероятности не могла бы применяться так успешно в течение почти четырехсот лет. Задолго до появления таких понятий, как *совместимость*, *статистические инварианты* и др...

КАНДИДО

Это, безусловно, так. Есть случай, в котором эти *условия совместимости* проверяются автоматически. Это происходит тогда, когда все рассматриваемые статистические данные получены в однородных выборках. Поскольку в большинстве случаев, рассматриваемых в течение первых четырех столетий развития теории вероятностей, речь шла только об однородных выборках, никогда не возникало никаких проблем. Только с появлением квантовой теории возникла потребность в создании *теории вероятностей неоднородных выборок*.

Но то, что для данного набора условных вероятностей (или других статистических данных, таких как, например, корреляции, вроде тех, что имеются в неравенствах Белла) всегда существует соответствующий набор связанных вероятностей, вовсе не следует из законов классической вероятности.

Например, если такие условные вероятности возникли в неоднородных выборках, то нет никаких оснований ожидать, что такие связанные вероятности существуют, и если бы они даже и существовали, то было бы совершенно непонятно, как их интерпретировать.

АКАДЕМУС

Но как Вы можете определить, какие выборки являются *однородными*?

КАНДИДО

Единственным случаем, когда можно быть совершенно уверенным, — это когда все статистические вычисления произведены с использованием данных, полученных на одной выборке. В этом случае имеется только одно вычисление, результат которого разлагается, а затем вновь складывается различными способами. Таким примером является случай, когда оба отверствия открыты, а экспериментатор может определить, через которое из них прошла частица.

АКАДЕМУС

Я мог бы привести множество других примеров, когда классическая статистика применяется к данным, которые получены в совершенно разных экспериментах.

КАНДИДО

Это означает, что различия между экспериментами не настолько велики, чтобы сколько-нибудь существенно влиять на статистику. Однако о такой *несущественной разнице* можно говорить только а *posteriori*. Во всех этих случаях серьезный специалист в области статистики должен провести некоторые *тесты на однородность (или совместимость)*, которые гарантируют применимость классических правил к этим данным. В основе таких тестов могут быть *статистические инварианты*.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что не существует критериев, позволяющих сказать а *priori*, что некоторые статистические данные, полученные в различных экспериментах, можно рассматривать, по крайней мере приблизительно, как *однородные*?

КАНДИДО

Кроме того случая, о котором я говорил ранее, не существует *общего* критерия, т. е. применимого *независимо* от типа экспериментов, выполненных для сбора данных.

Условия однородности, о которых мы упоминали ранее, можно рассматривать в качестве *негативного критерия*: если некоторые статистические данные не удовлетворяют этим критериям, то мы можем быть уверены, что к таким данным нельзя применять правила классической вероятности.

АКАДЕМУС

А что если эти условия однородности соблюдены? Какой вывод я могу сделать?

КАНДИДО

Вы можете только сделать вывод о том, что а priori *возможно* применять правила классической вероятности. Но Вы не можете заключить, что, применяя такие правила, Вы экспериментально получите данные, согласующиеся с теоретически ожидаемыми. Эти критерии помогают Вам избежать ложных выводов, но сами они не могут привести Вас к правильным выводам. Ни одна математическая теорема сама по себе не может раскрыть тайны природы.

АКАДЕМУС

Не могли бы Вы привести пример таких *условий однородности*?

КАНДИДО

Примером является статистический инвариант двух отверстий, который мы рассматривали в разд. VI.2. Если условие, что количество, описанное соотношением (VI.2.8), больше 0 и меньше 1 не выполняется, то Вы можете быть уверены, что правила классической вероятности применять нельзя.

АКАДЕМУС

Вы говорите о *правилах классической вероятности*, но на практике использование *статистических инвариантов* позволяет лишь определить наличие или отсутствие определенного набора *связанных вероятностей*.

КАНДИДО

Это не удивительно, поскольку вероятностные модели классифицируются в терминах связанных вероятностей.

АКАДЕМУС

Если это действительно отражает ситуацию, я не вижу этой неожиданной оригинальности квантовой вероятности. Разве не существует хорошо известной теоремы фон Неймана, обычно упоминаемой в спорах об основах квантовой теории⁶, касающихся именно отсутствия связанных вероятностей?

КАНДИДО

Да, верно, существует некоторая путаница с фон Нейманом, в результате которой и возникли статистические инварианты квантовой вероятности. Эта путаница обусловлена весьма поверхностным анализом. Теорема фон Неймана о связанных вероятностях полностью заключена *внутри* математической модели. Она рассматривает существование связанных вероятностей в пределах стандартной квантовой модели. Квантовую вероятность интересует существование связанных вероятностей *независимо от моделей*. Фон

⁶См., например, Варадараяна.

Нейман начинает с математической модели и находит математическое условие (коммутативность), которое имеет значение только в пределах этой модели. Квантовая теория не допускает а priori существование какой-либо модели и находит условия, выраженные только в терминах данных, которые могут быть измерены экспериментально. Как видите, оба результата практически не имеют ничего общего друг с другом.

АКАДЕМУС

Все это мало волнует меня. Эти неравенства не просты и не естественны. Ваши рассуждения рациональны, но они обращены не к интуиции, нельзя понять, какую физику они выражают, при условии, что они каким-то образом касаются физики. . .

КАНДИДО

Все же они позволяют физикам выкарабкаться из того, что Поппер назвал *великой квантовой путаницей*. Если эти рассуждения могут убедить физиков, что нет никакого смысла настаивать на необходимости утверждать, что *ненаблюдаемые объекты не существуют*, или же подтверждать существование физических состояний, в которых наблюдаемые принимают только виртуальные значения, они сметут так называемые квантовые парадоксы без необходимости отказываться ни от формализма, ни от достижений квантовой теории, а лишь укрепляя их внутреннюю логику.

АКАДЕМУС

Но в этом случае концептуальное и философское столкновение в квантовой революции было бы сведено к минимуму. А это больше бы не означало, что квантовая теория революционизировала традиционную концепцию физической реальности.

КАНДИДО

Принятие этой новой интерпретации не привело бы к ослаблению концептуального влияния квантовой теории. Оно просто изменило бы его направление.

Традиционная интерпретация определяет самое глубокое концептуальное влияние квантовой механики, потенциально отвергая концепцию *физической реальности, классическую логику*, традиционные понятия *локальности, причинности или детерминизма* в существовании *несепарабельных (или сцепленных) систем* . . .

Согласно квантовой вероятности настоящая и великая революция в философии, вызванная новой физической концепцией, включает *вероятностные законы*.

АКАДЕМУС

Но нас, физиков, физическая реальность интересует гораздо больше, чем эти абстрактные рассуждения о вероятностных законах.

КАНДИДО

Как говорил неаполитанский философ⁷, важно не то, что хотел сказать художник, а то, что он действительно сказал. В интерпретации квантовой вероятности необходимо отойти от всех этих отказов, и наиболее глубокая концептуальная новизна квантовой теории (независимо от ее достижений в качестве физической теории) могла бы быть определена по тому, как она преодолела старый предрассудок человечества о том, что основные вероятностные законы являются просто-напросто тавтологией относительных частот или простых правил индуктивных рассуждений.

Строго говоря, этот вывод не кажется нам менее важным, чем предыдущие. Наконец-то некоторые физики начали понимать это.

БЕЛТРАМЕТТИ

Всем известный вопрос о неравенствах Белла можно рассматривать как отдельный случай в смысле условий для классической представимости вероятностей в отношении ЭПР-корреляций⁸...

РЮЭЛЬ

Физик Джон Белл доказал, что вероятности, связанные с простой физической системой, удовлетворяют некоторым неравенствам, которые на самом деле несовместимы с обычным вероятностным описанием⁹.

КАНДИДО

Они противоречат не теории Белла и его последователей, а теории квантовой вероятности. Я помню, как принимал участие в конгрессе в Саламанке в 1980 (или 81 г.), где возник публичный и весьма примечательный спор, в котором на одной стороне выступали сторонники квантовой вероятности, а на другой — Белл, Аспект, Хили, ... Там также присутствовало много других известных сторонников основ квантовой теории, таких как, например, Пирон, и не было сомнений в отношении этих двух позиций. Особенно часто этот спор возникал в период с 81 по 91 г. (год выхода в свет первого издания Рюэля) на многочисленных международных конгрессах, в статьях

⁷ Бенедетто Кроче.

⁸ Enrico G. Beltrametti, Giovanni Cassinelli, *Quantum Measurement and Probability*, в *The interpretation of quantum theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, novembre 1994, 3.

⁹ David Ruelle, *Chance and Chaos*, Penguin Books (1993), p. 96; it. trans. *Caso e Caos*, Bollati Boringhieri (1992).

и книгах, выпущенных многими известными международными научными издательствами . . .

АКАДЕМУС

Рюэль знает об этом, поскольку в конце своей книги ему показалось необходимым добавить маленькое замечание, в котором он дает разъяснение . . .

РЮЭЛЬ

Было бы правильно сказать, что идеи Белла не полностью согласуются с идеями, изложенными в настоящей главе; см. J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1987 (это сборник работ Белла, который был очень хорошо принят физиками)¹⁰.

КАНДИДО

Я не понимаю: две противоположные теории борются в течение многих лет в статьях, книгах, на конгрессах, . . . , а затем, спустя более 10 лет, приходит Рюэль и приписывает Беллу теорию его же оппонентов, отмечая лишь в примечании в конце книги, что «. . . идеи Белла не полностью согласуются . . . », при этом не объясняет ни причин этой несогласованности, ни почему он приписывает Беллу не его теорию, а теорию квантовой вероятности, которой Белл всегда противостоял, поскольку она сводит на нет концептуальную значимость его знаменитого неравенства.

АКАДЕМУС

Тот факт, что он приводит именно эту теорию, а не другую, указывает на то, приверженцем которой из них он является.

КАНДИДО

Почему же тогда он не говорит об этом явно?

АКАДЕМУС

Разве это важно? Такое авторитетное, публичное и явное согласие с точкой зрения квантовой вероятности в любом случае подтверждает это. Почему он должен говорить об идеях, которые не поддерживает? Если Белтраметти и Рюэль опубликовывают тезис о квантовой вероятности, это означает, что они с ней согласны.

КАНДИДО

Тогда, если они с ней согласны, почему они прямо не говорят, как на самом деле обстояло дело: что Белл, как и ортодоксальная интерпретация, пытался объяснить противоречия в терминах *таинственных физических свойств*, таких как *нелокальность*. Напротив, квантовая вероятность впервые пролила

¹⁰Работа, упомянутая в предыдущей ссылке, стр. 276.

свет на общий источник противоречий в эксперименте с двумя отверстиями и неравенстве Белла, идентифицируя его как некритическое использование правил классической вероятности.

АКАДЕМУС

Возможно, они настолько уверены в правильности тезиса о квантовой вероятности, что им кажется, будто они не могли даже и думать иначе.

ПРУСТ

... в восхищении он настолько глубоко проникся нашими идеями, что через сорок восемь часов уже не помнил, что эти идеи принадлежали не ему¹¹.

КАНДИДО

Вполне конструктивный взгляд на вещи. Однако иногда мне кажется, что цитаты в статьях ученых вызваны в большей степени академической этнологией, нежели желанием помочь читателю восстановить путь развития новой идеи.

АКАДЕМУС

Не путайте историка с ученым. Последний знает, что то, что завтра будет историей науки, также зависит и от того, что ее авторы пишут и говорят сегодня.

КАНДИДО

А разве нельзя сравнивать моральную строгость академического мира с научной строгостью? И разве нельзя приписывать открытия с помощью точно выверенных цитат именно тем, кто их сделал? Кажется, наше общество заинтересовано в защите научных открытий и идей только тогда, когда они имеют спрос.

АКАДЕМУС

Только новички, а не эксперты, и некоторые идеалисты полагают, что цитаты используются для *отражения* реальности, а не для *построения* таковой. Эта история с цитатами, которые не были приведены, гораздо сложнее и возможно более интересна, чем история о приведенных цитатах. Но нам лучше оставить этот вопрос на совести историков науки и вернуться к нашей теме.

Какими бы авторитетными ни были эти примеры согласия с тезисом квантовой вероятности, они, тем не менее, не являются достаточно репрезентативными для всей физики, и я не думаю, что интерпретация квантовой вероятности имеет много шансов для того, чтобы стать популярной среди физиков.

¹¹ Marcel Proust, *I Guermantes*, Einaudi (1963), p. 125.

КАНДИДО

При чем здесь *популярность*? Эта категория, на мой взгляд, больше подходит шоу-бизнесу, а не науке. Я бы предпочел говорить о *рациональности, корректности, ...*

Вы имеете в виду, кто в настоящее время имеет больше или меньше шансов для того, чтобы быть принятым в соответствии с его происхождением или рекламной компанией, организованной в его поддержку? Что социальные соображения или принадлежность к той или иной группе могут осквернить чисто научную рациональность?

АКАДЕМУС

Да нет же, нет! Какую чепуху вы говорите! ... Наука не способна на такое, даже если бы очень захотела. Что бы стало с доверием, которое питают к нам люди, если бы у них возникло ощущение, что и в нашем мире преобладают такие явления, как фракционизм, амбиции, отсутствие внимания к средствам, с помощью которых достигается цель, нечестная конкуренция, произвол, злоупотребление чьей-то властью, ..., — все то, за что они обвиняют мир бизнеса и политики?

КАНДИДО

Конечно ... лучше бы у людей не возникало таких ощущений ...

АКАДЕМУС

Причина, по которой я сомневаюсь, что физикам когда-нибудь понравится квантовая вероятность, состоит в том, что этот странный тип *квантовой реальности*, так далекий от здравого смысла, является чем-то, что непосредственно связано с природой. Поскольку это является доказательством того, насколько глубоки наши знания о мире.

Теперь Вы приходите и говорите, что эти новые физические состояния, в которых за наблюдаемыми никто не наблюдает, не существуют, что вводить их было ошибкой. Что мы не правы, обучая этому студентов. Что решение находится не в новых, странных физических свойствах, а лишь в неправильном использовании математического формализма.

Мы говорим, что эта проблема касается *мира*, а Вы заявляете, что видите ее решение в формализме, языке, в короткой праздной беседе. Другими словами, Вы хотите предложить словесное решение очень важной проблемы.

ЖИРАРДИ

Существуют две противоположные точки зрения, в частности, идеи, популярность которых уменьшается: это идея о том, что эти проблемы (точнее, трудности, связанные с квантовым описанием процесса измерения и ролью

наблюдателя) происходят из словесного непонимания и поэтому требуют чисто словесного решения, и точка зрения о том, что процесс измерения в какой-то степени устанавливает границы возможностей человека в понимании природы. Напротив, все больше сторонников приобретает идея о том, что эта проблема является исключительно физической и поэтому требует физического решения, основанного на серьезном и точном математическом анализе¹².

АКАДЕМУС

Вот видите, это именно то, о чем я говорил. Квантовая вероятность является одним из тех направлений, которые ищут *просто словесные решения* проблемы. Она говорит: *измените физическую интерпретацию состояний суперпозиции и парадоксы исчезнут.*

КАНДИДО

До сих пор в данной дискуссии квантовая вероятность была единственным направлением исследований, которое приняло и действительно стимулировало открытую борьбу с другими точками зрения посредством анализа, сопоставления и обсуждения. Многие другие направления ушли в себя и заняли позицию, свойственную скорее секте, нежели научной группе. Иногда мне кажется, что некоторые призывы к *физике* больше похожи на социальные обращения к корпорации, нежели на обращение науки к разуму. Это все равно что сказать: *поскольку эти идеи не возникли на физическом факультете или в большой лаборатории, например, в ЦЕРНе, то они не могут быть важны для физики.* Мне непонятна такая позиция. Например, кто, по-вашему, является христианином: человек, который верит в христианское учение, тот, кто воплощает его в жизнь, или же тот, который просто причисляет себя к католикам?

АКАДЕМУС

Выживание Структуры гораздо сильнее связано с управлением ценностями, которые она представляет, чем с их ростом. Это так же важно для церкви, как и для науки. Знания, которые накопило человечество, имеют гораздо большее значение, чем любое одиночное открытие, каким бы разрушающим и революционным оно ни было. Стабилизация и консервация этого знания является гораздо более важной задачей, чем его развитие. Святые, идеалисты и новаторы являются беспокойными личностями, они способствуют возникновению нестабильности. Иногда они могут быть полезны Структуре, но прежде всего их надо нейтрализовать, а возможно и немного помучить для того, чтобы уменьшить распространение такого примера.

¹²G. C. Ghirardi, «La Repubblica», Venerdì 8.1.1993.

КАНДИДО

Я вижу, Вы знаете гораздо больше меня о таких вещах. Давайте вернемся к предмету нашего обсуждения.

Дело в том, что большинство физиков, заинтересованных в основах, *принимают как само собой разумеющееся то, что составляет основной предмет исследования квантовой вероятности: что для системы, находящейся в состоянии суперпозиции в отношении данного наблюдаемого, величина этого наблюдаемого объективно не определена.*

АКАДЕМУС

Они считают это самим собой разумеющимся потому что, как мы видели в гл. II, это было доказано основателями данной теории. В спорах не всегда полезно начинать все сначала.

КАНДИДО

Только те, кто действительно не заинтересован в понимании и правде, может посвящать так много времени и отдавать так много энергии построению моделей, которые должны найти решение парадоксов, не задаваясь вопросом о тех предпосылках, из которых, собственно, эти парадоксы и происходят.

Такая позиция ведет не к решению проблемы, а к хождению по кругу и получению от этого удовольствия. Самая большая польза от всего этого может заключаться в возможности покрасоваться перед людьми несведущими, или, возможно, просто польстить кому-нибудь, заявив, что с концептуальной точки зрения он вносит важный вклад, но это существенно не продвинет вперед наше понимание.

Квантовая вероятность, напротив, избегая догматизма, бьется над проблемой у ее истоков и точно критикует предпосылки, ведущие к парадоксам.

АКАДЕМУС

Конечно же, макрореалисты и другие физики противопоставляли такой критике более подходящие аргументы.

КАНДИДО

Я не мог найти в литературе ни одного подобного аргумента, но, возможно, Вы знаете больше меня . . .

Я просто надеюсь, что Вы тоже согласны с необходимостью противостоять искушению подменять рациональные аргументы авторитетом или количеством согласных.

АКАДЕМУС

Теория квантовой вероятности также была подвергнута критике другого рода.

ВАН ДЕН БЕРГ

Аккарди допускает, что можно описывать статистические данные, полученные при условиях (а), (b), (с) с помощью одного измерения вероятности¹³.

КАНДИДО

Действительно замечательное утверждение! Во всех статьях по квантовой вероятности, которые я читал, почти навязчиво настаивают на том, что *физики явно допускали, что можно было описывать статистические данные, полученные в несовместимых экспериментальных условиях с помощью одного лишь измерения вероятности*. Эта настойчивость иногда досаждала мне, и я задавался вопросом: *почему одна и та же вещь повторяется так много раз? Почему они настаивают на этой попытке сделать все понятным? Читатели ведь не глупцы!* Теперь я понимаю, что роли поменялись, и на тех, кто пытался объяснить очевидный постулат, годами рассуждая об этом в научном мире, теперь указывают как на людей, которые привнесли этот постулат.

ВАН ДЕН БЕРГ

В теории скрытых параметров Боба квантовый потенциал зависит от того, открыто или закрыто отверстие 1, и это объясняет, почему в его теории $P(X | S)$ отличается от $P(X | 1)$.¹⁴

КАНДИДО

Если опустить жаргон, второе утверждение означает, что если вместо того, чтобы рассматривать только одну вероятностную модель для всех статистических данных, мы согласны с построением модели для этих данных по отдельности, то будет легко доказать, что такие модели не только существуют, но их и гораздо больше (см. обсуждение в разд. VII.3). Это простое замечание можно найти почти во всех статьях, посвященных квантовой вероятности¹⁵. Новизна квантовой вероятности на самом деле заключается не в этом простом замечании, которое было более или менее понято практически всеми, кто пытался ввести скрытые вероятности в теорию.

АКАДЕМУС

Эти авторы заявляют, что позиции квантовой вероятности...

¹³H. Van den Berg, D. Hoekzema, H. Radder, Discussion: Accardi on quantum theory and the «fifth axiom» of probability, Official Journal of the Philosophy of Science Association, Vol. 57, No 1, 1990, 149–157, p. 152.

¹⁴H. Van den Berg, D. Hoekzema, H. Radder, см. предыдущую ссылку.

¹⁵Например, L. Accardi, *The probabilistic roots of the quantum mechanical paradoxes*, в *The wave-particle dualism*, ed. S. Diner et al., Reidel (1984) 297–330.

ВАН ДЕН БЕРГ

... существенно не отличались бы от позиций приверженцев скрытой вероятности... Следовательно, как и всякий приверженец скрытых вероятностей, он [Аккарди] столкнулся с проблемой, как объяснить неравенства (9), а это нисколько не легче, чем объяснить неравенство (5)¹⁶.

АКАДЕМУС

В разд. V.1 неравенством (5) является

$$P_{\text{exp}}(X) \neq P(1)P_{\text{exp}}(X | 1) + P(2)P_{\text{exp}}(X | 2)$$

(см. формулу (V.1.3) в разд. V.1), в то время как неравенство (9) Ван ден Берга еще не было затронуто в нашем обсуждении и его можно написать в следующем виде:

$$P_a(X) \neq P_b(X \cap 2) + P_c(X \cap 1).$$

КАНДИДО

Новым является не только это неравенство, я никогда не видел самих записей. Вы должны объяснить их мне, возможно, они помогут мне лучше понять точку зрения Ван ден Берга и его коллег.

АКАДЕМУС

Конечно, $P_a(X)$ — это то, что Вы называли $P(X)$, т.е. вероятность, с которой частица приходит в область X , когда оба отверстия открыты. b обозначает условия эксперимента, когда отверстие 1 закрыто, а отверстие 2 открыто; c , напротив, обозначает условия эксперимента, когда отверстие 1 открыто, а отверстие 2 закрыто.

КАНДИДО

Но тогда в условиях эксперимента, обозначенных b , частица поставлена в такие условия, что ей приходится проходить через отверстие 2.

АКАДЕМУС

Если под выражением поставлена в такие условия Вы подразумеваете, что каждая частица, попадающая на второй экран, должна пройти через отверстие 2, то, о чем Вы говорите, действительно верно.

КАНДИДО

Хорошо. Тогда то, что Ван ден Берг называет $P_b(X)$ не что иное как то, что мы называли $P(X | 1)$ (или $P_{\text{exp}}(X | 1)$). Кроме того, я думаю, что Ван ден Берг, так же как и Фейнман и большинство физиков, обсуждавших эксперимент с двумя отверстиями, рассматривает вероятности, предсказанные

¹⁶Сноска 12.

теорией, как *предсказания относительных частот*, которые нужно сравнить с действительно измеренными относительными частотами.

АКАДЕМУС

Это понятно из статьи, которую мы обсуждаем.

КАНДИДО

Тогда он непременно должен будет принять то, что в его написании

$$P_b(2) = 1, \quad (\text{VII.2.1})$$

и это, на самом деле, только выражает простое определение того, что если отверстие 1 закрыто, то я должен ожидать, что все прошедшие частицы прошли через отверстие 2.

АКАДЕМУС

Он не говорит это явно, но я не понимаю, каким образом он мог бы отрицать такую очевидную вещь.

КАНДИДО

Верит ли Ван ден Берг в аддитивность вероятностей отдельных событий?

АКАДЕМУС

Думаю, да. Он неоднократно использует это свойство в своей статье.

КАНДИДО

Но тогда, опять-таки в его написании, условие (VII.2.1) подразумевает, что для любого события X получено следующее:

$$P_b(X) = P_b(X \cap 2),$$

т. е., согласно (1), вероятность любого события X должна равняться вероятности связанного события X и 2 (т. е. $X \cap 2$).

АКАДЕМУС

Нет, Ван ден Берг определяет вероятность, обозначенную им как $P_b(X \cap 2)$, иным способом.

КАНДИДО

Что вы имеете в виду под словами *он определяет*? Разве мы сейчас не доказали, что связанная вероятность $P_b(X \cap 2)$ однозначно определена и должна равняться $P_b(X)$?

АКАДЕМУС

Ван ден Берг дает следующее определение:

$$P_b(X \cap 2) = P_b(X | 2)P(2).$$

КАНДИДО

Больше записей! Что такое $P_b(X | 2)$ и $P(2)$ теперь?

АКАДЕМУС

Мы уже ввели $P(2)$: это вероятность прохождения через отверстие 2, когда оба отверстия открыты.

КАНДИДО

Вы говорите, что для того, чтобы определить *совместную вероятность* $P_b(X \cap 2)$, которая относится к тому случаю, когда открыто только отверстие 2, Ван ден Берг и его коллеги вводят вероятность $P(2)$, которая, напротив, относится к случаю, когда оба отверстия открыты, не так ли?

АКАДЕМУС

Я просто говорю о том, что я прочитал в их статье.

КАНДИДО

Что-то не сходится в том, что Вы говорите. Очевидно, я неверно понял, но мне казалось, что мы говорили об эксперименте только с *двумя отверстиями*, разве не так? Открытых или закрытых в разных комбинациях, но непременно о двух.

АКАДЕМУС

Выражение $P_b(X \cap 2)$ абсолютно понятно: в статье трех голландских философов оно обозначает *условную вероятность прибытия в область X через отверстие 2, полагая, что отверстие 1 закрыто*.

КАНДИДО

Тогда как мы можем отличить $P_b(X)$ от $P_b(X \cap 2)$? Другими словами, как Вы можете объяснить разницу между вероятностью *прибытия в область X, если открыто только отверстие 2*, и вероятностью *прибытия в область X, если открыто только отверстие 2, и при условии прохождения через отверстие 2*?

Эта проблема не является ни физической, ни математической; это просто проблема *языка*: мне понятно, что по своему содержанию оба выражения одинаковы и что второе из них бессмысленно, потому что выражение «прохождение через отверстие 2» повторено дважды.

АКАДЕМУС

Однако они говорят, что...

ВАН ДЕН БЕРГ

... равенства

$$P_b(X \cap 2) = P_b(X | 2)P(X); \quad P_c(X \cap 1) = P_c(X | 1)P(1) \quad (\text{VII.2.2})$$

можно непосредственно проверить и они не зависят от теоретических допущений.

КАНДИДО

Это утверждение поражает меня по трем причинам:

(I) мы уже видели, что правая часть равенства (VII.2.2) смешивает вероятности, что имеет смысл только при взаимоисключающих условиях эксперимента;

(II) мы только что доказали, что левая часть равенства (VII.2.2) равна $P_b(X)$;

(III) я все-таки не понимаю, что такое $P_b(X | 2)$.

АКАДЕМУС

Этот символ введен в качестве *обозначения* на стр. 153 в статье трех голландских философов.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что авторы *ни разу на протяжении всей своей работы* не подумали о разъяснении *значения* этого обозначения и об описании того, благодаря каким физическим условиям вероятность $P_b(X | 2)$ отличается от $P_b(X)$?

АКАДЕМУС

Я не нашел ни одного такого описания. Возможно, авторы неявно допускают, что такая вероятность определяется как обычно по формуле Байеса, или, возможно, у них есть другие идеи, но они о них умалчивают . . .

КАНДИДО

Но тогда имеет ли смысл утверждение, что неравенство (VII.2.2) *можно непосредственно проверить, и оно не зависит от каких-либо теоретических допущений?*

АКАДЕМУС

Возможно у авторов есть ответы на Ваши вопросы, но они умышленно скрывают их от читателей.

КАНДИДО

Подведем итог: Ван ден Берг, Хекзема и Раддер жалуются на отсутствие различий между *условной вероятностью прибытия в область X, когда открыто только отверстие 2, и связанной вероятностью прибытия в область X через отверстие, когда открыто только отверстие 2*. Но это различие настолько тонко, что, похоже, лишь сами авторы понимают его. С другой стороны, они, кажется, не уловили основную сущность квантовой вероятности, а именно разницу между *тавтологическим условием*, состоящим в различном подсчете событий, принадлежащих одному эксперименту, и *физическим условием*, состоящим в *физическом исключении и не только при подсчете*, некоторых возможностей. В первом случае всегда можно

применять формулу Байеса, а во втором не всегда: необходимо вычислить статистические инварианты, впервые введенные в квантовую вероятность, а затем оценить такой инвариант по экспериментальным данным. Только после этого возможно решить, можно применять эту формулу или нет.

АКАДЕМУС

Такая настойчивость в отношении эксперимента с двумя отверстиями позорительна и более не наблюдается среди экспертов. В настоящее время считается, что на загадки квантовой теории скорее указывают проблемы, связанные с неравенствами Белла.

КАНДИДО

Если двадцать лет назад аргумент о двух отверстиях считался достаточным для введения *взвешенной реальности*, в настоящее время он используется лишь тогда, когда необходимо показать его ошибочность.

АКАДЕМУС

Аргумент Белла не противоречит аргументу о двух отверстиях, а обогащает спор посредством идеи о *локальности*.

КАНДИДО

Напротив, я слышал, что анализ Белла, вместо того, чтобы привести новые идеи в старый спор, привел к новому непониманию старого аргумента.

После многократного упоминания, думаю, настало время перейти непосредственно к этой теме.

АКАДЕМУС

Не надоедайте! Поскольку аргумент Белла можно понять до конца только при использовании его в споре о скрытых параметрах, мы лучше еще раз вернемся к этой теме.

VII.3. Верните нам траектории

БИЛЬБО

На мой взгляд, у квантовой вероятности с ортодоксальной интерпретацией общее то, что она отошла от классической программы механицизма.

КАНДИДО

Механицизм — еще одно слово, используемое всеми, но мало кто дает его точное определение.

АКАДЕМУС

Эта точность интересует только математиков. Когда они говорят о *точном определении*, они имеют в виду *аксиоматизацию*.

КАНДИДО

А что еще вы можете иметь в виду, говоря об *определении концепции*? Но не путайте *аксиоматизацию* и *формализацию*: помните о различии между *формальной строгостью* и *концептуальной строгостью*, о которых мы говорили в разд. I.2.

АКАДЕМУС

Вероятно, вообще невозможно *дать определение концепции*.

КАНДИДО

Почти во всех науках концепции не определяются, а, скорее, *ассимилируются* посредством частого повторения определенного контекста. Для преодоления этого *дилетантского* уровня нет иного пути, кроме аксиоматизации. Даже в этом случае успех не будет абсолютным, но иногда тоска по абсолюту может иметь эффект паралича.

АКАДЕМУС

Почему бы нам не вернуться к механицизму, именно для того, чтобы не оказаться парализованными?

КАНДИДО

Предпринимаются попытки аксиоматизировать механицизм без его формализации, т. е. ограничить нас самих только лишь концептуальной строгостью¹⁷, но для того, чтобы описать их, мне понадобится довольно много времени.

АКАДЕМУС

Неужели нельзя объяснить, что такое механицизм, не прибегая к ничего не дающему списку аксиом и бесчисленным страницам комментариев?

КАНДИДО

Объяснить — возможно, но *определить* — вероятно, нет.

АКАДЕМУС

Я думаю, что сущность механицизма состоит в концепции *траектории*: она включает в себя как идею об *описании пространства и времени*, так и идею о *детерминизме*, но она более общая, поскольку, говоря о *траекториях*, ссылаются не только на физические пространство и время, но и на более общие пространства, многомерные (а иногда и бесконечномерные) пространства.

Квантовая теория отказывается от механицизма, поскольку она отказывается от концепции *траектории*.

¹⁷L. Accardi, *Stato Fisico*, Enciclopedia Einaudi, 13 (1981) 514–548.

ПУТНАМ

Интерпретации, согласно которым элементарные частицы имеют как местоположение, так и импульс в каждое мгновение (хотя известным может быть либо положение, либо импульс, но никогда оба одновременно), называются *теориями скрытых параметров*¹⁸.

КАНДИДО

Действительно, начиная с Сольвейской конференции 1927 г., Эйнштейн проявлял...

ЭЙНШТЕЙН

...глубокую озабоченность тем, до какой степени квантовая механика не уделяла внимания описанию пространства и времени¹⁹.

АКАДЕМУС

Описание пространства и времени всегда находилось в центре внимания Эйнштейна: наблюдаемые *пространства и времени* всегда имели приоритет в его научной программе.

КАНДИДО

В классической механике основными наблюдаемыми являлись *пространство, время и масса*; в общей теории относительности Эйнштейн сводит эти наблюдаемые к *пространству и времени*, рассматривая массу как *искривление пространства*.

В этом смысле Эйнштейн, как говорят, *геометризировал* классическую теорию гравитации.

АКАДЕМУС

Можно сказать, что в классической механике пространство и время обычно имели простую геометрию и *предметы обычно существовали в пространстве и во времени*; в общей теории относительности пространство и время имеют сложную геометрию и *предметы являются деформацией пространства и времени*.

К сожалению, Эйнштейн не смог расширить свою программу геометризации на электромагнетизм: ему удалось геометризировать *массу*, но не *заряд*.

КАНДИДО

Он не мог этого сделать, поскольку ему не хотелось отказываться от идеи о том, что пространство и время являлись единственными основными наблюдаемыми, в терминах которых могли быть выражены другие наблюдаемые.

¹⁸ *A Philosopher looks at Quantum Mechanics*. Впервые опубликовано в Robert G. Colodny (ed.), недостоверно *Essays in Contemporary Science and Philosophy*, 1965, item 9.

¹⁹ См. Niels Bohr, в Paul A. Schipp (ed.).

Эта смелая инициатива была подхвачена математиком Германом Вейлем. С физической точки зрения это то же самое, что и признание существования других основных наблюдаемых, помимо пространства и времени. Последние удерживают приоритет, поскольку любое другое основное наблюдаемое *существует в точках пространства и времени* в том же смысле, в каком колосок пшеницы *существует в определенной точке поля*, из которой поднимается стебель.

С математической точки зрения такое изменение взглядов эквивалентно допущению в качестве базового пространства физики уже не четырехмерной кратности, как этого хотел Эйнштейн, а *расслоенного пространства*: базой расслоения является пространство и время Эйнштейна, и слой определяется другими основными наблюдаемыми: (электрическим зарядом, спином, цветом, шармом, ...).

АКАДЕМУС

Но даже при переходе только от пространства и времени к множественности основных наблюдаемых, при желании сохранить детерминизм, т. е. идею о том, что настоящее однозначно определяет будущее, необходимо, чтобы время играло особую роль и установить закон динамики. Сделав это, можно будет сказать, что *состояние* системы определяется минимумом информации, который необходимо иметь в определенный момент времени для того, чтобы с уверенностью предсказать будущее системы с помощью динамического закона.

КАНДИДО

Поговорим лучше о *механическом состоянии*, поскольку этот минимум информации, должно быть, нельзя получить на практике, как в случае классических статистических теорий или, в принципе, квантовой теории.

Поэтому отличительной чертой классических теорий по сравнению с квантовой теорией является то, что в первом случае *все наблюдаемые совместимы*, во второе время как во втором они несовместимы.

АКАДЕМУС

Теории классической механики допускают существование ряда X совместимых наблюдаемых и ряда точных функциональных отношений между ними (физических законов), позволяющих устанавливать значения каждой наблюдаемой величины как функции значений, допускаемых наблюдаемыми ряда X в предыдущий момент.

Ряд $X(t)$ значений, принимаемых наблюдаемыми X в момент t , называется *состоянием* системы, а ряд состояний, получаемый при изменении всех возможных значений t , называется *траекторией* системы.

Это уже просто обобщение понятия *траектории* в терминах пространства и времени. Но даже это обобщенное понятие траектории не может сохраняться в квантовой теории.

КАНДИДО

Очень коротко механистическую программу можно сформулировать следующим образом:

Задавая систему, опишите ее траектории как функцию ее исходного состояния.

Кроме того, из того, что Вы говорите, ясно, что в механистических теориях возникновение статистических формулировок возможно только благодаря отсутствию информации об обсуждаемых величинах, т. е. нечто, по крайней мере в принципе, устранимое.

АКАДЕМУС

Механистическая концепция природы вовсе не является несовместимой со статистическими теориями, а рассматривает их как частичные описания, значение которых зиждется на лежащих в их основании детерминистских законах.

КАНДИДО

Идея *механистического состояния*, которому Вы только что дали определение, тесно связана с динамическим законом.

Квантовая теория предлагает иное, более существенное понятие:

мы говорим, что набор X наблюдаемых величин определяет состояние системы, если:

- 1.) Наблюдаемые X совместимы.
- 2.) Наблюдаемые X независимы: это означает, что каким бы способом ни было бы выбрано значение этих наблюдаемых, всегда можно подготовить систему так, что каждое из этих наблюдаемых принимает этот ряд значений (т. е. ни одно из них не является функцией остальных).
- 3.) набор X является максимальным; это означает, что каким бы образом ни было бы выбрано наблюдаемое A , нельзя подготовить систему таким образом, чтобы оба наблюдаемых X и A непременно принимали бы наперед заданные значения.

АКАДЕМУС

Если первые два пункта кажутся абсолютно понятными, то понять третий мне значительно труднее.

КАНДИДО

Наибольшая трудность вызвана тем, что это очень общее понятие, объединяющее классическую и квантовую идею о *состоянии*.

На самом деле может быть две причины, по которым невозможно подготовить систему таким образом, чтобы наблюдаемые X и A определенно принимали наперед заданные значения.

I.) *Каждое наблюдаемое A является функцией X* : в этом случае, если даны значения X , значения A не могут быть выбраны случайно.

II.) *Если наблюдаемое A не является функцией наблюдаемых X , то оно не совместимо с наблюдаемыми X .*

Первый случай соответствует классическим механистическим теориям, второй — квантовой теории.

АКАДЕМУС

Второй случай может иметь место только в случае принятия принципа неопределенности Гейзенберга.

БИЛЬБО

Но отход от механистической программы эквивалентен отказу от принципа полной доступности человеку законов природы. Поскольку этот принцип имеет глубокие корни в западном научном мире, то понятно, что прежде чем решиться на такой отказ, многие люди думают, что необходимо тщательно исследовать возможность альтернативного выбора.

КАНДИДО

Многие, в том числе и Эйнштейн, не хотели соглашаться с тем, что механистическая программа канула в лету; напротив, согласно этой программе они полагали, что квантовая теория как статистическая теория не способна дать полное описание природы. Отсюда следует необходимость *завершения* теории.

Завершение статистической теории означает вывод формы статистических законов из формы детерминистских законов.

До сих пор наиболее важное достижение этой программы было сделано классической статистической механикой, которая с успехом описала термодинамические свойства тел в терминах статистических законов, форма которых была выведена из описания атомов, из которых эти тела состоят, с помощью механики Ньютона.

Осуществление подобной программы для квантовой теории, т. е. вывод статистических законов этой теории из ранее существовавшей точной теории механистического типа, представляет обычную цель так называемых теорий скрытых параметров. Мне известна статья²⁰, которая содержит

²⁰L. Accardi, *Foundations of Quantum Mechanics: a quantum probabilistic approach*, in *The nature of quantum paradoxes*, eds. G. Tarozzi, A. von der Merwe, Reidel (1988) 257–323.

критический обзор различных технических моделей скрытых параметров и связанных с ними *тупиковых* теорем, предложений «а la Людвиг» для расширения математической модели теории, самых обычных классов моделей, используемых в квантовой теории измерений . . .

АКАДЕМУС

У меня такое чувство, что вы разделяете наше безразличие к этим мечтателям, которые хотят повернуть вспять ход истории.

КАНДИДО

Ход назад — это просто химера. Но некоторые химеры являются символами довольно больших потребностей. Сторонники скрытых параметров часто были наивны, иногда — фанатичны. Но если бы я захотел вывести конструктивное содержание их деятельности, то это выглядело бы следующим образом: *ни результаты, ни возможности или интуиция, содержащиеся в классических теориях, не были полностью использованы*. Интуиция Шрёдингера была слишком быстро забыта. Иногда же преждевременно провозглашалось, что некоторые явления были типичны для квантовой физики и не могли иметь место в классическом контексте: настолько преждевременно, что эти заявления не один раз опровергали²¹.

АКАДЕМУС

Но такие объяснения часто оказываются вполне уместными и всегда следуют после открытия, поскольку я не думаю, что когда-либо новое квантовое явление было обнаружено на основе чисто классического анализа. Во-первых, объяснение *a posteriori* с помощью подходящих аргументов, во-вторых, обобщающий и созидательный принцип новых открытий.

КАНДИДО

Мне все еще кажется, что досконально была исследована лишь ничтожная часть существующих связей между классической и квантовой физикой, и лишь некоторые из них были поняты. Огромная роль, которую классическая интуиция все еще играет в работе физиков, занимающихся квантовой механикой, пока не имеет аналога в математической модели, за исключением подхода Фейнмана, который мы обсуждали в разд. I.2.

Из увядающей программы может возникнуть новая, более плодотворная программа.

²¹Galgani, G. Benettin, *Planck's formula for classical oscillators with stochasticity thresholds* (preprint); O. A. Barut, *The deterministic Wave mechanics: A Bridge between classical Mechanics and Probabilistic quantum theory*, in *The Interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana (1994), p. 57–66; E. T. Jaynes, *Probabilistic in Quantum Theory, in Complexity, Entropy and the Physics of information*, Addison Wesley (1990).

VII.4. Скрытые параметры в роли паразитических теорий

АКАДЕМУС

Необходимость введения теорий скрытых параметров обернулась множеством научных программ, отличающихся друг от друга как методом понимания этого завершающего дополнения, так и способом его воплощения.

Эти попытки варьируют от максимальной программы, состоящей просто в расширении квантовой теории до механистической теории, до последующего ослабления этой программы как в направлении отказа от некоторых формулировок квантовой теории, так и в направлении отхода от строго механистических взглядов.

Эти программы объединили всех тех, кто не чувствовал себя удовлетворенным той интерпретацией, которая была принята большинством физиков.

КАНДИДО

Возможно, что по этой причине данное направление исследований развивалось решительно и во враждебном безразличии со стороны большей части научного мира.

Если к этому мы добавим трудности квантовой теории измерения, с ее кажущимися парадоксами и последующим вырождением интерпретации, которое мы только что обсуждали, то можно понять, что многие не доверяют квантовой теории, которая, помимо неоспоримых экспериментальных достижений, привела, вероятно, к отказу не только от механистической программы, но и от некоторых основных допущений западной научной мысли, таких как существование объективной реальности вне индивидуума, и независимо от состояния его сознания, незначительность идеологических и метафизических спекуляций для интерпретации научных теорий, непротиворечивость основных законов физики . . .

БИЛЬБО

Со всеми этими отступлениями Вы не ответили на первоначальный вопрос: *собирается или нет квантовая механика отказаться от механистической программы?*

КАНДИДО

Квантовая вероятность подтверждает важность принципа Гейзенберга как основного закона физики. Мы только что видели, что вызывает необходимость статистического компонента в теории.

Утверждению, что, согласно ортодоксальной интерпретации, *доказано*, что реалистический взгляд на природу противоречит экспериментальным данным, квантовая вероятность противопоставляет замечание, что данное

предположительное *доказательство* основано на как неявном, так и беспочвенном постулате, что всегда можно описать статистические данные, полученные в несовместимых экспериментах с помощью *одной* классической вероятностной модели.

БИЛЬБО

Но некоторые модели де Бройля, Боме и многих других авторов осуществляют именно то, что квантовая вероятность считает невозможным: классическую вероятностную модель для квантовых явлений²².

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что Бому, де Бройлю и многим другим удалось применить правила классической вероятности к эксперименту с двумя щелями?

БИЛЬБО

Именно так.

КАНДИДО

Но тогда вся эта история с интерференционными кольцами просто-напросто ложь! Они не могут существовать, поскольку мы много раз видели, что если имеются интерференционные кольца, правила классической вероятности применять нельзя. Короче говоря, Гейзенберг, Фейнман и все прочие отцы-основатели квантовой теории обманули нас.

БИЛЬБО

Нет, нет, никто не сомневается в существовании интерференционных колец. Это означает, что нельзя отрицать экспериментальный факт.

КАНДИДО

Продолжайте! Сначала Академус пытается убедить меня, что ненаблюдаемый электрон нигде не находится, тогда возникают противоречия с относительностью, и мне говорят, что это неважно, поскольку эти противоречия нельзя использовать в конкуренции с телефонной компанией Белла, заставив телефон и телеграф работать быстрее скорости света. Тогда, наконец, после продолжительного анализа мы приходим к соглашению, что источником проблемы является то, что иногда невозможно применять правила вычисления классической вероятности к статистическим данным, полученным в различных экспериментах. И здесь встает Бильбо и говорит, что все совсем не так, потому что это удалось де Бройлю, Бому и многим другим.

АКАДЕМУС

Позвольте мне объяснить, что именно эти авторы сделали, и Вы увидите, что никаких противоречий не будет.

²²D. Bohm, Phys. Rev. **85** (1952) p. 166 and p. 180, Phys. Rev. **89** (1953) p. 458.

КАНДИДО

Благодарение господу! Я начал думать, что вся эта история с интерпретацией квантовой механики была непрерывной борьбой с принципом *tertium non datur* (третьего не дано).

Давайте посмотрим, что именно сделали де Бройль, Бом и многие другие. Но главное, давайте посмотрим, почему противоречие, на которое указывал Фейнман, в их случае не возникает.

БОМ

Многие физики думают, что критика Эйнштейна не важна, поскольку современная форма квантовой теории с обычной вероятностной интерпретацией отлично согласуется с экспериментальными данными . . . и, более того, потому, что до сих пор не предложено никакой логически последовательной альтернативной интерпретации. Цель настоящей работы . . . состоит просто в предложении альтернативной интерпретации . . . Она позволяет рассматривать каждую отдельную физическую систему как если бы она находилась в однородном состоянии, эволюция которого определяется точными законами, подобными (но не идентичными) классическим уравнениям движения. Квантовомеханические вероятности рассматриваются (также как и вероятности классической механики) только как практическая необходимость, а не как признак невозможности полного определения свойств материи на квантовом уровне²³.

БИЛЬБО

Вы понимаете историческое значение этой теории? Все остальные авторы говорят, что квантовая теория не совместима с траекториями. Бом доказывает, что это не так, и даже по-новому интерпретирует квантовую теорию, основанную на траекториях.

КАНДИДО

Это утверждение Бома вызывает у меня два сомнения, которые я хотел бы вам представить. Первое касается последней части этого утверждения, т. е. теории, согласно которой *квантовомеханические вероятности рассматриваются . . . просто как практическая необходимость*.

В разд. III.5 мы доказали, что любая теория, признающая принцип неопределенности, должна признавать и вероятностное описание как *принципиальную необходимость*, а не *просто практическую необходимость*. Должен ли я тогда сделать вывод, что Бом фальсифицировал принцип неопределенности?

²³D. Bohm, Phys. Rev. **85** (1952) 166 and 180, перепечатано в *Quantum theory and measurement*, J. A. Wheeler, W. Zurek (eds.), Princeton University Press (1983).

АКАДЕМУС

Нет, до сих пор никто не смог этого сделать.

БИЛЬБО

Но если траектории существуют, то статистическое описание действительно определено *является просто практической необходимостью*.

КАНДИДО

Я понимаю, что для физиков подтвердить это различие между *реальным* и *понятным* должно быть также тяжело, как было трудно математикам принять различие между *верным* и *доказуемым*. Но мы говорили об этом довольно долго в разд. III.8.

АКАДЕМУС

Вы говорили о двух сомнительных моментах. В чем же заключается второй?

КАНДИДО

Согласно анализу квантовой вероятности, что на самом деле доказали отцы-основатели квантовой теории, так это отсутствие существования *единого* распределения вероятности в пространстве с классическими траекториями системы, совместимого со статистическими данными, полученными в экспериментах, которые проводились в условиях взаимной несовместимости. Исходное доказательство основывалось на эксперименте с двумя отверстиями, но как только схема этого доказательства становится понятной, ее легко воспроизвести во многих конкретных примерах, и к этому же тезису можно прийти, рассматривая эксперименты по исследованию спина отдельных частиц или синглетных корреляций (как и в неравенствах Белла) или в других случаях... Это доказательство неоднократно проверялось, и по всей видимости оно верно, поскольку эксперименты его подтверждают.

Отцы квантовой теории четко различали отсутствие существования *единого* распределения вероятности в пространстве классических траекторий системы и отсутствие (физическое) самого пространства траекторий.

АКАДЕМУС

В этом нет противоречия: Бом ограничивается построением *для каждого* приготовления эксперимента (квантового состояния) распределения вероятностей.

КАНДИДО

Но тогда Бом, так же как и Поппер, решает проблему, поставленную отцами квантовой теории, тем, что просто-напросто игнорирует ее.

БИЛЬБО

В конце концов модель Бома четко реализует то, что квантовая вероятность четко формулирует: различие между данными, полученными в несовместимых экспериментах.

КАНДИДО

Довольно странно говорить о *четкой интерпретации*, кроме того, теория квантовой вероятности простирается намного дальше этого общего различия.

АКАДЕМУС

Краткая реконструкция первоначальных вариантов многих интерпретаций в терминах классических теорий, квантовой волновой функции (т. е. состояния) может быть полезной. Интерпретация Бома является одной из них. Эти интерпретации корнями уходят в те же исходные мемуары, что и интерпретации де Бройля и Шрёдингера. Однако отличительная черта этих теорий основана на более поздней идее, которую можно отнести к теории *волны-пилота* де Бройля. Это является прототипом многих теорий, которые хотя и отличаются друг от друга в различных технических аспектах, но основываются на одной и той же идее.

КАНДИДО

Тогда в чем же заключается эта идея?

БИЛЬБО

Сначала де Бройль, а затем и многие другие взяли два основных объекта математической модели квантовой теории: волновую функцию и уравнение Шрёдингера, *взяли*, так сказать, *по частям*, а затем показали, что эти части можно комбинировать, в результате чего получится классическая модель.

АКАДЕМУС

Идея очень проста: квантовое состояние распадается на две *половины*, каждой из которых дается интерпретация в терминах классической физики. Тогда уравнение Шрёдингера записывается в терминах этих двух частей и интерпретируется как система из двух уравнений для двух классических величин. С концептуальной точки зрения неважно, каким образом на самом деле происходит такое разложение²⁴.

БИЛЬБО

Эту операцию можно производить несколькими способами. Давайте назовем *моделями типа де Бройля и Бома* различные типы моделей, полученные при применении этой процедуры.

²⁴ Оно соответствует модулю и фазе комплексного числа, представляющего волновую функцию.

КАНДИДО

Кажется, это довольно сложная операция: чем же она интересна?

БИЛЬБО

Она интересна потому, что эта модель совпадает с моделями квантовой теории.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что таким образом вся квантовая модель превращается в классическую модель?

АКАДЕМУС

Именно.

КАНДИДО

Но тогда нет никаких проблем! Квантовая физика не отделяется от классической физики, а является ее продолжением. Старая интуиция безопасна, со своими траекториями, с тем, что наблюдаемые всегда имеют четкие значения, без каких-либо странных комплексных чисел и математического формализма, далекого от интуиции. Все это совсем не нужно! Эти понятия возникли благодаря чистой исторической случайности, потому что отцы-основатели квантовой теории были недостаточно умны, чтобы понять, что то, что они делали с помощью этого сложного математического формализма, можно было с таким же успехом делать, используя стандартные инструменты классической вероятности и классической механики. Проблемы измерения, распадов, парадоксов, объективизаций и виртуальностей, ... постепенно исчезают.

Более того, вся квантовая физика постепенно исчезает и мы вновь оказываемся в теплых и дружеских объятиях классического взгляда на мир.

АКАДЕМУС

Продолжайте. Мне кажется, мы продвигаемся слишком быстро.

КАНДИДО

Не понимаю... Верно ли то, что с помощью теории волны-пилота или одной из ее разновидностей можно сформулировать квантовую теорию, исходя из классической схемы?

БИЛЬБО

Конечно.

КАНДИДО

Это также верно и для эксперимента с двумя отверстиями?

БИЛЬБО

Да.

КАНДИДО

Тогда каким образом можно преодолеть то противоречие, о котором мы с Вами говорили раньше? Если мы *доказали*, что нельзя применять правила классической вероятности к этому эксперименту, как могут некоторые модели классической вероятности подходить именно для этого эксперимента? Что-то явно не так.

АКАДЕМУС

Объяснение довольно простое и мы его уже произнесли: при анализе эксперимента с двумя отверстиями мы пришли к заключению, что три статистические величины

$$P(X), \quad P(X | 1), \quad P(X | 2), \quad (\text{VII.4.1})$$

полученные в трех несовместимых экспериментах, нельзя описать в рамках *одной* модели классической вероятности.

Напротив, в модели типа де Бройля–Бома *используется не одна модель классической вероятности* для описания всех трех статистических величин (VII.4.1), а три: *одна модель классической вероятности* создана для описания вероятности $P(X)$, другая — для вероятности $P(X | 1)$, третья — для $P(X | 2)$.

КАНДИДО

Как связаны все эти модели?

БИЛЬБО

Эта связь заключается в том, что все они описывают одну и ту же физическую систему аналогично квантовой модели.

КАНДИДО

Это единственная связь между ними?

БИЛЬБО

О чем еще Вы хотите спросить? Если обе теории совпадают в отношении всех наблюдаемых, то они с точки зрения физики эквивалентны.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что для кого-то, кто *не знает*, что все эти модели возникли из одной квантовой модели, нелегко понять это?

АКАДЕМУС

Я не уверен, что Бильбо действительно имеет это в виду, но ответ на Ваш вопрос должен быть утвердительным. Правило принципа суперпозиции, которое легко применить, не имеет эквивалента в этом контексте. Эти классические модели построены начиная с квантовых объектов с помощью сложных нелинейных преобразований, физический смысл которых совершенно

неясен. Следовательно, код преобразований, которые в рамках квантового формализма весьма просты, например, суперпозиция двух квантовых состояний, становится здесь чрезвычайно сложным.

Вследствие этих причин в нашем случае такие *альтернативные модели* всегда выглядели подозрительно и ненадежно.

КАНДИДО

Я все еще не могу понять: суть аргумента Фейнмана состояла в том, что как в классическом, так и в квантовом случае имеется глубокая связь между результатами трех экспериментов с двумя отверстиями. Теорема составных вероятностей в классическом случае и теорема составных амплитуд в квантовом. Последняя объясняет интерференционные полосы.

Как мы видели, Фейнман утверждает, что единственный способ объяснить, почему не применяется теорема составных вероятностей, это признать, что ненаблюдаемый электрон не может пройти через одно и только одно из двух отверстий.

Это, пожалуй, единственное имеющееся в литературе доказательство (с точностью до косметических изменений) *необходимости* приписывать *физическую реальность* состояниям суперпозиции. Более того, оно утверждает, что как только происходит отказ от физической реальности состояний суперпозиции, все парадоксы квантовой теории прекращаются на корню.

Каково место моделей типа Бома – де Бройля в этом споре?

БИЛЬБО

Они также противостоят анализу Фейнмана, но в отличие от квантовой вероятности, вместо того, чтобы анализировать и выявлять его слабые места, они создают альтернативную модель, которая, по мнению этих авторов, показывает, что тезис Фейнмана не верен. Действительно, в этой альтернативной модели каждый электрон имеет свою, точно определенную траекторию, которую, однако, нельзя наблюдать.

АКАДЕМУС

Мы только что видели, что это не *одна альтернативная модель*, а *множество альтернативных моделей*: по одной для каждого варианта подготовки эксперимента.

Эти модели отказываются от основного достижения квантовой теории — описания множества экспериментальных данных в рамках *одной математической модели*, которая не ограничивается предсказанием результатов, а пытается также объяснить их взаимосвязь.

БИЛЬБО

Но если за это единство математической модели я должен заплатить отказом от концепции траекторий, то я предпочту отказ от нее самой. В конце концов это единство касается лишь формальной красоты, в то время как траектории являются частью моей интуиции, моего взгляда на мир.

КАНДИДО

Но тогда Вы должны быть довольны результатами анализа квантовой вероятности, который позволяет Вам оставить идею о траектории и в то же время использовать более сильную и обобщающую модель квантовой теории.

БИЛЬБО

Я не доволен, поскольку квантовая вероятность утверждает только, что *не существует принципиальных противоречий в признании существования четко определяемой траектории электрона*, но далее не проявляет никакого интереса к этой траектории, а только принимает формализм обычной квантовой теории, хотя и с иной интерпретацией.

Модели типа Боме–де Бройля меня удовлетворяют значительно больше: они позволяют *видеть* эти траектории.

АКАДЕМУС

Этот момент мне не ясен: разве Вы не говорили, что эти модели воспроизводят все результаты квантовой теории? Все знают, что эта теория не описывает траекторий в классическом пространстве.

БИЛЬБО

Все, но не *только* их. В этих моделях существует множество явлений, которые квантовая теория предсказать не может.

КАНДИДО

Если то, о чем Вы говорите — правда, то это вдохновляет. Это означает, что теории типа Боме–де Бройля являются *обобщением* квантовой теории, и поэтому можно проводить эксперименты, которые позволят выявить новые явления, ожидаемые на основании этих теорий.

АКАДЕМУС

Вы слишком легко вдохновляетесь. *Разве Вам не кажется странным, что теория, целью которой является победа над другой теорией, соглашается практически со всеми положениями той теории, которую она хочет превзойти* и отличается от нее только *последующими* положениями?

Если Вы вспомните историю науки, то это будет первым случаем, когда теория, которая была с успехом подтверждена экспериментально, заменяется другой теорией, *которая не противоречит ни одному из ее положений*.

Коперник, Кеплер, Галилей опровергли некоторые предсказания Птолемея; Галилей опроверг идею Аристотеля о том, что сила тяготения пропорциональна скорости: он же полагал, что она пропорциональна ускорению, и этот закон, обобщенный Ньютоном в отношении *любой природной силы*, теперь известен как *второй закон динамики*; Ньютон и Гюйгенс опровергли некоторые предсказания Картезиана; теория Эйнштейна подкорректировала некоторые предсказания теории Ньютона; квантовая теория подкорректировала некоторые предсказания электромагнитной теории Максвелла . . .

КАНДИДО

Я понимаю, что Вы имеете в виду: если бы какая-нибудь *теория о скрытых параметрах* была бы верна, то впервые за всю историю одна теория замещала бы другую, *сохраняя все ее предсказания*. Да, это кажется странным, но мне не нравятся эти ваши общие разговоры. Я до конца понял эксперимент с двумя отверстиями. Значительно меньше я понимаю эти философствования.

АКАДЕМУС

Что мне не нравится — так это то, что *единственными новыми предсказаниями теорий скрытых параметров являются предсказания таких вещей, которые в принципе нельзя наблюдать*. Например, мы видели, что нельзя описать эксперимент с двумя отверстиями с помощью только *одной* модели классической вероятности, нужны, по крайней мере, две модели: одна для описания вероятностей $P(X)$ и $P(X | 2)$, а другая для описания вероятности $P(X | 1)$. В модели, которая описывала вероятности $P(X)$ и $P(X | 2)$ вероятность события X , условного для события 1, также будет определена, давайте назовем ее $P_{HV}(X | 1)$ для того, чтобы не спутать с $P(X | 1)$.

Обычная квантовая теория не может предсказывать такую условную вероятность, однако, поскольку в принципе ее нельзя наблюдать благодаря принципу неопределенности Гейзенберга, между этими моделями не может возникнуть никаких противоречий.

Аналогичным образом квантовая теория не описывает траекторию частиц, когда их не наблюдают, в то время как эти теории ее описывают.

БИЛЬБО

Точнее, $P_{HV}(X | 1)$ — условная вероятность того, что электрон прибывает в область X , пройдя через отверстие 1, *когда оба отверстия открыты*, и мы все согласны с Фейнманом в том, что такая вероятность, в принципе, не наблюдается без того, чтобы значительно не ухудшить результат. Но я не

вижу в этом ничего плохого. По крайней мере, это позволяет подтвердить, что никто не сможет экспериментально доказать, что эти модели типа Боме–де Бройля ошибочны.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что теории скрытых параметров не могут противоречить экспериментальным данным, поскольку их предсказания, когда их можно наблюдать экспериментально, совпадают с предсказаниями квантовой механики.

БИЛЬБО

Кроме того, они создают *полную* картину реальности, поскольку они досконально описывают траектории частиц. Давайте сделаем вывод, что эти теории *являются более подходящими*, чем стандартная теория. Пожалуйста, заметьте, я не говорю *лучше* другой, что означает, что они имеют более точные предсказания, а лишь *более подходящие*, что означает, что предсказания равноценны, но дают *более полную* интуитивную картину: они не *предсказывают* больше, а больше *объясняют*.

АКАДЕМУС

Неправильно говорить, что теории скрытых параметров *не предсказывают больше*. На самом деле они содержат большое количество предсказаний, не включенных в стандартную теорию, только эти предсказания не сравнимы с опытом. Подумайте, например, о вероятности $P_{HV}(X | 1)$, о которой мы только что говорили.

БИЛЬБО

Мне кажется, что это весьма тонкая философская проблема. Действительно, как только мы принимаем принцип неопределенности Гейзенберга, мы должны согласиться с тем, что теории скрытых параметров содержат множество формулировок, несопоставимых с опытом. Но имеет ли смысл называть *предсказаниями* эти *утверждения*? Если Вы согласны называть *предсказаниями* только те утверждения, которые можно проверить экспериментально, тогда утверждение Академуса, согласно которому теории скрытых параметров *предсказывают* многое из того, что не входит в квантовую теорию, абсолютно беспочвенно.

АКАДЕМУС

Это, кажется, чисто *номинальный* вопрос. Даже признавая различие между *предсказаниями* и *утверждениями*, нужно иметь в виду тот факт, что теории скрытых параметров содержат массу избыточной информации, которую в принципе нельзя проверить экспериментально.

БИЛЬБО

Ну и что?

АКАДЕМУС

Принцип экономии, согласно которому теория природного явления должна ограничиваться экспериментально проверяемыми положениями, был бы нарушен.

БИЛЬБО

Теория *не* должна ограничиваться *только* такими положениями. Поэтому этот *принцип экономии* определен несколько туманно и, следовательно, его трудно проверить с разумной точки зрения. Короче, это не научное утверждение. Кроме того, как Вы можете говорить, что более экономичная, но менее интуитивная теория *лучше* менее экономичной, но более интуитивной? Это зависит исключительно от психологии и тесно связано с индивидуальным вкусом.

АКАДЕМУС

Согласен: очень трудно провести четкую границу. Но более серьезным возражением против теорий скрытых параметров является не *принцип экономии*, а природа их существования как *паразитических теорий*: с одной стороны, они хотели бы занять место стандартной квантовой теории, с другой стороны, им нужна эта теория как предел сравнения и проводник. *Их сравнение с природными явлениями не прямое, оно возникает с помощью другой теории: стандартной квантовой теории.*

БИЛЬБО

Это то, что происходило до сих пор, но Вы не можете сделать заключение, что в будущем эти теории окажутся важным источником физических открытий. Кроме того, до сих пор количество людей, посвятивших себя этому альтернативному пути, было очень невелико по сравнению с количеством тех, кто шел по основному пути стандартной теории.

АКАДЕМУС

Когда это произойдет, я это с радостью признаю. Однако в настоящее время Вы должны согласиться, что этого не произошло и что теории скрытых параметров все время обращаются к *материнской теории* для того, чтобы выяснить, какие из положений сравнимы с экспериментальными данными, а какие нет. В этом смысле и без какой-либо полемической цели я назвал их *паразитическими теориями*. Некоторые используют термин *теории ad hoc* (искусственные).

НОРТ

В каком-то смысле общая неприязнь к теориям *ad hoc* ведет к противодействию увеличению количества теорий с эквивалентной, но не большей, чем у уже существующих теорий, способностью объяснять явления. Поэтому если у двух теорий есть то, что мы можем схематично назвать «одним и тем же эмпирическим базисом», то теория, которая возникла позже, непременно будет названа *ad hoc*²⁵.

КАНДИДО

Существует и другая проблема: предположим, что вредный математик придумывает другую модель классической вероятности, которая имеет следующие свойства:

(I) в этой модели также все наблюдаемые предсказания совпадают с предсказаниями квантовой механики;

(II) на основании этой модели можно также сделать новые предсказания, но их нельзя наблюдать экспериментально;

(III) некоторые из экспериментально ненаблюдаемых предсказаний новой модели не согласуются с подобными предсказаниями старой модели скрытых параметров.

На этой стадии Вы бы имели два *полных описания*, согласующихся друг с другом (а также с *неполным описанием* квантовой теории), всех наблюдаемых предсказаний; но они противоречат друг другу в отношении ненаблюдаемых предсказаний.

Предположим, что этот вредный математик говорит, что его *полное описание* верно, а ваше — нет. Поскольку наблюдаемые предсказания обеих теорий совпадают, как Вы сможете доказать, что он не прав?

АКАДЕМУС

То, о чем Вы говорите, — не абстрактная возможность, а реальность. На самом деле существует множество теорий, основанных на классической интерпретации квантовой волновой функции (или, скорее, *двух частей*, на которые она разложена, о чем мы ранее уже упоминали): гидродинамическая теория, теория волны-пилота и многие другие, перечисление которых заняло бы слишком много времени. Возможно, единственная теория, которая привела к нетривиальным результатам, по крайней мере с математической точки зрения, — это *стохастическая механика* Нельсона²⁶.

²⁵J. D. North, *The measure of the universe (A history of modern cosmology)*, Dover 1990, p. 18.

²⁶Edward Nelson, *Quantum Fluctuations*, Princeton University Press 1985; *Dynamical Theories of Brownian motion*, Princeton University Press 1972; см. также Francesco Guerra, *Nelson Stochastic Mechanics and the Interpretation of Quantum Mechanics*, in *The interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, november (1994).

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что все эти теории предсказывают классические траектории, но эти траектории меняются в зависимости от теории?

АКАДЕМУС

Именно. Например, траектории в интерпретации де Бройля – Бома являются очень регулярными кривыми, в то время как траектории стохастической механики — нерегулярные и дают совершенно иное интуитивное восприятие, исходя из поведения частиц в пространстве и во времени.

КАНДИДО

Если эти теории отличаются друг от друга, нетрудно будет убедиться, которая из них лучше. Достаточно провести эксперимент для того, чтобы проверить, какие предсказания, отличающиеся от предсказаний обычной квантовой теории, подтверждаются, а какие нет.

АКАДЕМУС

Я уже говорил Вам, что благодаря принципу неопределенности эти теории не могут выдвинуть наблюдаемые предсказания, отличные от предсказаний обычной квантовой теории.

КАНДИДО

Вы подразумеваете, что выбор между этими теориями не может являться предметом характеристического эксперимента? Что он сводится к *индивидуальному вкусу*? Это кажется очень странным. Не могли бы Вы привести конкретный пример, чтобы помочь мне понять это?

АКАДЕМУС

Эти теории, например, позволяют вычислить связанные вероятности положения частицы в разные моменты времени. Однако они несопоставимы с наблюдаемыми относительными частотами. Как только измерение сделано, например, в отношении первого момента, квантовое состояние меняется и последующие измерения более уже не относятся к предыдущему моменту. Следовательно, нет смысла сравнивать относительные частоты, полученные при проведении этих измерений, со связанными вероятностями, предсказанными теорией.

БИЛЬБО

Экспериментальные предсказания не являются единственным фактором выбора той или иной теории. Существуют и другие: например, имеется много классических теорий, которые объясняли различные новые эффекты, предсказанные общей теорией гравитации, хотя почти все ученые предпочли принять схему интерпретации общей теории относительности.

АКАДЕМУС

Выбранный Вами пример противоречит Вашему тезису: причина, по которой предпочтение было в конце концов отдано общей теории относительности, состоит в том, что она создала унифицированную схему, которая могла объяснить и предсказать несколько явлений, в то время как различные альтернативные классические теории состояли в развитии модели *ad hoc* для каждого явления, объясняемого с помощью относительности. Было доказано, что они хуже как в качестве инструмента предсказаний, так и в качестве унифицированного шаблона. Эти теории скрытых параметров, которые разбивают единство квантовой теории на множество отдельных моделей, гораздо больше похожи на альтернативные теории, чем на относительность: они разбивают теоретическое единство и слабы в отношении предсказаний.

БИЛЬБО

Я мог бы согласиться с Вами в отношении относительности, но я не понимаю, почему она мешает моей теории.

АКАДЕМУС

Аналогия абсолютна: Вы хотите заменить множеством моделей *ad hoc* (по одной для каждого условия подготовки) схему, которая до сих пор являлась также хорошим инструментом для предсказаний.

Более того, единственным неслучайным элементом в этом множестве моделей является тот факт, что их предсказания согласуются с предсказаниями той теории, которую они должны заменить.

КАНДИДО

Изложенная таким образом программа скрытых параметров не кажется достаточно убедительной. Однако такое ее представление недооценивает важный аспект в философии данного подхода: согласно ортодоксальной интерпретации, квантовая теория несовместима с существованием траекторий. Напротив, эти теории скрытых параметров построены таким образом, что они воспроизводят все результаты квантовой теории и в то же время допускают существование траекторий.

АКАДЕМУС

Я полагаю, что то, о чем Вы говорите, противоречит теореме, которую первым доказал Нейман, а затем обобщили многие другие авторы, пытавшиеся доказать невозможность того, что теория скрытых параметров воспроизводит все результаты квантовой теории.

КАНДИДО

На самом деле цели этих теорем значительно более ограничены: они только собирались доказать, что *математическая модель квантовой теории не*

может быть изоморфной ни классической детерминистской модели, ни классической вероятностной модели.

БИЛЬБО

Мне кажется, что такая программа изначально обречена если не на провал, то, по крайней мере, на неубедительность.

Во-первых, то, что Вы называете *математической моделью квантовой теории*, не определяется однозначно, если не вводятся допущения чисто *техничко-формального* типа, которые не так уж легко оправдать с физической точки зрения²⁷.

Во-вторых, для такой сложной структуры, как математическая модель квантовой теории, существует множество неэквивалентных понятий *изоморфизма* и, поскольку они отличаются друг от друга по техническим и формальным причинам, никогда нельзя было выделить одно — наиболее привилегированное по сравнению с другими по *техническим причинам*.

Наконец, само требование *математического изоморфизма* физически совершенно не оправдано. Конечно же, можно придумать теорию с совершенно иной математической структурой, но приводящую к тем же самым физическим формулировкам. Тщательный обзор этих различных *теорем неизоморфизма* содержится в статье L. Accardi, *Foundations of Quantum Mechanics: a quantum probabilistic approach, in The Nature of Quantum Paradoxes*, eds. G. Tarozzi, A. van den Merwe Reidel (1988), 257–323. Знание этих теорем может представлять исторический интерес, но ничего не добавляет к пониманию обсуждаемых в настоящее время концептуальных проблем.

Диалог.

ГАРУЧЧИО

Как говорил Белл, *теоремы о невозможности только доказывают отсутствие воображения у тех, кто их доказывает*.

АКАДЕМУС

В этом отношении забавно отметить, что результаты, благодаря которым Белл стал знаменитым, — не что иное как теорема о невозможности.

КАНДИДО

Не думаю, что теорема о невозможности может остановить подобные споры. Такие теоремы пытаются доказать невозможность того, что теория скрытых параметров *существует*, в то время как, на мой взгляд, менее

²⁷Типичным примером таких технических допущений является постулат взаимно однозначных соответствий между наблюдаемыми и самосопряженными операторами в гильбертовом пространстве.

убедительный аспект всех этих попыток *дополнить квантовую теорию* не столько говорит об их *несуществовании*, сколько об их *исключительной неоднозначности*.

Действительно, мы видели, что таких *дополнений квантовой теории*, в соответствии с наложенными на них условиями, существует либо слишком много, либо ни одного.

БИЛЬБО

Есть надежда идентифицировать класс *завершенных* моделей, т. е. таких, которые дают точное или, по крайней мере, статистическое описание траекторий, а затем ввести некоторые дополнительные условия, которые помимо прочего выделяют наиболее убедительную с физической точки зрения модель.

КАНДИДО

Но, как и в случае множества понятий изоморфизма, эти *дополнительные условия* должны быть, по крайней мере в принципе, произвольными и субъективными: до тех пор, пока единственным наблюдаемым критерием значимости таких *дополнений* будет соответствие с предсказаниями квантовой теории, до тех пор не будет существовать объективного экспериментального критерия, по которому будут различаться различные модели скрытых параметров.

БИЛЬБО

Не обязательно. Например, Белл доказал, что можно экспериментально отличить *дополнения*, выполняющие физическое условие *локальности*, от квантовой теории.

По этой причине многие из нас считали неравенства Белла важным открытием: они предоставили инструмент для решения на экспериментальной основе вопроса: допускает квантовая теория *локальное дополнение* или нет.

КАНДИДО

Я слышал это неоднократно... Настало время более пристально рассмотреть этот вопрос.

ГЛАВА VIII

VIII.1. Белл и скрытые параметры

АКАДЕМУС

Давайте посмотрим, какова ситуация: концептуальная новизна квантовой теории по сравнению с классическими теориями состоит в том, что в первой введены состояния суперпозиции. Для системы, находящейся в таком состоянии, квантовая теория может предсказывать с определенностью (в смысле приписывать им вероятность, равную нулю или 1) значения *некоторых* наблюдаемых, но значения других наблюдаемых может предсказывать лишь с определенной вероятностью¹. Согласно ортодоксальной интерпретации такое описание является *полным*, а это означает, что только те наблюдаемые, чьи значения можно теоретически предсказать с определенностью, имеют точные значения, в то время как те наблюдаемые, для значений которых теоретически можно предсказать лишь вероятности, имеют виртуальные значения *объективно неопределенные*. В этом смысле мы говорим об *объективных вероятностях* или об *объективной случайности* в противоположность обычным вероятностям, лишь отражающим незнание значений, которые предположительно существуют и могут быть точно определены независимо от наблюдателя (реализм). В литературе, посвященной вероятности, предшествующей спорам о квантовой теории, те вероятности, которые физики называют *объективными*, также называются *онтологическими*, а те, которые лишь отражают незнание, называются также *эпистемическими*. С концептуальной точки зрения революционный аспект квантовой теории заключается именно в этом: обычные статистические теории требуют *игнорирования чего-то, что существует*; квантовая теория посредством ортодоксальной интерпретации состояний суперпозиции требует способности *доказывать отсутствие существования того, что она провозглашает непознаваемым*.

КАНДИДО

Но не все согласны с такой интерпретацией.

¹Здесь имеется в виду, что такие вероятности отличаются от нуля или единицы.

ШИМОНИ

Некоторые теоретики, однако, поддерживают точку зрения о том, что квантовое состояние просто описывает статистическую совокупность систем, подготовленных одним и тем же способом. . . . , индивидуальные члены совокупности отличаются друг от друга таким образом, о котором квантовая механика не упоминает, и поэтому результаты индивидуальных экспериментов различны.

АКАДЕМУС

Он явно обращается к приверженцам *статистической интерпретации*, которую мы обсуждали в разд. II.5.

КАНДИДО

Да, но, кажется, он смотрит на них свысока.

КАНДИДО

Более того, может показаться, что, путая, он идентифицирует их с приверженцами скрытых параметров.

ШИМОНИ

Свойства отдельных систем, не заданные квантовым состоянием, известны как *скрытые параметры*. Если сторонники скрытых параметров правы, *объективной неопределенности* не существует. Существует только незнание учеными значений скрытых параметров, характеризующих интересующие их отдельные системы. Кроме того, нет ни *объективной случайности*, ни *объективных вероятностей*².

КАНДИДО

Из того, что он говорит, создается впечатление, что он считает безнадежным дело тех, кто хочет объявить о том, что *объективная неопределенность* и *объективная случайность* являются всего-навсего искусственными моделями.

АКАДЕМУС

Как и многие другие, он уверен, что Белл определенно доказал, что раз квантовая теория принята, необходимо принять либо объективную неопределенность, либо объективную случайность, либо согласиться с нарушением принципа локальности.

КАНДИДО

Но не является ли объективная причинность ортодоксальным тезисом о наблюдаемых, не имеющих значений, если их не наблюдают?

²A. Shimony, «Scientific American», January 1988, pp. 36–43.

АКАДЕМУС

Да, конечно. И *объективная случайность* следует из этого, потому что *переход из неопределенного в определенное* не подчиняется никакому детерминистскому закону, а только лишь случаю.

СТАПП

... Квантовая теория предсказывает вероятности нескольких возможных результатов измерения, а не сами отдельные результаты. Поэтому возникает вопрос о возможности существования более полной теории: может ли существовать теория, согласующаяся с предсказаниями квантовой теории, но предсказывающая конкретные результаты, а не просто их вероятности?

Ответ будет *нет*. Этот вывод основан на недавно вышедшей статье Белла³.

БЕРНАРДИНИ

Джон Белл решил найти то, что отличало бы внутренне детерминистские теории от теорий, которые казались таковыми только потому, что что-то ускользало от наших текущих измерений⁴...

АКАДЕМУС

Это *что-то* — *скрытые параметры*.

КАНДИДО

Таким образом, согласно этим авторам существует два типа индетерминистских теорий: один тип, в котором индетерминизм является только кажущимся благодаря тому факту, что наша информация о том явлении, которое мы описываем, является неполной; другой тип отражает индетерминизм, присущий природе. Мы уже сталкивались с этой альтернативой в разд. III.8.

АКАДЕМУС

Все полагают, что Белл нашел способ, как можно экспериментально отличить друг от друга эти два типа теорий.

БЕРНАРДИНИ

... Белл предписывает: измерьте такую-то и такую-то величину, если она больше определенного значения, то квантовая механика говорит обо всем, о чем мы только можем знать, если ее значение меньше, то квантовая механика неполна.

АКАДЕМУС

Он ссылается на знаменитое *неравенство Белла*.

³Н. P. Stapp, Phys. Rev D 3, 3-ser (1971) 1303–1320.

⁴Carlo Bernardini, «L'Espresso», 14 Aprile 1991.

БЕРНАРДИНИ

В 1975 г. Аспекту удается доказать, что квантовая механика говорит обо всем, что мы должны знать⁵...

АКАДЕМУС

Он имеет в виду, что эксперимент Аспекта вновь подтверждает предсказания квантовой теории и, напротив, нарушает неравенство Белла.

КАНДИДО

Я запутался в терминах: сначала Бернардини говорит об индетерминизме и неполноте, затем *обо всем, о чем мы должны бы знать*, затем эта *внутренне индетерминистская теория*, в то время как *неполными теориями* являются статистические теории, в которых индетерминизм — только кажущийся, который можно устранить, имея больше информации.

АКАДЕМУС

Из текста легко можно видеть, что он использует эти выражения как синонимы.

КАНДИДО

Мне они не кажутся синонимами. отождествление ограничений на возможность получения нами знаний с ограничениями на само существование является одним из самых крупных источников недопонимания в интерпретации квантовой теории: одни говорят о невозможности измерить в одно и то же время с любой точностью местоположение и скорость (мгновенную) в одной и той же системе; другие говорят, что положение и скорость *не существуют* в одно и то же время в одной системе; одни говорят, что квантовая теория является индетерминистской, другие — что индетерминизм теории отражает индетерминизм *природы*...

АКАДЕМУС

В свете того, что Вы только что сказали, формулировку Бернардини нужно интерпретировать в том смысле, что теоретический результат Белла и эксперимент Аспекта доказали внутренне индетерминистский характер квантовой теории, вызвавший также...

БЕРНАРДИНИ

... разочарование и уныние среди детерминистов. Бог играет в кости — это должен был допустить Эйнштейн, который посредством этой фразы отверг такую возможность как совершенно абсурдную⁶...

⁵См. примечание 4.

⁶См. предыдущее примечание.

КАНДИДО

Вот пример двусмысленности, о которой я говорил ранее: *разочарование и уныние детерминистов* оправдано необходимостью индетерминистской теории. Но, даже признавая такую необходимость, Эйнштейн совершенно ничего не допускал, поскольку его утверждение *Бог не играет в кости* относится к *природе*, а не к *теории*.

АКАДЕМУС

Но разве описание природы не входит в задачу теории?

КАНДИДО

Сторонники механицизма привыкли думать о *зеркальном отражении*. Принцип неопределенности накладывает некоторые ограничения на это описание, заставляя человека играть в кости и надменно ожидать, что и Господа можно заставить делать то же самое.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, заслуга неравенства Белла и экспериментов Фридмана, Клаузера, Фрайя, Томпсона, Раписарда, Гаруччо, Аспекта, Далибара, Роджера, . . . состоит в том, что они доказали тот факт, что квантовая теория по сути своей является индетерминистской.

КАНДИДО

Но, обсуждая принцип неопределенности, разве мы не пришли к заключению, что *каждая теория, принимающая форму, какой бы слабой она ни была, принципа неопределенности, в сущности является индетерминистской?* Разве мы не признаем невозможность доказательства того, что *природа* в сущности индетерминистична и что самое большое, что мы можем — это доказать, что *наше описание природы* должно быть индетерминистским?

АКАДЕМУС

Да, действительно, мы пришли к этому заключению.

КАНДИДО

Тогда Ваше восхваление заслуг неравенства Белла и соответствующих экспериментов для меня весьма загадочно: то, что квантовая теория по существу является индетерминистской — очевидно, поскольку она принимает принцип неопределенности; то, что неравенство и эксперименты доказывают, что *сама природа* по существу индетерминистична — Вы сами считаете ошибочным. Что же тогда добавили к нашим знаниям это неравенство и эксперименты?

АКАДЕМУС

Мы хотели сказать, что эти результаты доказывают невозможность *дополнения* квантовой теории.

КАНДИДО

Но, обсуждая скрытые переменные, мы видели, что выражение *дополнить квантовую теорию* можно интерпретировать по-разному и что в соответствии с интерпретацией оно будет либо тривиально ошибочным, либо тривиально правильным.

АКАДЕМУС

Да. Но дополнение, о котором говорил Белл, имеет глубокий физический смысл.

КАНДИДО

Разве Вы мне не говорили, что анализ эксперимента с двумя отверстиями, который был выполнен за сорок лет до Белла, можно интерпретировать как попытку уменьшить количество ошибочных физических выводов, следующих из реалистического допущения того, что электрон проходит только через одно из двух отверстий, а не одновременно через оба?

АКАДЕМУС

Но этот анализ не относится к постулату локальности.

БЕРНАРДИНИ

... Камнем преткновения в неравенстве Белла и эксперименте Белла является так называемая нелокальность квантовой механики⁷...

ЖИРАРДИ

Белл посредством этой плодотворной работы сделал квантовую нелокальность полностью видимой... он пришел к тому, чтобы провести решающие эксперименты, которые выявили нелокальность процессов, происходящих в природе⁸...

КАНДИДО

Но тогда, в противоположность тому, о чем говорил Бернардини, основной момент в рассуждениях Белла лежит не в *различии между теориями, которые по своей сути являются индетерминистскими, и теориями, которые только кажутся таковыми потому лишь, что что-то ускользает от наших измерений, проводимых в настоящее время, а скорее в этом дополнительном требовании локальности, которая является не только еще одним камнем преткновения, но и решающим моментом всего доказательства. Действительно, как мы видели, можно сформулировать множество теорий скрытых параметров (на самом деле слишком много), согласующихся со всеми статистическими предсказаниями квантовой механики. Очевидно, что эти теории с точки зрения Белла являются нелокальными.*

⁷ Carlo Bernardini, «L'Espresso», 14 Aprile 1991.

⁸ G. C. Ghirardi, «La Repubblica», Venerdì 8/1/1993; l'Unità 9.11.1992.

АКАДЕМУС

То, что они нелокальны — очевидно: последняя возможность исключается теоремой Белла.

ШИМОНИ

В 1964 г. Джон С. Белл в ЦЕРНе — Европейском центре исследования частиц — показал, что предсказания *локальных моделей скрытых параметров* несовместимы с предсказаниями квантовой теории. Рассмотрение некоторых локальных моделей скрытых параметров Дэвидом Бомом из Биркбекского колледжа в Лондоне и Луи де Бройлем привели Белла к важной теореме о том, что никакая локальная (в самом точном смысле этого слова) модель не может соответствовать всем статистическим предсказаниям квантовой механики. Иными словами, существуют физические ситуации, в которых предсказания квантовой механики не согласуются с предсказаниями отдельной модели скрытых параметров⁹.

КАНДИДО

В некоторых случаях это именно так, но что означает ... локальная (в самом точном смысле этого слова) модель? Очевидно, Шимони в остальной части статьи приводит *точный смысл* этого выражения.

АКАДЕМУС

Нет, он этого не делает. Я очень хорошо знаю эту статью, но я нигде не нашел вышеупомянутого *точного смысла*. Возможно, Шимони считал это необязательным, поскольку это очевидно.

КАНДИДО

А разве статья Шимони не была опубликована в таком популярном журнале, как *Scientific American*?

АКАДЕМУС

Конечно была, ну и что же?

КАНДИДО

А разве популярные статьи не предназначены для того, чтобы разъяснять концептуальные аспекты научных проблем, оставляя детали специальным публикациям? Разве мы не рискуем, пряча важные концептуальные вопросы за техническими тонкостями, которые нельзя даже объяснить, создать ложные представления, которые могут попасть в статьи и получить широкое распространение?

ГРЕКО

... реалистичный детерминист действительно должен заплатить непомерную цену. Цену, обусловленную нелокальностью: те, кто все еще хочет

⁹A. Shimony, *Scientific American*, January (1988) 36–43.

принимать теорию скрытых параметров, должен согласиться с постоянным действием на расстоянии, а также согласиться с тем, что два электрона могут *переговариваться*, посылая сообщения со скоростью, превышающей скорость света. Это означает отказ от специальной теории относительности Эйнштейна¹⁰.

АКАДЕМУС

Именно это и делает Шимони в своей статье: он показывает, насколько странной, таинственной, абсурдной и далекой от здравого смысла является квантовая теория.

КАНДИДО

У непосвященного читателя легко создать ауру таинственности с помощью намеков, введения без какого-либо объяснения концепций, неожиданных логических скачков и играя на том, что большинство читателей будет готово обвинить в своем невежестве или отсутствии понимания то, что должно быть приписано неполноте, если не склонности автора к театральности.

АКАДЕМУС

Здесь нет ни тайны, ни театральности: роль локальности в неравенстве Белла широко обсуждается в литературе. Думаю, что Стапп был среди первых, если не первый, кто ясно выразил как теорему то, что в настоящее время считается самым важным следствием неравенства Белла.

КАНДИДО

И какова же формулировка этого тезиса?

СТАПП

Ни одна теория не может:

(а) сделать *возможными* общие предсказания конкретных результатов измерений;

(б) быть совместимой со статистическими предсказаниями квантовой теории (в пределах, скажем, 5 процентов);

(с) удовлетворять требованиям локальности¹¹.

КАНДИДО

А что такое *возможное предсказание*?

СТАПП

Возможное означает предсказание нескольких возможных альтернативных ситуаций, а не только лишь одной ситуации, выбранной экспериментатором.

¹⁰Pietro Greco, la Repubblica, 30.3.1993.

¹¹См. примечание 12.

АКАДЕМУС

Это означает, что теория делает предсказания для всех наблюдаемых, которые а priori можно измерить, а не только для тех, которые экспериментатор захотел измерить. Смысл состоит в том, что если при определенных условиях некая величина, характеризующая свойство, имеет место всякий раз, когда я осуществляю измерение с целью проверить ее, то я могу заключить, что при этих условиях ранее упомянутое свойство существует даже в том случае, если я его не проверяю.

В настоящее время в литературе, посвященной квантовой теории, термин *антифактический* используется для обозначения этого типа предсказаний.

Антифактический аргумент играет решающую роль в анализе ЭПР аргумента.

КАНДИДО

А я предполагаю, что *локальные причины* имеют нечто общее с локальностью.

АКАДЕМУС

Именно так, но для того, чтобы объяснить все более точно, необходимо точнее описать доводы Белла.

КАНДИДО

Прежде чем вдаваться в это описание, я бы хотел убедиться, что есть общее признание того факта, что утверждение теоремы Белла в формулировке Стаппа выражает то, что с концептуальной точки зрения считается наиболее важным следствием неравенства Белла.

АКАДЕМУС

Формулировка Стаппа достаточно точна, и проблема с точными формулировками в том случае, когда должны быть изучены их концептуальные и философские выводы, состоит в том, что каждый может немного изменить формулировку, заявляя при этом, что это радикально изменяет концептуальные выводы.

Сказав это, я, безусловно, могу сказать и то, что, кроме вариантов, не меняющих концептуальной картины, аргументы всех тех, кто приписывает большое философское значение уравнению Белла, вращаются вокруг формулировки Стаппа. *Все эти люди думают, что неравенства Белла означают неустранимое противоречие между постулатом реализма, постулатом локальности и предсказаниями квантовой теории.*

ШИМОНИ

Это мировоззрение основано на трех допущениях классической физики.

— РЕАЛИЗМ. По крайней мере некоторые свойства мира существуют независимо от людей-наблюдателей.

— КЛАССИЧЕСКАЯ ЛОГИКА (индуктивный вывод) — законные выводы могут быть сделаны на основании соответствующих наблюдений.

— СЕПАРАБЕЛЬНОСТЬ ЭЙНШТЕЙНА ИЛИ ЛОКАЛЬНОСТЬ ЭЙНШТЕЙНА. Ни одно воздействие не распространяется быстрее скорости света.

— Эти три предпосылки образуют основу того, что я бы назвал ЛОКАЛЬНЫМИ РЕАЛИСТИЧЕСКИМИ ТЕОРИЯМИ ПРИРОДЫ.

Аргумент, вытекающий из этих предпосылок, ведет к четкому предсказанию результатов экспериментов определенного класса в физике элементарных частиц.

Правила КМ можно также использовать для вычисления результатов этих экспериментов. Важно, что два предсказания различаются, и, таким образом, *либо локальные реалистические теории, либо КМ должны быть неверными*¹².

АКАДЕМУС

Действительно, эксперименты решают этот вопрос.

ШИМОНИ

Из результатов экспериментов ... следует, что локальные реалистичные теории почти наверняка ошибочны ... Три предпосылки, на которых эти теории построены, важны для интерпретации мира в соответствии со здравым смыслом, и многие весьма неохотно отказались бы от них; тем не менее, *по крайней мере от одной из них по-видимому нужно будет либо отказаться, либо видоизменить или каким-то образом ограничить ее*¹³.

ПОППЕР

Думаю, напротив, (в отличие от Абнера Шимони) нет причин делать вывод о том, что эти новые эксперименты повредили реализму¹⁴.

КАНДИДО

Почему Шимони не упоминает о правилах классической вероятности? В гл. V, кажется, они играли существенную роль в возникновении парадоксов.

АКАДЕМУС

Ни он, ни многие другие не упоминают о них, потому что они думают, что раз принято рассматривать вероятности так, как их предсказывают от-

¹²A. Shimony, *The reality of the Quantum World*, «Scientific American», January (1988) 36–43.

¹³См. предыдущее примечание.

¹⁴K. Popper, *Poscritto alla Logica della Ricerca Scientifica*, Il Saggiatore (1984), p. 41.

носительные частоты, эти законы являются просто следствием гипотезы, которую они называют *реализмом*. Именно к этим рассуждениям он обращается, когда говорит...

ШИМОНИ

Локальные реалистичные теории, в общем, накладывают ограничение на степень корреляции определенных *удаленных событий*; КМ, напротив, предсказывает, что при определенных условиях эти границы могут быть расширены¹⁵...

АКАДЕМУС

То, каким образом они делают этот вывод об элементарных законах вероятности, исходя из допущения *реализма*, мы увидим в разд. IX.1 и IX.4.

КАНДИДО

А разве их идея о *реализме* не является несколько старомодной? Разве различные вычисления вероятностей не соответствуют различным значениям слова *реализм*? И эти значения не являются ни магическими, ни таинственными, как некоторые пытаются заставить нас поверить, а вполне возможно просто описать их в терминах объектов, хорошо известных нам из повседневного опыта (таких как, например, *хамелеон*), и с применением того самого *здорового смысла*, к которому обращался совсем недавно Шимони?

АКАДЕМУС

Сейчас важно, чтобы Вы поняли, что многие согласны с аргументом Шимони.

СЕЛЛЕРИ

Реализм Эйнштейна можно определить с помощью трех допущений, которые рассматриваются вместе:

(1) Постулат о существовании реальности независимо от наблюдателя и возможности использовать *критерии реальности* для определения конкретных ситуаций, в которых реальность обязательно присутствует, если она постулирована в общих терминах.

(2) Постулат локальности, согласно которому взаимодействие между двумя объектами всегда стремится к нулю при увеличении между ними относительного расстояния.

(3) Постулат *стрелы времени*, согласно которому будущие события не могут изменить прошлое.

О значении *реализма Эйнштейна*, выраженного таким образом, говорит наше нынешнее знание природных объектов, хотя и существуют технические разработки, которые отрицают его.

¹⁵См. сноску 12.

То новое, что появилось в 1965 г. в связи с открытием неравенства Белла, заключается в том, что этот реализм оказался не метафизическим и давал большое количество фальсифицируемых эмпирических следствий. Неравенство Белла всего лишь одно из таких следствий, в то время как было обнаружено бесчисленное количество других неравенств, которые наложжили ограничения, не вытекающие из неравенств Белла¹⁶.

АКАДЕМУС

Действительно, недавно карты реализма были перетасованы, и многими авторами было заявлено, что неравенства Белла проливают свет на споры, связывая, помимо прочего, проблему реализма с измеряемыми физическими свойствами, такими как *локальность* или *сепарабельность*, и доказывая несовместимость этих свойств с квантовой теорией.

КАНДИДО

Не трудно видеть, каким образом с этой исходной позиции в соответствии со своими философскими наклонностями одни выбирают нереализм; другие — нелокальность; третьи — надеются, что будущие эксперименты будут противоречить квантовой теории, и наконец четвертые — ограничиваются пребыванием в этих противоречиях, наслаждаясь соблазнительным удовольствием иррационализма.

Но я думаю, что *постулат нелокальности*, в том виде, в каком сформулировал его Селлери, имеет немного общего с тем, что было сформулировано нами при обсуждении парадокса ЭПР. Первый касается особенностей взаимодействия при увеличении расстояния, последний — невозможности мгновенных взаимодействий. К которому из этих двух понятий локальности обращался Белл?

АКАДЕМУС

Для того, чтобы разъяснить это, мы должны ввести *неравенство Белла* и показать, каким образом, начиная с него, доказана формулировка Стаппа или эквивалентные формулировки Селлери и Шимони... *Локальность Белла* входит в число допущений, используемых для доказательства неравенства.

VIII.2. Различные понятия локальности

КАНДИДО

Но имеет ли эта *локальность*, о которой так много говорится со ссылкой на

¹⁶F. Selleri, *La diseguaglianza di Bell violata nella natura*, в Carsetti e Tonini, *Modelli Scientifici della Realtà Fisica* (1990) p. 73.

теорию Белла, что-либо общее с локальностью, о которой говорит теория относительности, которую мы пытались описать, говоря о парадоксе ЭПР?

Если бы это было не так, то не было бы ничего нового в том, что сказал Белл о результатах анализа эксперимента с двумя отверстиями: в этом случае мы действительно приходим к выводу, что ни одна классическая модель не согласуется со *всеми* статистическими предсказаниями квантовой механики.

АКАДЕМУС

Нет никаких сомнений в том, что Белл выявляет различие между квантовой теорией и основными законами относительности. Мы слышали это от него самого в разд. II.9.

Не только локальность играет важную роль в аргументации Белла, на этой стадии проблема *реальности*, с которой и начался наш спор, вновь вступает в игру, и оказывается, что три проблемы: *реальность*, *локальность* и *значимость квантовой теории* тесно связаны между собой.

КАНДИДО

Предполагаемое различие между объективной реальностью и значимостью квантовой теории явилось отправной точкой нашего спора. Тот факт, что это различие имеет экспериментальную основу, интенсивно обсуждался в процессе анализа эксперимента с двумя отверстиями. Это понятие *локальности* тогда представлялось единственным новым элементом в аргументации Белла.

Поэтому очень важно правильно понять, что такое локальность, какую роль она играет и, особенно, каким образом она связана с обычным понятием локальности в теории относительности, являющимся основополагающим понятием современной физики.

АКАДЕМУС

Конечно, важно: никто никогда не обратил бы внимания на результат Белла, если бы он не включал принципа локальности, одного из наиболее глубоких принципов физики.

КАНДИДО

Было бы по меньшей мере ошибочным, если бы одно и то же слово, означающее основной принцип физики, использовалось бы для обозначения технического условия, возможно, правдоподобного, но вовсе не являющегося основным и не имеющего отношения к обычному значению термина *локальность*.

АКАДЕМУС

Вы подразумеваете, что это было *всеобщее недопонимание*? Что мы должны

говорить о *локальности Белла*, которая имеет мало общего с *локальностью Эйнштейна*?

Это невозможно... Этого не может быть...

КАНДИДО

Напротив, я думаю, что это именно так. И я не единственный, кто так считает. Файн давно указывает на то, что...

ФАЙН

...важное различие между принципом Эйнштейна (локальности) и принципом локальности, используемым в литературе по теореме Белла, о невозможности скрытых параметров¹⁷...

КАНДИДО

Как Вы можете видеть, уже в 1984 г. Файн поднял проблему выявления различий между *локальностью Белла* и *релятивистской локальностью*. Я всегда удивлялся, почему Шимони в своей статье, написанной *четыре года спустя*, намекает на то, что аргумент Белла включает теории, не являющиеся локальными в *точном смысле этого слова*, оставляя совершенно неясным основное понятие локальности в статье Белла.

АКАДЕМУС

Возможно, Шимони намекал на это именно потому, что он знал об этих возражениях и хотел предотвратить критику со стороны специалистов. Если кто-нибудь говорил ему: «*Послушайте, Файн доказал, что локальность Белла не имеет ничего общего с релятивистской локальностью*», он мог прямо отвечать, что в своей статье он говорил не о *релятивистской локальности*, а о *локальности в строго определенном смысле*.

КАНДИДО

Но поскольку он затем аккуратно обходил *определение* этого *смысла*, это означает, что в статье, единственной целью которой было объяснить неспециалистам, почему некоторые люди (включая и его самого) считают неравенство Белла чем-то новым и важным, ничего не говорится (если не считать туманных намеков) о концептуально важном аспекте материи, т. е. локальности.

АКАДЕМУС

Независимо от успехов и ошибок Шимони как популяризатора науки, на мой взгляд, основной заслугой Белла является следующее: традиционный аргумент ЭПР ставит *локальность Эйнштейна* в противоречие с копенгагенской интерпретацией. Но для того, чтобы оправдать эту интерпретацию,

¹⁷ *What is Einstein's Statistical Interpretation, or is It Einstein for Whom Bell's Theorem Tolls?*, Topoi 3 (1984).

невозможно было прибегнуть к тому же аргументу ЭПР, а необходимо было обратиться к экспериментам, подобным эксперименту с двумя отверстиями.

КАНДИДО

Понятно: Вы имеете в виду, что *с помощью аргумента Белла аргумент ЭПР становится, в определенном смысле, самодостаточным*. С этой точки зрения безусловно правильно ставить в заслугу Беллу то, что он перенес аргумент ЭПР в иной аспект — количественный.

АКАДЕМУС

Именно так: сначала физики использовали аргументы, такие как с двумя отверстиями, для того, чтобы доказать, что квантовая физика противоречит допущению того, что наблюдаемые, которых не наблюдают, принимают определенные значения, затем они ввели аргумент ЭПР для доказательства того, что это противоречит теории относительности...

КАНДИДО

...и тогда для очистки совести они стали говорить, что это внутреннее противоречие не имеет значения, потому что *в любом случае оно не имеет практического применения*.

АКАДЕМУС

Давайте не отклоняться от темы...

КАНДИДО

В таком случае, по-вашему, концептуальная новизна в неравенстве Белла заключается в том, что можно использовать *один эксперимент* типа ЭПР для противоречия утверждению об одновременной значимости следующих *пяти условий*:

(1) РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ = невозможность распространения взаимодействий быстрее скорости света в вакууме;

(2) РЕАЛЬНОСТЬ = наблюдаемая величина принимает объективные значения независимо от наблюдателя;

(3) ОРТОДОКСАЛЬНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ = теория, согласно которой наблюдаемое в состоянии суперпозиции имеет только фактические значения, которые становятся реальными в процессе измерения;

(4) ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА = условие локальности, введенное Беллом;

(5) КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА = значимость предсказаний обычной квантовой теории в отношении ЭПР эксперимента.

АКАДЕМУС

Думаю, что это наиболее распространенная интерпретация результата Белла. Иными словами, теперь можно произвести отдельный эксперимент

ЭПР-типа и сделать вывод, что если результаты этого эксперимента подтверждают предсказания квантовой теории, то одно из перечисленных выше условий (1), (2), (3), (4), (5) непременно должно быть неверным.

КАНДИДО

Это действительно заслуживает внимания, но я бы хотел лучше понять, насколько аргумент Белла отличается от традиционного аргумента ЭПР, а также от более старого аргумента эксперимента с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Действительно, имеются некоторые аналогии, но есть также и существенное различие: *локальность* не играет никакой роли в аргументе с двумя отверстиями.

КАНДИДО

Посмотрим. В настоящее время вопросами, на которые должен ответить тот, кто хочет избежать идеологической позиции по данному вопросу и пролить свет в споре об интерпретации квантовой теории, являются:

(I) Что общего между *локальностью Белла* и *релятивистской локальностью*?

(II) Является ли аргумент Белла на самом деле шагом вперед или, по крайней мере, *концептуально отличается* от аргумента с двумя отверстиями?

(III) Имеют ли эксперименты по проверке неравенства Белла и аналогичных вещей, которые были проведены вот уже более двадцати лет назад, также и *фундаментальное значение*, или же они являются *техническим усовершенствованием*, которое доказывает более просто и тонко уже известные вещи?

АКАДЕМУС

Давайте сначала попытаемся понять, что в *локальности Белла* действительно от Белла.

КАНДИДО

Вы правы, добавив эту деталь, даже если она кажется необязательной и смешной. Под давлением критики многие авторы действительно очень сильно исказили понятие локальности, используемое Беллом, и это кончилось тем, что оно уже не имеет ничего общего с первоначальным понятием.

VIII.3. Локальность Белла по Беллу

КАНДИДО

В первоначальном аргументе ЭПР значение принципа релятивистской ло-

кальности принимается как само собой разумеющееся и делается вывод о том, что ортодоксальная идея о виртуальных значениях не защищает аргументы, которые объяснены в разд. II.9.

Напротив, сторонники ортодоксальной интерпретации принимают за само собой разумеющееся значение тезиса о виртуальных значениях, которые становятся действительными в процессе измерения и приходят в противоречие с принципом релятивистской локальности, но это их вовсе не волнует, поскольку по их словам это противоречие касается *только* фундаментальных принципов физики и не имеет практических последствий.

Каково различие между этими двумя аргументами и аргументом Белла?

АКАДЕМУС

Мы на самом деле должны быть здесь очень осторожны и различать *локальность Белла по Беллу* от множества других представлений о локальности, которые мы встречаем в литературе, посвященной неравенствам Белла.

КАНДИДО

Вы имеете в виду, что в литературе, посвященной локальности Белла, термин *локальность* используется в различных значениях, отличающихся друг от друга и неэквивалентных и которые, кроме того, не имеют ничего общего с первоначальным понятием локальности Эйнштейна?

АКАДЕМУС

У меня такое чувство, но, возможно, оно не обосновано. Для того, чтобы удостовериться в этом, лучше всего обсудить вместе некоторые из наиболее характерных примеров, имеющих в литературе.

КАНДИДО

Мне кажется, пришло время очень точно сформулировать, что было сделано Беллом и что, по его мнению, он сделал. Для этого лучше всего начать с того, что он сам говорил.

АКАДЕМУС

Лучший способ выделить различия между аргументами — набросать модель. Простоты ради мы воспользуемся теми же сокращениями, которые были введены в пунктах (1), (2), (3), (4), (5) предыдущего раздела. Мы обозначим стрелкой (\Rightarrow) логический вывод (импликацию) и знаком + связь (конъюнкцию) между двумя допущениями. Используя эти обозначения и помещая постулаты слева от стрелки, а выводы из них — справа, аргумент Белла можно записать в следующем виде:

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ + КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
 \Rightarrow *НЕ-РЕАЛЬНОСТЬ.*

Напротив, ортодоксальное рассуждение имеет вид:

ОРТОДОКСАЛЬНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ + КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
 \Rightarrow *НЕ-ЛОКАЛЬНОСТЬ* (... но это неважно ...).

Наконец, рассуждения Белла состоят из двух частей: первая полностью совпадает с аргументацией ЭПР, вторая — соответствует выражению:

РЕАЛЬНОСТЬ + ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА \Rightarrow *НЕ-КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА*.

Именно в доказательстве последнего выражения участвует знаменитое *неравенство Белла*.

КАНДИДО

Наконец-то я начинаю усматривать логику в аргументе Белла: поскольку до сих пор эксперименты подтверждали значимость предсказаний квантовой теории, касающихся ЭПР эксперимента, следует заключить, что одно из трех допущений:

РЕАЛЬНОСТЬ или *РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ* или *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*

в природе не реализуется. Иначе, предполагая значимость всех трех из них и объединив две части рассуждений Белла, мы должны получить следующую последовательность выводов:

(1) предположим, что верны как *КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА*, так и *РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ*;

(2) тогда, согласно аргументу ЭПР, верно и допущение *РЕАЛЬНОСТЬ*;

(3) предположим, что помимо *РЕАЛЬНОСТИ* верно также и допущение *ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА*.

(4) Тогда, на основании рассуждений Белла допущение *КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА* не может быть верно, а это противоречит экспериментальным данным.

АКАДЕМУС

Исходя из до сих пор используемых понятий, Вашу последовательность выводов можно, в свою очередь, разделить на две части:

РЕАЛЬНОСТЬ + ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА \Rightarrow *НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА*;
НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА \Rightarrow *НЕ-КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА*.

Второй вывод с теоретической точки зрения является простой проверкой, но с точки зрения эксперимента — достаточно запутанной.

КАНДИДО

Это означает, что квантовая теория предсказывает ситуации, в которых неравенство Белла нарушено, и эти ситуации можно получить экспериментальным путем.

АКАДЕМУС

Именно так, и нет никакой необходимости углубляться в это, чтобы найти примеры.

КАНДИДО

Не вижу в этом ничего экстраординарного: можно заключить, что *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* не выполняется при сохранении всех трех допущений: *РЕАЛЬНОСТИ*, *КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ* и *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ*. В конце концов, эти допущения являются реальными опорами современной физики, в то время как совершенно непонятно, почему саму *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* надо рассматривать как основное допущение. Действительно, если подумать, то, несмотря на множество разговоров об этом, мы так и не сформулировали, что же представляет собой это загадочное свойство.

АКАДЕМУС

Подождите, пожалуйста, мы это сформулируем. Но сначала я бы хотел, чтобы Вы поняли, что в Ваших рассуждениях отсутствует очень важный вывод:

РЕАЛЬНОСТЬ + РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ \implies *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*.

КАНДИДО

До сих пор никто не говорил мне об этом выводе. С теоретической точки зрения совершенно очевидно, что основной момент аргумента Белла находится именно здесь. Я с нетерпением жду, когда будет проверена его правильность.

АКАДЕМУС

Почему? Разве Вы в этом сомневаетесь?

КАНДИДО

Я сомневаюсь в любом научном утверждении до тех пор, пока его не проверят. Как бы то ни было, я хотел бы отметить, что вывод *РЕАЛЬНОСТЬ + РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ* \implies *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* подразумевает, что оба понятия локальности (релятивистская и Белла) отличаются друг от друга; и, как обычно говорил Файн, в противном случае вывод, который Вы только что сформулировали, был бы абсолютно тривиален.

АКАДЕМУС

Иной вовсе не означает отдельный. Большинство людей принимают этот вывод как само собой разумеющееся, не пытаясь даже сделать его более понятным.

КАНДИДО

Похоже, что старый аргумент ЭПР поддерживает допущение, которое мы назвали *РЕАЛЬНОСТЬ*. Белл согласен с этим...

БЕЛЛ

... Поскольку мы можем предсказать результат измерения спина частицы 2 в любом направлении, измерив спин частицы 1 в том же самом направлении, из этого следует, что результат такого измерения должен быть предопределен¹⁸.

КАНДИДО

Это первая часть рассуждения Белла. Как Вы можете видеть, она идеально совпадает с первой частью аргумента ЭПР. Кроме того, она ясно подразумевает значимость допущения *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ*, в противном случае вывод Белла о *предопределенности* результата не был бы оправдан.

АКАДЕМУС

Самой интересной — новой — частью рассуждений Белла является вторая, в которой он формулирует допущение, названное нами *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*.

БЕЛЛ

Давайте теперь предположим (такое допущение заслуживает того, чтобы его рассмотрели), что если такие измерения производятся в местах, находящихся на большом расстоянии друг от друга, ориентация магнита не влияет на полученный результат¹⁹...

АКАДЕМУС

Это означает, что, выбрав измерение спина частицы 1 в направлении *a*, мы совершенно не влияем на результат какого-либо измерения частицы 2 в направлении *b*.

КАНДИДО

Это кажется вполне правдоподобным допущением, но я не вижу, какое отношение оно имеет к *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ*.

АКАДЕМУС

Давайте сначала до конца послушаем аргументацию Белла, а затем проанализируем ее отдельные части. Заметим, что Белл говорит о магнитах, поскольку он рассуждал, думая о спинах. Некоторые чисто словесные изменения, которые не изменяют сути условия, достаточны для приспособления допущения *ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА* к поляризации. Как только такие

¹⁸J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics 1 no. 3. (1964), 195–200.

¹⁹См. предыдущее примечание.

словесные варианты введены, оказывается, что Белл и Шимони говорят об одном и том же.

ШИМОНИ

Условие локальности требует, чтобы величины, приписываемые каждому парному фотону, не зависели бы от ориентации поляризованной пленки, на которой другой фотон находится случайно, и не зависели бы от того, проходит другой фотон или нет²⁰...

АКАДЕМУС

Как видите, это вполне приемлемое требование. Это просто иное выражение того, что величина спина (или поляризации) частицы 2 в любом направлении хорошо определяется в любой момент времени, независимо от того, что происходит вокруг частицы 1.

КАНДИДО

Оно, конечно же, *приемлемо*, но это не означает, что оно каким-то образом связано с принципом *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ*.

Белл говорит: *то, что происходит вокруг частицы 2, не должно влиять на частицу 1, которая находится от нее очень далеко*. С этим я согласен, но это не имеет отношения к *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ*. Утверждение Белла не верно без последующего *немедленного* определения. Солнце действительно находится очень далеко от Земли, но никто не утверждает, что оно не влияет на Землю...

АКАДЕМУС

Эти вещи настолько хорошо известны, что принимаются как само собой разумеющееся. Такое влияние должно легко проверяться экспериментально. Достаточно сохранить ориентацию одного фиксированного анализатора и менять различными способами ориентацию другого. Если допущение Белла верно, различия в измерениях фиксированного анализатора никогда не должны быть обнаружены.

КАНДИДО

Ситуация не так проста. Квантовая теория на самом деле не делает каких-либо предсказаний относительно поведения одиночного фотона, а лишь предсказывает статистическое поведение множества фотонов (даже если в единицу времени рассматривается только один фотон). В рассматриваемом нами случае это означает, что, если анализатор фиксирован, никто не может сказать, пройдет ли через него отдельный прибывающий фотон. Единственное, что может предсказать квантовая теория, так это то, что

²⁰ A. Shimony, Scientific American January (1988) 36-43.

при сохранении условий подготовки (синглетное состояние и направления поляризации обоих анализаторов) без изменений определенная часть всех испускаемых фотонов успешно пройдет через поляризатор. Это предсказание выражено следующим образом: *фотон проходит через поляризатор с вероятностью P* . Поэтому различия, на которые Вы ссылались, могут возникать только в статистическом распределении значений поляризации единичных фотонов.

АКАДЕМУС

Но такое различие противоречило бы квантовой теории, поскольку в современной формулировке оно предсказывает, что в синглетном состоянии независимо от выбранного направления поляризации количество фотонов, поляризованных в этом направлении, примерно равно количеству фотонов, поляризованных в ортогональном направлении²¹.

Поэтому, если современная квантовая теория верна, то Ваше допущение относительно подготовки условий эксперимента с точки зрения эксперимента не верно.

КАНДИДО

Вы опять слишком торопитесь. Ваш аргумент всего лишь доказывает, что если я *отдельно* считаю долю фотонов, проходящую через поляризатор 1, а затем долю, проходящую через поляризатор 2, я в обоих случаях обнаружу примерно по $1/2$. На вероятностном языке это доказывает, что *маргинальное распределение* фотонов, движущихся в направлении 1, и фотонов, движущихся в направлении 2, не зависит от условий подготовки экспериментов. Однако при этом не подразумевается, что эта независимость все еще имеет значение, поскольку есть *связанные распределения* пар фотонов, т. е. тех фракций, которые получены в результате подсчета совпадений и несовпадений при прохождении через оба поляризатора.

Классическое вычисление вероятностей показывает, что, установив два *маргинальных распределения* пар фотонов, квантовая теория подсказывает нам, какое из этих распределений на самом деле имеет место в природе для каждого варианта поляризации и для частиц типа 1 и типа 2.

Эту вполне понятную форму можно найти в любом учебнике, и ее подробная структура не важна. Единственное, что имеет отношение к нашему обсуждению, так это то, что она действительно *зависит* от граничных

²¹Точнее, теория утверждает, что в синглетном состоянии вероятность поляризации в одном направлении равна вероятности поляризации в ортогональном направлении, и они обе равны $1/2$.

условий, т. е. от направлений a и b , помимо, ясное дело, условия синглетности.

АКАДЕМУС

Я знаю эти формулы, на которые Вы ссылаетесь. Действительно, на их основании можно заключить, что, если выбрано измерение поляризации фотонов типа 1 в направлении a и поляризации фотонов типа 2 в направлении b , статистика измерений, произведенных на большом количестве пар фотонов, будет зависеть от угла между направлением a и направлением b .

КАНДИДО

Поскольку направления a и b являются на самом деле условиями подготовки (т. е. направлениями, вдоль которых ориентированы оси поляризации анализаторов), я не вижу причины, почему эксперименты Фридмана, Клаузера, Фрая, Томпсона, Раписарда, Гаручо, ... нельзя интерпретировать как экспериментальное доказательство против допущения Белла, т. е. независимости от граничных условий или условий подготовки.

АКАДЕМУС

Эту оговорку, возможно, можно отнести к экспериментам Фридмана и другим ... , поскольку в этих экспериментах ...

ШИМОНИ

... анализаторы поляризации сохранялись в соответствующих ориентациях в течение примерно одной минуты, что является вполне достаточным для обмена информацией между анализаторами посредством некоего гипотетического устройства. Как следствие этого, сторонники [моделей скрытых параметров] могут все еще обсуждать, что специальная теория относительности не подразумевает значимости условия локальности Белла в физических условиях экспериментов²².

АКАДЕМУС

Эксперимент Аспекта, Далибара и Роже был придуман только для преодоления оговорки.

ШИМОНИ

Для того, чтобы избавиться от этой лазейки, Ален Аспект, Жан Далибар и Жерар Роже из Оптического института Парижского университета выполнили эффектный эксперимент, в котором выбор ориентации анализаторов поляризации сделан посредством оптических переключений во время движения фотонов²³.

²² А. Shimony, «Scientific American» January (1988) 36–43.

²³ См. предыдущее примечание.

АКАДЕМУС

Этот эксперимент явился прототипом серии экспериментов, которые в настоящее время известны как *эксперименты с задержкой выбора*.

КАНДИДО

Но если то, что характеризует эти эксперименты — окончательное определение измерительным прибором, — происходит в момент *движения*, то это можно сделать также и в эксперименте с двумя отверстиями. Должны ли мы тогда заключить, что локальность также каким-то образом имеет некое отношение к такому эксперименту?

АКАДЕМУС

Суть вопроса состоит в том, что в эксперименте с двумя отверстиями последние должны находиться очень близко друг к другу: если отверстия находятся далеко друг от друга, весь квантовый эффект (т.е. интерференция) исчезает. Напротив, в эксперименте ЭПР, на который ссылается Белл, поляризаторы, которые будут осуществлять измерения фотонов, могут находиться на очень большом расстоянии, в то время как квантовые эффекты остаются видимыми.

Именно используя возможность сохранить квантовые эффекты даже тогда, когда анализаторы поляризации находятся достаточно далеко друг от друга, Аспект, Далибар и Роже объяснили, каким образом *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* является следствием *ЛОКАЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА*.

КАНДИДО

Я бы хотел детально рассмотреть этот *вывод*.

АКАДЕМУС

Рассмотрим два фотона, перемещающихся от центра экспериментальной установки в противоположных направлениях и предположим, что до прибытия фотонов поляризатор 1 (т.е. поляризатор, к которому движется частица 1) меняет направление. Из-за *ЛОКАЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА* информация о том, что поляризатор 1 изменил направление, может распространяться в направлении фотона 2 максимум со скоростью света.

Следовательно, поскольку фотон 2 также движется со скоростью света, эта информация никогда не достигнет фотона 2. Это похоже на то, как если бы два человека, путешествующие по одной и той же дороге в одном и том же направлении и с одной и той же скоростью, начали свой путь в разное время. Очевидно, что тот, кто вышел позже, никогда не догонит того, кто вышел раньше.

КАНДИДО

Понятно. Вы полагаете, что фотон 2 прибудет к поляризатору 2, не зная, что

поляризатор 1 изменил направление. Поэтому на величину его поляризации совершенно не будет влиять новое направление поляризатора 1. Это кажется вполне приемлемым. Но как в эксперименте Аспекта, Далибара и Роже я могу быть уверенным в том, что поляризатор 1 изменил ориентацию *во время движения фотона?*

ШИМОНИ

Переход между ориентациями занимает около 10 наносекунд... Расстояние между анализаторами составляет 13 м, так что одно перемещение со скоростью света в вакууме (максимально допустимой теорией относительности) занимает 40 наносекунд²⁴.

КАНДИДО

Но означает ли фраза Шимони: *«переход между ориентациями занимает около 10 наносекунд»*..., что *процесс перехода занимает 10 наносекунд* или же что *каждые 10 наносекунд происходит процесс перехода?*

АКАДЕМУС

Из контекста совершенно ясно: это должно означать, что *процесс перехода занимает около 10 наносекунд*. Также совершенно ясно глобальное значение заключения: каждый фотон покрывает половину расстояния между анализаторами, т.е. находится в движении в течение приблизительно 20 наносекунд. Поскольку процесс перехода занимает 10 наносекунд, то, следовательно, он может происходить во время движения фотона. Согласно предыдущим рассуждениям, на фотон, движущийся к другому анализатору, это изменение направления повлиять не может.

ШИМОНИ

Следовательно, выбор ориентации для первого анализатора поляризации не должен влиять на прохождение второго фотона через второй анализатор, а выбор ориентации второго анализатора не должен влиять на прохождение первого фотона через первый анализатор²⁵.

АКАДЕМУС

Обратите, пожалуйста, внимание на то, что это условие **ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА**:

на значение поляризации фотона 2 совершенно не влияет направление поляризатора 1, и наоборот.

Поэтому мы доказали, что **ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА** является следствием **ЛОКАЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА**. Следовательно, очевидно, что любой эксперимент, противоречащий первому, непременно противоречит второму.

²⁴A. Shimony, Scientific American January (1988) 36–43.

²⁵См. предыдущее примечание

КАНДИДО

Думаю, Вы слишком торопитесь. Единственное, что до сих пор доказано, так это то, что определенное *словесное утверждение*, сделанное Беллом, следует из *ЛОКАЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА*. Однако противоречие с квантовой механикой следует не из словесного утверждения, а из того факта, что экспериментальные данные не удовлетворяют *математическому соотношению*, т. е. неравенству Белла. Чтобы вывести Ваш аргумент, Вы должны доказать, что это неравенство, в свою очередь, следует из словесного утверждения. Без такого доказательства Вашего аргумента не достаточно.

АКАДЕМУС

Вы хотели знать, что из себя представляет локальность Белла, и Вам объяснили: *то, что происходит вокруг анализатора 2, не может влиять на измерения, осуществляемые анализатором 1*. Это не отличается от того, что ЭПР принимало как само собой разумеющееся. Затем Шимони доказал Вам, что если *РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОКАЛЬНОСТЬ* верна, то в эксперименте Аспекта, Далибара и Роже должна выполняться *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*. Что еще вы хотите?

КАНДИДО

Я хочу, чтобы он доказал, почему неравенство Белла является неперменным следствием этого определенно приемлемого, но не оригинального утверждения Белла, поскольку оно относится по меньшей мере ко времени опубликования статьи ЭПР. Без такого доказательства останется сомнение, что это условие локальности не важно для математической модели, в которой Белл выводит свое неравенство. А поскольку различие с экспериментом возникает из неравенства, а не непосредственно из допущения локальности, из этого следует, что если бы мои возражения были существенны, то это разрекламированное противоречие между *РЕАЛЬНОСТЬЮ, РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТЬЮ* и *КВАНТОВОЙ МЕХАНИКОЙ* растворилось бы в воздухе.

АКАДЕМУС

Но если оно не зависит от условия локальности, от чего будет зависеть противоречие между неравенством Белла и предсказаниями квантовой теории?

КАНДИДО

Оно зависит от *скрытой гипотезы*, неявно и неосознанно введенной Беллом в построение математической модели, из которой он вывел свое неравенство. Мы видели, что аналогичное явление имело место при анализе

эксперимента с двумя отверстиями, осуществленного Гейзенбергом и Фейнманом . . .

АКАДЕМУС

Кто-нибудь думает, что имеет место именно то, о чем Вы сказали?

КАНДИДО

То, что ситуация аналогична той, которая имеет место в эксперименте с двумя отверстиями, и есть тезис о квантовой вероятности: статистические данные (корреляции синглетного состояния), которые не могут быть описаны в рамках одной модели, основанной на классической вероятности. Но мы вернемся к этому позже. А сейчас вы должны закончить ваше обоснование и доказать, если можете, что условие локальности, словесно сформулированное Беллом, на самом деле следует из этого неравенства.

АКАДЕМУС

Именно для того, чтобы доказать, что тезис о квантовой вероятности неверен, я хочу продемонстрировать Вам понятную форму этого неравенства.

VIII.4. Неравенство Белла

ЖИРАРДИ

Неравенство Белла . . . , ознаменовавшее начало нового этапа в обсуждении основ науки, привело к осуществлению решающих экспериментов, которые выявили нелокальность природных явлений и заставили ученых и эпистемологов столкнуться с тем, что квантовые явления гораздо более необычны и загадочны, чем это можно было вообразить²⁶.

КАНДИДО

Если все это смогло сделать одно-единственное неравенство, то, возможно, стоит посвятить некоторое количество времени для его изучения. Но оно действительно вызвало все это, или же это просто обычное академическое хвастовство, которое обожает мусолить неясные моменты, вместо того, чтобы попытаться разъяснить их?

АКАДЕМУС

Исходной точкой в рассуждениях Белла, с одной стороны, явился парадокс ЭПР, а с другой стороны — анализ теорий скрытых параметров.

Белл так же, как и ЭПР, рассматривает две частицы, разделенные пространством, т. е. находящиеся на очень большом расстоянии друг от друга по сравнению с их размерами.

²⁶G. C. Ghirardi, «L'Unità», 9.11.1992.

Однако в то время как для рассуждений ЭПР было достаточно рассмотреть *одно* наблюдаемое с двумя значениями, т. е. спин вдоль данного направления, в рассуждениях Белла необходимо рассматривать *три* наблюдаемых, т. е. спин в трех направлениях, скажем, a , b , c , каждое из которых удовлетворяет одному и тому же закону сохранения ЭПР: если значение спина вдоль некоторого направления равно $+1$ для одной частицы, значение спина *в том же направлении* для другой частицы обязательно равно -1 (то же самое справедливо и для поляризации).

КАНДИДО

В случае ЭПР мы знали, что синглетное состояние, которое можно подготовить в лаборатории, гарантирует возможность такой подготовки для *одного* наблюдаемого. Теперь Вы заявляете, что можно получить квантовые состояния, которые гарантируют такие же условия для *трех* наблюдаемых, т. е. спинов в направлениях a , b , c .

АКАДЕМУС

Действительно, теория доказывает, а эксперименты подтверждают, что именно *синглетное состояние* гарантирует это условие для спина *в любом направлении пространства*: т. е. для бесчисленного количества наблюдаемых, равного бесчисленному количеству направлений в пространстве.

КАНДИДО

Но если, говоря математическим языком, ситуация такая же, как и в рассуждениях ЭПР, что нового внес Белл?

АКАДЕМУС

Обозначив наблюдаемые со спинами в трех направлениях a , b , c соответственно S_a , S_b , S_c , Белл рассматривает каждую возможную пару наблюдаемых, которую можно выделить из S_a , S_b , S_c .²⁷ Затем он доказывает, что корреляции между этими парами должны удовлетворять определенному неравенству. Квантовая механика, напротив, предсказывает, что такое неравенство не выполняется, а эксперименты доказывают правильность квантовой теории.

КАНДИДО

Все это выглядит довольно туманно. Не могли бы Вы быть более точным?

АКАДЕМУС

Чтобы быть более точным, необходимо помнить, что программа скрытых параметров состоит из рассмотрения пространства S , называемого *про-*

²⁷То есть (S_a, S_b) , (S_b, S_c) , (S_c, S_a) , при этом порядок в каждой паре не имеет значения.

странством состояний или *пространством скрытых параметров*, свойством которого является то, что все наблюдаемые этой теории можно представить в виде функций в этом пространстве с числовыми значениями. *Среднее значение*, которое также называется *ожиданием* в этом пространстве, является соответствием, которое сопоставляет функции f число, обозначенное $E(f)$, так что выполняются следующие условия:

E1) Если функция f положительна, то величина $E(f)$ положительна.

E2) Если f — постоянная функция и равна C , то ее среднее значение равно постоянной C .

E3) Среднее значение суммы является суммой средних значений²⁸.

КАНДИДО

Например, если S — пространство, в котором находятся только две точки, скажем, $+1$ и -1 (голова и хвосты), то функция f однозначно определена своими двумя значениями $f(+1)$ и $f(-1)$ и соответствием, которое сопоставляет f ее *среднее арифметическое*:

$$E(f) = \frac{f(+1) + f(-1)}{2} \quad (\text{VIII.4.1})$$

пример *средней величины*.

АКАДЕМУС

Да, это простой пример среднего значения. Для нас представляют интерес случаи следующего типа: если наблюдаемая величина A может принимать значение a_1 с вероятностью P_1 , значение a_2 с вероятностью P_2 ... значение a_n с вероятностью P_n , то *среднее* или *ожидаемое* значение величины A будет

$$a_1P_1 + a_2P_2 + \dots + a_nP_n. \quad (\text{VIII.4.2})$$

Например, если вероятность того, что я могу выиграть 10 долларов в споре, равна p , а вероятность того, что я их проиграю, равна $1 - p$, то среднее или ожидаемое значение моего пари будет:

$$(+10)p + (-10)(1 - p) = 10(2p - 1) = 20(p - 1/2).$$

Поэтому, если игра честная ($p = 1/2$), как, например, в орел или решку без мошенничества, то ожидаемое значение моих побед равно нулю.

²⁸В формулах:

$$\begin{aligned} E(f) &\geq 0, \text{ если } f \geq 0, \\ E(f) &= c, \text{ если } f = c = \text{const}, \\ E(f + g) &= E(f) + E(g). \end{aligned}$$

Если вместо $p = 1/2$ вероятность, допустим, будет $p = 2/3$, то ожидаемое значение моих побед равно:

$$20(2/3 - 1/2) = 20(1/6) = 10/3.$$

Аналогично, если $p < 1/2$, ожидаемое значение победы будет отрицательным, т. е. я ожидаю проигрыша.

КАНДИДО

Это понятно, но при чем тут синглетное состояние?

АКАДЕМУС

Очень даже при чем, поскольку для каждого *квантового состояния*, например, синглетного, имеется правило для вычисления *средних значений* наблюдаемых величин.

КАНДИДО

Но, если я хорошо помню, в неравенстве Белла *корреляции* между парами наблюдаемых участвуют не как средние значения.

АКАДЕМУС

Корреляция двух наблюдаемых является всего лишь *средним значением их произведения*.

Для каждой из трех пар (S_a, S_b) , (S_b, S_c) , (S_c, S_a) Белл вычислил соответствующую корреляцию, исходя из допущения, что три наблюдаемые S_a, S_b, S_c можно представить как случайные переменные с точки зрения классической теории вероятностей, которые могут принимать только два значения ± 1 . Из этого постулата делается вывод, что три корреляции должны удовлетворять некоему неравенству. Это и есть знаменитое *неравенство Белла*.

КАНДИДО

Мне бы очень хотелось посмотреть на это неравенство. Его трудно понять?

АКАДЕМУС

Напротив, оно довольно простое. Давайте обозначим через $E(S_a \cdot S_b)$ корреляцию между S_a и S_b и аналогичным образом другие корреляции²⁹.

²⁹Если мы полагаем, что $p_{+-}(a, b) = \text{Pr}(S_a = +1; S_b = -1)$, т. е. связанная вероятность для $S_a = +1$ и $S_b = -1$, и то же самое для других вероятностей, то выполняется следующее неравенство:

$$E(S_a \cdot S_b) = p_{++}(a, b) - p_{+-}(a, b) - p_{-+}(a, b) + p_{--}(a, b).$$

В частности, если, как это имеет место в случае синглетного состояния, $p_{++}(a, b) = p_{--}(a, b)$ и $p_{+-}(a, b) = p_{-+}(a, b)$, мы имеем простое соотношение:

$$E(S_a \cdot S_b) = 2p_{++}(a, b) - 2p_{+-}(a, b),$$

С помощью этих выражений неравенство Белла можно записать в виде:

$$|E(S_a \cdot S_b) - E(S_b \cdot S_c)| \leq 1 - E(S_a \cdot S_c) \quad (\text{VIII.4.3})$$

или

$$|E(S_a \cdot S_b) - E(S_b \cdot S_c)| + E(S_a \cdot S_c) \leq 1, \quad (\text{VIII.4.4})$$

или словами: *разница между двумя корреляциями по модулю плюс третья корреляция всегда меньше или равна 1.*

КАНДИДО

Могу представить, что такую важную вещь не так-то просто доказать.

АКАДЕМУС

Вы ошибаетесь. Рассуждения также просты, как и в случае эксперимента с двумя отверстиями. Однако именно потому что они тривиальны, доказательство вовсе не обязательно.

КАНДИДО

Глядя на неравенство, создается впечатление, что оно совершенно аналогично тому, что имеет место в случае эксперимента с двумя отверстиями. Не понимаю, почему оно стало таким знаменитым?

АКАДЕМУС

Его слава обусловлена двумя или, быть может, тремя обстоятельствами.

(I) Всеобщностью: *единственным* допущением является то, что наблюдаемые с тремя спинами представлены как случайные переменные с точки зрения классической теории вероятностей и принимают значения ± 1 .

(II) Тем обстоятельством, что для трех направлений a, b, c корреляции, предсказанные квантовой теорией и подтвержденные экспериментально, не удовлетворяют этому неравенству.

КАНДИДО

Все это происходит и в эксперименте с двумя отверстиями. Но каково же третье обстоятельство?

АКАДЕМУС

На мой взгляд, это то обстоятельство, что люди любят себе льстить, полагая, что можно получить важные результаты с помощью тривиальных рассуждений.

которое выражает корреляции как функцию связанных вероятностей и поэтому позволяет выражать неравенство Белла в терминах связанных вероятностей. Мы еще вернемся к этим записям в разд. IX.5.

VIII.5. Существенное предположение

КАНДИДО

Теперь я знаю, что представляет из себя неравенство Белла. Простое замечание, вызвавшее интерес благодаря тому, что было заявлено, что это *необходимое следствие* гипотез, которые мы называли *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТЬЮ* и *РЕАЛЬНОСТЬЮ*. Кроме того, следствие, сравнимое с экспериментами. Именно эту *необходимость* Вы должны были доказать, но так и не сделали этого.

АКАДЕМУС

Совершенно ясно, какова роль допущения *РЕАЛЬНОСТИ* в рассуждениях Белла: допущение, что все наблюдаемые имеют хорошо определяемые значения, ведет к необходимости введения *пространства состояний*. Поэтому когда Белл рассматривает все наблюдаемые как функции в пространстве состояний, он на самом деле вводит понятие *РЕАЛЬНОСТЬ*.

КАНДИДО

А как на счет *РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ* и *ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА*?

АКАДЕМУС

Это более тонкая вещь. Пусть Белл сам объяснит.

БЕЛЛ

Существенным допущением является то, что результат $S_a^{(2)}$ для частицы 2 не зависит от расположения a магнита для частицы 1, а $S_a^{(1)}$ не зависит от b .

АКАДЕМУС

Помните, что если имеются скрытые параметры, то должно быть *пространство состояний*, которое мы назовем S , для которого каждое наблюдаемое, в частности наши S_a , S_b , S_c , являются функциями. Если мы обозначим через $S_a^{(1)}$ спин в направлении a частицы 1 и через $S_a^{(2)}$ спин частицы 2, то станет ясно, что имеет в виду Белл.

КАНДИДО

Да, верно. Он имеет в виду, что $S_a^{(1)}$ является функцией состояния x , которое является элементом S , но не направления b , в котором будет измеряться спин частицы. Это понятно: *частица 1 не может знать, буду я измерять спин частицы 2 в направлении b , c или в каком-либо другом направлении.*

Вот видите, Вы тоже находите условие *ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА* вполне понятным.

КАНДИДО

Я наконец-то начинаю понимать: **ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА** состоит в допущении того, что различия в приборах, подготовленных для различных измерений, не играют никакой роли.

АКАДЕМУС

Это не совсем так: такое безразличие к граничным условиям хорошо известно в литературе, посвященной скрытым параметрам, как *не-контекстуальность*, что означает независимость от контекста. Контекст — это именно то, что вы называете *все граничные условия или подготовительные условия*.

Некоторые авторы этот термин понимают в более техническом и ограниченном смысле, т. е. если A — немаксимальный набор совместимых наблюдаемых, *контекстуальное* измерение A состоит в выборе другого набора B наблюдаемых, совместимых с A , и в измерении (A, B) . Перес приписывает Беллу это понятие *контекстуальности*³⁰.

КАНДИДО

По-вашему, **ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА** — это *контекстуальность*, о которой мы часто говорили?

АКАДЕМУС

Нет, поскольку условие **ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА** выражает безразличие к *отдаленным* граничным условиям, а не к любому типу граничных условий.

КАНДИДО

Тогда более правильным было бы называть это условие по Беллу: *безразличием к отдаленным граничным условиям*, а не *локальностью*. Кроме того, это допущение не кажется мне отличным от того, которое имеет место в эксперименте с двумя отверстиями: поскольку *безоговорочное допущение* в анализе эксперимента с двумя отверстиями Гейзенбергом и Фейнманом заключалось в том, что частицам было безразлично, которое из двух отверстий открыто, а также открыты ли два отверстия или одно, то *безоговорочное допущение* в анализе Белла заключается в том, что фотонам все равно, каким образом подготовлены поляризаторы, которые будут осуществлять их измерение.

АКАДЕМУС

Здесь свою роль играет локальность, и возникает различие между условием Белла и старой *контекстуальностью*. Согласно последней, каждый фотон в

³⁰ Asher Peres, *Classification of Quantum Paradoxes: Nonlocality vs. Contextuality* в *The interpretation of Quantum Theory: where do we stand?*, Istituto della Enciclopedia Italiana, November 1994.

каждой паре должен испытывать влияние всего экспериментального оборудования, *включая самый удаленный анализатор. ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*, напротив, допускает, что каждый фотон в каждой паре испытывает влияние ближайшего анализатора, а не самого дальнего.

КАНДИДО

Однако в Вашей формулировке результата Белла отсутствует *локальность*.

АКАДЕМУС

Верно. Но в первоначальной формулировке Белла локальность играет существенную роль.

КАНДИДО

То, что Вы говорите, удивляет меня: *в математической формулировке неравенства Белла расстояние между двумя частицами вообще не играет никакой роли*. Единственное, что важно, — так это три направления, вдоль которых измеряется поляризация (или спины). Как и в математической формулировке эксперимента с двумя отверстиями, расстояние между двумя экранами или расстояние между источником эмиссии частиц и первым экраном не играет никакой роли, кроме как для доказательства явления (в большей или меньшей степени). В обоих случаях критическим моментом является возникновение трех различных и несовместимых экспериментальных ситуаций.

АКАДЕМУС

Похоже, Вы находите, что формулировку *ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* трудно понять.

КАНДИДО

Я не понимаю, какое отношение это условие имеет к *ЛОКАЛЬНОСТИ* в том смысле, к которому я привык, т. е. как это понимал Эйнштейн.

АКАДЕМУС

Многие авторы заявляют, что существует глубинная связь, если не идентичность, между этими двумя условиями. С другой стороны, можно сказать, что локальность Белла была сформулирована на тридцать лет раньше самим Эйнштейном.

ЭЙНШТЕЙН

Но в отношении одного момента, на мой взгляд, мы все должны быть абсолютно уверены: в отношении того, что частица 2 не зависит от того, что творится с частицей 1, которая пространственно отделена от нее³¹.

³¹In Albert Einstein, *Philosopher Scientist*, ed. by Paul A. Schlipp, Library of living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949, p. 85.

КАНДИДО

Тот факт, что Эйнштейн сформулировал эту теорию, и она приемлема, не подразумевает, что она непременно должна совпадать с *локальностью Эйнштейна* в смысле теории относительности.

Фраза Эйнштейна верна только потому, что она точна: *состояние* частицы 2 не зависит от того, *что творится* с частицей 1, но это не означает, что она *не зависит от* частицы 1, напротив, в синглетном состоянии S обеих частиц строго коррелирует с условием, что в любом направлении спин одной должен быть противоположен спину другой, что отражено в формуле

$$S_a^{(2)} = -S_a^{(1)}. \quad (\text{VIII.5.1})$$

Ни один приверженец теории вероятностей не осмелится назвать независимыми две частицы, связанные уравнением (VIII.5.1).

АКАДЕМУС

Белл знает о существовании этого условия настолько хорошо, что он недвусмысленно использует его в своей статье³².

КАНДИДО

Я просто хотел обратить внимание на то, что *независимость*, на которую ссылался Эйнштейн, не имеет ничего общего с обычным понятием *независимости в вероятностном смысле*. Безусловно очевидно, что если две величины $S_a^{(1)}$, $S_b^{(2)}$ связаны уравнением (VIII.5.1), они строго *зависимы*, и не может быть и речи о каком-либо допущении статистической независимости.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, я надеюсь, что Вы наконец-то поняли, каким образом условие *ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА* переводится в математическую модель. Величина $S_a^{(1)}$ должна зависеть *только от a*, а не от *b*. Аналогичным образом, величина $S_b^{(2)}$ должна зависеть только от *b* и не зависеть от *a*.

КАНДИДО

Формулировка проста. Но я не понимаю, почему Белл считает *существенным* допущение, что функция $S_b^{(2)}$ зависит только от *скрытого состояния*, а не от направления, в котором измеряется спин частицы 1.

АКАДЕМУС

Он считает его *существенным*, потому что он использует его в доказательстве.

³²Смотри формулу (13) в J. S. Bell's paper, *On the Einstein Podolski Rosen Paradox*, Physics 1 no. 3 (1964) 195–200.

КАНДИДО

Это поразительно. Обычно допущение считается *существенным* для доказательства некоего тезиса, если *без этого допущения нельзя доказать этот тезис*. Это сильно отличается от того, что можно выразить следующим образом: *имеется доказательство, в котором мы подходим к такому-то тезису, используя такое-то допущение*. Вы не можете исключить тот факт, что другое доказательство подходит к тому же тезису без использования этого допущения.

АКАДЕМУС

Это тривиально и верно, но в то же время неважно, поскольку это нельзя применить в случае Белла: его условие локальности действительно *существенно* для того, чтобы доказать неравенство.

КАНДИДО

Вы уверены?

АКАДЕМУС

Продолжайте! Вы ведь не думаете, что *существенное допущение ЛОКАЛЬНОСТИ БЕЛЛА* бесполезно для доказательства неравенства Белла, не так ли?

КАНДИДО

Я так не думаю, *я говорю так*. И я легко могу доказать это: отрицание значимости *существенного допущения* Белла означает согласие с тем, что спин $S_b^{(2)}$ частицы 2 в направлении b зависит не только от скрытых параметров, которые мы обозначили x , но и от скрытых параметров, зависящих от *расположения a магнита для частицы 1*. Назовем эти новые скрытые параметры $x_a^{(1)}$.

Новым пространством скрытых параметров будет набор \tilde{S} пар $(x, x_a^{(1)})$. Заметим, что это новое пространство было построено таким образом, что *существенное допущение* Белла автоматически нарушается. Мы можем нарушать его и дальше, добавляя параметры и получая огромное пространство состояний, элементы которого будут типа $(x, x_a^{(1)}, x_b^{(1)}, x_c^{(1)}, \dots)$.

АКАДЕМУС

Да, но во всех случаях неравенство Белла не должно быть справедливым.

КАНДИДО

Напротив, *именно это неравенство справедливо и в этом случае*. Точнее, можно доказать следующую теорему: *если \tilde{S} — некое пространство, S_a, S_b, S_c — функции, определенные в этом пространстве со значениями $+1$ и -1 , тогда при любом среднем значении E в пространстве \tilde{S} выполняется*

неравенство Белла. Другими словами, если бы *существенное допущение* Белла на самом деле было *существенным*, то было бы невозможно доказать его неравенство без использования этого допущения. Поскольку я как раз показываю, что такое доказательство существует, то из этого следует, что *существенное допущение* не только несущественно, но и необязательно.

АКАДЕМУС

Вы действительно уверены, что *неравенство Белла справедливо и без существенного допущения Белла*? Разве Вы не могли сделать маленькую ошibочку в доказательстве? Это вполне возможно...

КАНДИДО

Сильной стороной доказательства является то, что каждый может проверить его³³.

АКАДЕМУС

Но тогда, принимая в качестве аргумента справедливость Вашего доказательства, каково было бы *скрытое предположение*, с которым справедливость неравенств Белла имела бы место?

КАНДИДО

Для того, чтобы понять это, подумайте об анализе эксперимента с двумя отверстиями в соответствии с квантовой вероятностью. В этом случае *скрытое допущение* было представлено *недвусмысленным постулатом, который способен описывать с помощью лишь одной модели классической вероятности некоторые экспериментальные данные, полученные в трех несовместимых экспериментах*. Это замечание Вам о чем-нибудь говорит?

АКАДЕМУС

Не вижу связи... Подождите, может быть, я уловлю ее! Я начинаю понимать, почему Вы настаиваете на аналогии с экспериментом с двумя отверстиями.

В формулировке неравенства возникают *три корреляции, описанные только одним средним значением в пространстве состояний*. Это допущение существования *одного* среднего значения, обуславливающего три корреляции, должно соответствовать, согласно квантовой вероятности, *недвусмысленному постулату о существовании одной модели классической вероятности* для двух экспериментов.

КАНДИДО

Именно так: почему кажется странным, что статистические данные, полученные в версии Белла эксперимента ЭПР, нельзя представить в рамках

³³ Это доказательство, которое мы для полноты изложения поместили в конце настоящей главы, совершенно несущественно для понимания остальной части нашей дискуссии.

одной модели классической вероятности? Три пары измерений относятся к трем несовместимым расположениям в эксперименте, и мы уже видели в анализе эксперимента с двумя отверстиями, что в квантовой теории невозможность такого представления является правилом, поскольку микрообъекты гораздо более чувствительны к граничным условиям, чем макрообъекты.

Кроме того, в эксперименте с двумя отверстиями вывод сводился к тому, что некоторые вероятности должны были удовлетворять некоторым неравенствам и как квантовая теория, так и эксперименты, наоборот, показали, что такие неравенства не выполнялись. Единственным различием является то, что в то время как в случае Белла утверждается, что эти неравенства вытекают из допущения *ЛОКАЛЬНОСТИ*, в случае с двумя отверстиями полагали, что они вытекают из допущения того, что частицы имели хорошо определяемое местоположение даже тогда, когда никто их не наблюдал (*РЕАЛЬНОСТЬ*).

АКАДЕМУС

Что Вы говорите? Это две совершенно разные ситуации: Белл начинает с эксперимента ЭПР, в котором участвуют две частицы, связанные законом сохранения; и наоборот, в случае с двумя отверстиями измеряют одну частицу; в случае с двумя отверстиями мы говорим о вероятности, Белл же говорит о корреляциях...

КАНДИДО

Это второстепенные различия. Основным моментом, общим для обеих ситуаций, является то, что некоторые допущения, которые, по всей видимости, просто-напросто ограничены представлениями здравого смысла, подразумевают, что некоторые вероятности должны удовлетворять некоторым неравенствам. Как квантовая теория, так и эксперименты, наоборот, противоречат таким неравенствам. Различием между *вероятностями* и *корреляциями* можно пренебречь, корреляции на самом деле можно выразить посредством вероятностей (см. примечание 29 разд. VIII.4). В результате этого неравенство Белла становится не только концептуально, но и формально неравенством того типа, которое имеется в случае эксперимента с двумя отверстиями; единственным различием при этом является то, что первое длиннее³⁴ в терминах вероятности.

АКАДЕМУС

Но в таком случае Вы отрицаете вывод: *РЕАЛЬНОСТЬ + ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА* \Rightarrow *НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА*.

³⁴L. Accardi, *Topics in Quantum probability*, Physics Reports 77 (1981) 169–192.

КАНДИДО

Конечно же я отрицаю это. Точнее, если мы вводим аббревиатуру КВМ для выражения:

СУЩЕСТВУЕТ КЛАССИЧЕСКАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ, которое означает, что *три статистические корреляции, участвующие в эксперименте ЭПР, можно описать в рамках одной модели классической вероятности*, то наши предыдущие рассуждения показывают, что вывод, который *на самом деле* доказал Белл, — это

РЕАЛЬНОСТЬ + ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА + КВМ \implies НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА.

АКАДЕМУС

Тогда, используя ваш язык, теорему, которую Вы сформулировали ранее, можно сформулировать в виде:

РЕАЛЬНОСТЬ + КВМ \implies НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА

КАНДИДО

Именно так. Как Вы можете видеть, *в допущениях полностью отсутствует ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА*. Поэтому правомерно заключить, что она не играет в них никакой роли.

АКАДЕМУС

Почему Белл явно не сформулировал допущение *КВМ*?

КАНДИДО

По той же самой причине, по которой Гейзенберг, Фейнман и все те, кто интересовался экспериментом с двумя отверстиями, не сформулировали его: *для них это не было допущением*.

АКАДЕМУС

Что Вы имеете в виду?

КАНДИДО

Белл, так же как и эти авторы, принимает без доказательства возможность вычисления вероятностей с помощью классических правил. В доказательстве обобщения своих неравенств, которое он сделал спустя несколько лет после опубликования статьи, которую мы обсуждали, он использует названное им ... *стандартное правило вычисления вероятностей*... Это правило — всего-навсего *теорема составных вероятностей, которая, как уже было сказано, эквивалентна формуле Байеса, т. е. скрытой аксиоме классической вероятности*.

АКАДЕМУС

Я начинаю понимать Ваш аргумент. Вы говорите, что из экспериментов типа ЭПР можно вывести только *связанные вероятности для пар* (S_a, S_b),

$(S_b, S_c), (S_c, S_a)$. Белл недвусмысленно допускает, что эти три связанные вероятности можно вывести из *одной связанной вероятности для трех наблюдаемых* (S_a, S_b, S_c) .

КАНДИДО

Совсем как в эксперименте с двумя отверстиями Гейзенберга, Фейнмана и многих других, недвусмысленно полагавших, что три вероятности, с которыми имеет дело этот эксперимент, являются следствием *одной связанной вероятности, общей для всех трех экспериментов*.

АКАДЕМУС

На самом деле в эксперименте Белла три корреляции также проистекают из экспериментов, которые не только отличаются друг от друга, но и являются несовместимыми. Поэтому а priori нет причины допускать, что они происходят из *одного среднего значения, подходящего для любой пары из трех* (S_a, S_b, S_c) . Единственное, что дают эти три эксперимента, так это три средних значения $E_{a,b}, E_{b,c}, E_{c,a}$, каждое из которых относится к соответствующей паре.

КАНДИДО

Подведем итог: неявный постулат Белла — это то же самое, что и постулат, на который было указано при анализе эксперимента с двумя отверстиями. **ЛОКАЛЬНОСТЬ БЕЛЛА** не имеет с ним ничего общего.

АКАДЕМУС

Почему никто не заметил этого?

КАНДИДО

Некоторые философы науки, например, А. Файн и Н. Картрайт понимали это, но никто не обратил на это внимания.

КАРТРАЙТ

Белл показывает, что, в соответствии с предсказаниями квантовой механики, подтвержденными экспериментально, нельзя ввести *скрытый параметр* λ , который производит факторизацию между двумя измеряемыми событиями³⁵.

АКАДЕМУС

Интуитивно возможность факторизации означает, что если известны *скрытые параметры* (λ) , то два события $S_a^{(1)} = \alpha$ и $S_b^{(2)} = \beta$ являются *статистически независимыми*. Стохастические модели, удовлетворяющие этому

³⁵N. Cartwright, M. Jones, Erkenntnis (1991). Факторизация ... условной независимости, которую можно выразить как:

$$P_r \{ S_a^{(1)} = \alpha; S_b^{(2)} = \beta | \lambda \} = P_r \{ S_a^{(1)} = \alpha | \lambda \} P_r \{ S_b^{(2)} = \beta | \lambda \}.$$

условию, называются *факторизуемыми*. Идея заключается в том, что параметры (λ) представляют *все то общее, что имеют эти два эксперимента*. Поэтому, установив их, причины, которые могут определять, что происходит с частицей 1, не зависят от причин, которые определяют то, что происходит с частицей 2.³⁶

БАТЕРФИЛЬД

Если два события скоррелированы, но одно не вызывает другое, распределение вероятности, установленное всем физическим состоянием их общего прошлого, делает их стохастически независимыми³⁷.

ФАЙН

Роль экспериментов по корреляции типа ЭПР, проводимых на системах в таком состоянии, в котором квантовая механика предсказывает крах неравенства Белла, состоит в проверке квантовой механики в сравнении с факторизованными стохастическими моделями...

Это, по терминологии Клаузера и Хорна, *локальные объективные модели*³⁸. Термины *локальный реализм* и *локальные скрытые параметры* также используются для их определения. Самая нейтральная терминология [факторизованные стохастические модели] была введена мной³⁹ для того, чтобы избежать предрассудков в физической или философской интерпретации таких моделей⁴⁰.

КАНДИДО

Успокаивает то, что даже среди всеобщей неразберихи кто-то еще ценит строгость. Не пойму, почему большинство исследователей, несмотря на все увещания авторитетных источников быть более осторожными, так некритически приняли теорию устранения локальности.

АКАДЕМУС

Вы ведь не верите, что современные ученые имеют иммунитет к всеобщему увлечению вещами, не имеющими рационального объяснения, но так необходимыми в музыке, шоу-бизнесе и политике, не правда ли? Даже если

³⁶Для обсуждения этого свойства и его релятивистских вариантов см. L. Accardi, *Probabilità Classica* в Enciclopedia delle Scienze Fisiche, Istituto dell' Enciclopedia Italiana (1984) 42–64.

³⁷Jeremy Butterfield, *A space-time approach to the Bell inequality*, в James T. Cushing, Erman McMullin (eds.), *Philosophical consequences of quantum theory*, University of Notre Dame Press, Notre Dame (1989) 114–144.

³⁸Clauser, Horne, Phys. Rev. D10 (1974) 526.

³⁹A. Fine, Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 292.

⁴⁰A. Fine, *Inequalities for non ideal Correlation Experiments*, Found. of Phys. 21 (1991) 365–378; см. также A. Fine, *Correlations and efficiency: Testing the Bell Inequalities*, Found. of Physics 19 (1989) p. 453–478, 459.

бы заслуга Белла сводилась только к тому, что он инициировал такое увлечение, разве это не было бы достойно похвалы? Разве не лучше было бы во времена Белла (т. е. в 1964 г.) соединить проблему основ квантовой теории с надежными экспериментами, вместо того, чтобы возиться с такими пустяковыми вещами, как формальные вопросы, которые в течение более чем двадцати лет так и не смогли ничего добавить к нашему пониманию интерпретации этой теории?

КАНДИДО

Если Вы полагаете, что работа Белла явилась полезным толчком, который вытолкнул дискуссию об интерпретации квантовой теории из болота пустого формализма, то Вы, конечно же, правы. Но я надеюсь, что после нашего спора Вы согласитесь, что нелокальность не имеет ничего общего с тем, что сделал Белл.

VIII.6. Приложение: доказательство неравенства Белла

Это доказательство включено для полноты изложения и совершенно несущественно для понимания предыдущих и последующих глав книги. Пусть A, B, C, D — четыре случайные переменные, заданные в вероятностном пространстве (Ω, P) и имеющие значения на множестве из двух точек $\{+1, -1\}$. Если $X: \Omega \rightarrow \{+1, -1\}$ — некая случайная переменная, то мы обозначаем через

$$\int_{\Omega} X dP = E(X) \quad (\text{VIII.6.1})$$

среднее значение или ожидание X .

Затем проверяем следующие эквивалентные неравенства:

$$|E(A \cdot B) - E(B \cdot C)| \leq 1 - E(A \cdot C), \quad (\text{VIII.6.2})$$

$$|E(A \cdot B) - E(B \cdot C)| \leq 1 + E(A \cdot C), \quad (\text{VIII.6.3})$$

$$|E(A \cdot B) - E(B \cdot C)| + |E(A \cdot D) - E(D \cdot C)| \leq 2. \quad (\text{VIII.6.4})$$

Для доказательства достаточно взглянуть на них, с учетом $B^2 = |A \cdot C| = 1$, и тогда

$$|E(A \cdot B) - E(B \cdot C)| \leq E(|AB - BC|) = E(|1 - AC|) = 1 - E(A \cdot C),$$

что доказывает (VIII.6.2). С заменой B на $-B$ и C на $-C$ (VIII.6.2) и (VIII.6.3) меняются местами, следовательно, они эквивалентны. Заменяя D на A в (VIII.6.4), мы получаем (VIII.6.3). Наконец, если (VIII.6.2)

(поэтому также (VIII.6.3)) верно, то, заменив в (VIII.6.3) B на D и C на $-C$, мы получаем:

$$|E(A \cdot D) - E(D \cdot C)| \leq 1 + E(A \cdot C), \quad (\text{VIII.6.5})$$

а добавив это неравенство к (VIII.6.2), мы получаем (VIII.6.4).

А это и есть знаменитые неравенства Белла. Для того, чтобы применить их к случаю, рассматриваемому в парадоксе ЭПР, достаточно видеть, что они означают существование в физическом пространстве (т. е. нормальном трехмерном пространстве) наборов из трех векторов a, b, c единичной длины, таких, что невозможно найти шесть случайных переменных S_x^j ($x = a, b, c; J = 1, 2$) (которые представляли бы спин двух частиц в трех направлениях в пространстве), заданных в одном вероятностном пространстве (Ω, \mathcal{F}, P) и со значениями в $\{-1, +1\}$, корреляции которых заданы с помощью:

$$E(S_x^1 \cdot S_y^2) = -x \cdot y; \quad x, y = a, b, c \quad (\text{VIII.6.6})$$

(где, если $x = (x_1, x_2, x_3)$, $y = (y_1, y_2, y_3)$ — два трехмерных вектора, $x \cdot y$ обозначает их евклидово скалярное произведение, т. е. сумму $x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3$). Левая часть выражения (VIII.6.6) — это именно то, что теоретически предсказано квантовой теорией и экспериментально подтверждено экспериментами типа эксперимента Аспекта. Например, если допустить, что $x = y$, мы получаем:

$$E(S_x^1 \cdot S_x^2) = -x \cdot y = -\|x\|^2 = -1; \quad x = a, b, c,$$

а поскольку $|S_x^1 S_x^2| = 1$, это возможно тогда и только тогда, когда $S_x^1 = -S_x^2$ ($x = a, b, c$), а это и есть условие того, что спины обеих частиц противоположны. Для полноты мы прилагаем доказательство того, каким образом (VIII.6.6) (предсказания квантовой теории) противоречит (VIII.6.2).

Используя неравенство (VIII.6.1) (где $A = S_a^1$, $B = S_b^2$, $C = S_c^1$), мы получаем:

$$|E(S_a^1 S_b^2) - E(S_b^2 S_c^1)| \leq 1 - E(S_a^1 S_c^1) = 1 + E(S_a^1 S_c^2),$$

что благодаря (VIII.6.5) эквивалентно:

$$|a \cdot b - b \cdot c| \leq 1 - a \cdot c. \quad (\text{VIII.6.7})$$

Таким образом, если три вектора a , b , c заданы в одной и той же плоскости, a перпендикулярно b , а c находится между a и b , образуя угол θ с a , то неравенство (VIII.6.6) превращается в

$$\sin \theta + \cos \theta \leq 1, \quad 0 < \theta < \pi/2. \quad (\text{VIII.6.8})$$

Но максимум функции $\theta \mapsto \sin \theta + \cos \theta$ в интервале $[0, \pi/2]$ равен $\sqrt{2}$ (получен для $\theta = \pi/4$). Поэтому для θ близкого к $\pi/4$, левая часть (VIII.6.8) будет близка к $\sqrt{2}$, что больше 1. Следовательно, при задании такого θ три единичных вектора a , b , c не удовлетворяют неравенству Белла, т. е. (VIII.6.7).

ГЛАВА IX

IX.1. Реализм черного ящика

АКАДЕМУС

Идея квантовой вероятности, заключающаяся в том, что корни противоречия между экспериментальными результатами и неравенством Белла нужно искать в скрытом допущении вероятностной природы, совершенно неверна. Такова же и аналогия с экспериментом с двумя отверстиями.

КАНДИДО

Посмотрим, почему это так.

АКАДЕМУС

Начиная с Х. Р. Стаппа¹, которого, возможно, вдохновил Вигнер², определенное количество авторов придумали множество доказательств неравенства Белла, которые, по крайней мере, *внешне*, стараются не прибегать к какому-либо статистическому допущению и сводить все к простым вычислениям.

КАНДИДО

Вы полагаете, что, как говорят некоторые авторы, *существенное допущение* Белла на самом деле совсем не существенно, и это позволяет другим авторам утверждать, что то, что квантовая вероятность считает *существенным* допущением (уникальность вероятностной модели), не только не существенно, но и необязательно.

АКАДЕМУС

Именно так. Вы ведь согласитесь с тем, что если можно доказать неравенство Белла, основываясь просто на вычислениях частот и не прибегая к каким-либо статистическим моделям, то тезис квантовой вероятности о том, что все парадоксы квантовой теории происходят из скрытого допущения вероятностного типа, полностью отвергается.

КАНДИДО

Если бы то, о чем Вы говорите, было бы правдой, то я бы без раздумий согласился с Вашими выводами. С другой стороны, я бы хотел предостеречь

¹Н. P. Stapp, Phys. Rev. D, 1971.

²E. Wigner, Am. J. Phys., 1970.

Вас относительно того, что эти доказательства являются всего лишь переводом на язык вычислений вероятностных аргументов, которые мы только что проанализировали.

АКАДЕМУС

Каким образом? Вы несколько раз отмечали фундаментальную роль формулы Байеса в вероятностной аргументации, в то время как в вычислении не может быть ничего похожего на эту формулу.

КАНДИДО

Настаивать на формуле Байеса полезно только для того, чтобы обратить внимание на различие между связанными вероятностями и условными вероятностями. Такое отличие все еще имеет значение при вычислениях.

АКАДЕМУС

Вы имеете в виду, что ошибка, состоящая в том, что не делается различия между теми ролями, которые играют различные типы условий (физической и тавтологической), могла также возникнуть при подсчете событий? Не вижу, каким образом это могло произойти: подсчет — это самая простая операция, которую только можно себе представить. В ходе эксперимента раздаются щелчки, и экспериментатор подсчитывает их. Каким образом при этом может произойти ошибка?

КАНДИДО

При прямом подсчете это действительно маловероятно. Но когда при непрямом подсчете вводятся *антифактические* аргументы (означающие, что подсчитывается уже не то, что можно непосредственно видеть, а то, что [возможно ошибочно], как полагают, должно произойти), нужно быть очень внимательным ко всем вводимым допущениям. Как бы то ни было, почему бы нам не попробовать и не исследовать чисто конкретно некоторые из этих *доказательств*, вместо того, чтобы рассуждать, используя абстрактную терминологию.

АКАДЕМУС

Одно такое очень известное доказательство д'Эспанья было опубликовано в «Scientific American» в 1979 г. Я допускаю, что антифактическое допущение, о котором вы меня предостерегали, является исходной точкой в его работе.

Д'ЭСПАНЬЯ

... Следует начать с допущения, которое противоречит фактам: что существует некий способ независимого измерения двух компонентов спина одной частицы. Предположим, что такой невероятный аппарат показал, что некий протон имеет спиновые компоненты A^+ и B^- , третий компонент

спина C не измерялся, но он может иметь только два значения: плюс (+) или минус (-)...

Если было обнаружено много протонов со спиновыми компонентами A^+B^- , то можно записать уравнение, выражающее их число:

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-). \quad (\text{IX.1.1})$$

КАНДИДО

Я полагаю, что $N(A^+B^-C^+)$ обозначает число протонов со спиновыми компонентами $A^+B^-C^+$ и что аналогичная интерпретация верна и для других обозначений.

АКАДЕМУС

Д'Эспанья использует обозначения, которые несколько отличаются от тех, которые мы до сих пор использовали. Он использует запись A^+ для обозначения события, которое мы называли

$$S_a = +1 \equiv \text{спин в направлении } a \text{ имеет значение } +.$$

Символы B^- , C^+ имеют аналогичное значение.

Д'ЭСПАНЬЯ

... Обозначение $N(A^+B^-)$ использовалось для представления количества отдельных протонов с двумя спиновыми компонентами A^+ и B^- ...

АКАДЕМУС

Будьте осторожны, чтобы не ошибиться; когда д'Эспанья говорит об отдельных протонах, он имеет в виду, что $N(A^+B^-)$ — количество протонов, которые в одно и то же время имеют + спин в направлении a и - спин в направлении b .

КАНДИДО

Это число Платона, потому что, подобно тому как недавно считал д'Эспанья, его измерение *противоречит фактам*: согласно квантовой механике нельзя измерить в одно и то же время спин одного протона в двух различных направлениях. Поэтому число $N(A^+B^-)$ наблюдать нельзя.

АКАДЕМУС

Именно на этой стадии используются синглетное условие и допущение реализма Эйнштейна: каждый такой протон имеет синглетного партнера. Спин A можно измерить у протона, а спин B у его синглетного партнера, и тогда можно будет посчитать число пар, для которых обнаружено A^+ при первом измерении и B^- при втором. Д'Эспанья использует запись $n(A^+B^-)$ для обозначения количества пар, для которых получен результат A^+ для первого протона и B^- для второго протона.

КАНДИДО

Почему измерение синглетной пары дает мне информацию об одном протоне?

Д'ЭСПАНЬЯ

... Чтобы было понятно, существование точной негативной корреляции подразумевает, что первый протон, который нам известен по прямому измерению и имеет спиновый компонент, должен также иметь компонент B^- ...

АКАДЕМУС

Это означает, что число пар с компонентами A^+B^+ равно числу отдельных протонов с компонентами A^+B^- . В виде формулы:

$$n(A^+B^+) = N(A^+B^-). \quad (\text{IX.1.2})$$

Заметьте, что благодаря синглетному условию, имеем $N(A^+B^-) = N(A^-B^+)$. Правая часть уравнения (IX.1.2) *прямо* не измеряется, а левая часть уравнения измеряется, и антифактический аргумент гарантирует, что уравнение верно. В этом смысле д'Эспанья считает, что $N(A^+B^-)$ можно измерить. В конце концов, *непрямые измерения*, конечно же, были изобретены не квантовой теорией.

КАНДИДО

Как бы то ни было, в уравнении (IX.1.1) левую часть можно измерить, хотя и не напрямую. Правая часть выражает утверждение Платона, чисто экзистенциальное, выведенное из признания того, что протоны, для которых оно было измерено и значение спина которых равно A^+ и B^- , можно также разделить на два класса в соответствии с тем, имеет ли спин в направлении с значение $+(C^+)$ или $-(C^-)$.

АКАДЕМУС

Это просто подразделение по Платону, поскольку величины $N(A^+B^-C^+)$ и $N(A^+B^-C^-)$ нельзя измерить экспериментально, *даже не напрямую*. Но такие величины должны существовать благодаря постулату реализма.

КАНДИДО

Если все именно так, каково должно быть значение уравнения (IX.1.1)?

АКАДЕМУС

Это тонкая часть рассуждений. Для начала положим, что связи, подобные (IX.1.1), имеют место для протонов с двумя компонентами A^+C^- или B^-C^+ или

$$N(A^+C^-) = N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-), \quad (\text{IX.1.3})$$

$$N(B^-C^+) = N(A^+B^-C^+) + N(A^-B^-C^+). \quad (\text{IX.1.4})$$

Поскольку все величины в этих уравнениях положительны или равны нулю, то $N(A^+C^-)$ больше или равно $N(A^+B^-C^-)$ и $N(B^-C^+)$ больше или равно $N(A^+B^-C^+)$. В виде формулы:

$$N(A^+B^-C^-) \leq N(A^+C^-); \quad N(A^+B^-C^+) \leq N(B^-C^+). \quad (\text{IX.1.5})$$

Тогда, объединив неравенства (IX.1.5) и (IX.1.1), получаем:

$$N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-) \leq N(B^-C^+) + N(A^+C^-). \quad (\text{IX.1.6})$$

Наконец, используя равенство (IX.1.2), чтобы выразить все как функцию величин, которые можно измерить экспериментально, мы получим:

$$n(A^+B^+) \leq n(A^+C^+) + n(B^+C^+). \quad (\text{IX.1.7})$$

Д'ЭСПАНЬЯ

Это неравенство Белла.

КАНДИДО

Оно не похоже на то, которое мы обсуждали в разд. VIII.4.

АКАДЕМУС

Действительно, неравенство, используемое д'Эспанья, — не то же самое неравенство, которое первоначально использовал Белл. Однако не трудно доказать, что ряд неравенств того же типа, что использовал д'Эспанья, эквивалентен неравенству, первоначально сформулированному Беллом³.

КАНДИДО

Но тогда, разве не должен был д'Эспанья доказать или хотя бы упомянуть об этом неравенстве в своей популярной статье?

АКАДЕМУС

Не обязательно.

КАНДИДО

Давайте подведем итог: по словам д'Эспанья, выражение (IX.1.7) не является неравенством Белла; это просто неравенство, которое каким-то образом связано с ним.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, достаточно доказать тезис д'Эспанья. А идея та же самая, что и в неравенстве Белла.

³L. Accardi, *Topics in Quantum Probability*, Physics Reports 77 (1981) 169–192.

КАНДИДО

Понятно. Однако как много невыраженных допущений, неточностей, логических перескоков, грубых утверждений . . . можно найти в этих *научно-популярных* статьях . . .

АКАДЕМУС

Несомненно только одно: в разговоре о д'Эспанья мы говорили только о вычислениях. О вероятности даже не упоминалось.

КАНДИДО

Не упоминалось, потому что д'Эспанья недвусмысленно заявляет, что
Д'ЭСПАНЬЯ

Не буду вдаваться в детали, каким образом из математического формализма квантовой теории возникают предсказания . . .

КАНДИДО

Дело в том, что этот формализм выражает свои предсказания в вероятностных терминах. Таким образом, для того, чтобы осуществить сравнение между экспериментальными данными и квантовой теорией, необходимо ввести *относительные частоты* полученных результатов. Совокупность всех таких относительных частот определяет степень вероятности. Этот критерий часто используется во всех статистических исследованиях: это *эмпирическое распределение*. Именно его сравнивают с *теоретическим распределением*.

АКАДЕМУС

Это означает лишь то, что, *если вы хотите, Вы можете* сформулировать результаты д'Эспанья в вероятностных терминах, *но это ваш выбор*. Вы точно также можете избежать этого и говорить только о подсчетах.

КАНДИДО

То, о чем Вы говорите, — верно, но это не противоречит интерпретации квантовой вероятности. В этой интерпретации термин *вероятность* используется в широком смысле, который в качестве частного случая включает интерпретацию в терминах на основании относительных частот, но не ограничивается этим (например, позволяет Вам с таким же успехом соглашаться с субъективистской интерпретацией). Если Вы хотите свести вероятностную интерпретацию к интерпретации в терминах частот и перевести все вероятностные выражения в количественные, Вы, конечно же, можете это сделать, но это не избавит Вас от критического анализа со стороны квантовой вероятности. Кроме того, существует еще одно фундаментальное различие между ортодоксальной интерпретацией и данной интерпретацией: в случае ортодоксальной интерпретации прибор *создает* значение путем перевода

от виртуального к реальному, во время которого принимается случайное значение с вероятностью, предсказанной квантовой теорией. В новой интерпретации, наоборот, эта роль случайности ограничена, и в некоторых случаях можно доказать, что действие измерительного прибора на измеряемую систему *должно быть детерминистским* (см. разд. IX.4).

АКАДЕМУС

Но при таком анализе были существенны вероятностные элементы: мы говорили о *формуле Байеса, о связанных вероятностях, об условных вероятностях* . . .

КАНДИДО

Основным концептуальным моментом такого анализа являлось следующее: *некорректно a priori допускать, что статистические данные относительно несовместимых экспериментальных условий можно описать в рамках одной вероятностной модели*. Очевидно, что Вы хотите свести все возможные статистические данные только к относительным частотам, и это утверждение также можно перевести обратно только в количественные термины. Мы сформулировали наш анализ в вероятностных терминах, поскольку мы не хотели ограничиваться относительными частотами.

АКАДЕМУС

Что же тогда представляет собой этот *перевод* в количественных терминах?

КАНДИДО

Некорректно a priori распространять на результаты подсчета, полученные в несовместимых экспериментах, связи, которые имеют значение для подсчетов, сделанных в контексте одного эксперимента.

АКАДЕМУС

Все это действительно звучит абстрактно, и мне трудно понять, что это означает на самом деле.

КАНДИДО

Это означает, например, что д'Эспанья делает ту же ошибку, которую совершили Гейзенберг и Фейнман при анализе эксперимента с двумя отверстиями: объединяет данные, полученные в несовместимых экспериментах, т. е. недвусмысленно считает, что они получены из одной однородной выборки.

АКАДЕМУС

Это общие и абстрактные утверждения. Вы не убедите меня до тех пор, пока не сможете предоставить мне интуитивную интерпретацию этих математических представлений, чего-то, что связывает их со специфическими физическими свойствами. В частности, Вы должны будете показать мне,

каким образом эти аргументы можно применить конкретно к рассуждениям д'Эспанья.

ВАН ДЕН БЕРГ

Нужно доказать одну вещь — что можно представить статистические данные с помощью различных типов вероятностных моделей. Нужно также констатировать, что этого достаточно для того, чтобы удовлетворительно с физической и философской точек зрения решить проблемы интерпретации физической теории⁴.

КАНДИДО

Действительно, это две разные вещи, но именно квантовая вероятность улавливает это *различие*. В ее математическом открытии происходит не замена философской интерпретации, а создание ее основ. Для того, чтобы объяснить, каким *удобоваримым с физической и философской точек зрения путем* это происходит, необходимо обсудить концептуальное различие между *черными ящиками и хамелеонами*.

IX.2. Реализм хамелеонов

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что можно применить тот же самый тип анализа с использованием квантовой вероятности, который был предложен для объяснения кажущихся противоречий, возникших в эксперименте с двумя отверстиями, для варианта Белла эксперимента ЭПР.

КАНДИДО

Не вижу, почему бы не могло быть и так.

АКАДЕМУС

Прежде всего, в отличие от эксперимента с двумя отверстиями, в случае, который рассматривал Белл, условие для подготовки трех измерений то же самое: синглетное состояние. В случае эксперимента с двумя отверстиями трем несовместимым условиям подготовки эксперимента (открыты оба отверстия, закрыто отверстие 1, закрыто отверстие 2) соответствует одно и то же измерение (подсчет числа частиц, пришедших в область X на втором экране). В случае варианта Белла эксперимента ЭПР одному и тому же условию подготовки эксперимента (синглетному состоянию) соответствуют три несовместимых процесса измерения. Короче говоря, *в случае с двумя*

⁴Н. Van den Berg, D. Hoekzema, H. Radder, *Discussion: Accardi on quantum theory and the «fifth axiom» of probability*, Official Journal of the Philosophy of Science Association, Vol. 57, No 1, 1990, 149–157, p. 152.

отверстиями образцы были взяты из трех различных черных ящиков, в случае Белла имеется только один черный ящик.

КАНДИДО

Пожалуйста, объясните это еще раз.

АКАДЕМУС

В случае с двумя отверстиями можно было сослаться на различие в условиях подготовки для того, чтобы заключить, что а priori не было причины ожидать одной классической вероятностной модели, или, скорее, если Вам так больше нравится, возможности рассматривать три подсчета, полученные в трех экспериментах, как если бы они были получены при одном подсчете. Напротив, в синглетном случае единственное отличие заключается в приборе, подготовленном для различных измерений.

КАНДИДО

Я так и не вижу разницы: в опыте с двумя отверстиями предполагается, что частицы также испускаются в квантовом состоянии (особые свойства этого состояния не явны, поскольку они не играют той роли, которую можно было бы сопоставить с синглетным свойством). Возможность открывать или закрывать отверстия различными способами соответствует тому, что приборы для измерения спина или поляризации в заданном направлении локализованы в пространстве по-разному и поэтому создают разные граничные условия.

АКАДЕМУС

Но это совсем другое дело: в эксперименте с двумя отверстиями измерительным прибором является счетчик, расположенный за вторым экраном, в то время как первый экран лишь играет роль фильтра. Если Вы хотите настаивать на аналогии, то Вы должны сказать, что распределение частиц на втором экране зависит от того, сколько счетчиков расположено позади него, а также где они расположены... думаю, что такое утверждение не вполне соблюдается при проведении экспериментов.

КАНДИДО

Я тоже так думаю, но дело не в этом. Частица, вылетевшая из источника с хорошо определяемым квантовым состоянием, *только ощущает глобальные граничные условия*. Если Вы оставите счетчик на месте и будете открывать или закрывать отверстие на первом экране, для частицы это будет то же самое, как если бы Вы поменяли измерительный прибор. Короче говоря, я имею в виду то, что *сравнение с изъятием шара из черного ящика*, на которое недвусмысленно указывал анализ д'Эспанья, *методологически неверно*.

АКАДЕМУС

Это сравнение вовсе не недвусмысленно, оно является следствием того допущения, которое д'Эспанья называет *локальным реализмом*. Если значение спина частицы в каком-либо направлении является чем-то *реальным*, объективно существующим, подобно цвету шара, то процесс измерения является *пассивным*: в ходе его я только констатирую цвет шара, когда я вынимаю его из черного ящика. Другими словами, если мы придерживаемся той точки зрения, согласно которой прибор не *создает* измеряемое значение, а только записывает его, то нужно заключить, что сравнение с черным ящиком — правильно.

КАНДИДО

Поэтому задача состоит в том, чтобы выяснить, до какой степени процесс измерения *выявляет* то, что уже существовало, и до какой степени *определяет* его значение.

АКАДЕМУС

Что Вы понимаете под словом *определяет*? Имеется в виду, что он создает значение? Это как раз является точкой зрения ортодоксальной интерпретации и мы знаем, что под этим подразумевается мгновенное действие на расстоянии.

КАНДИДО

Не обязательно. По моему мнению, мы должны различать *два аспекта* в ортодоксальной интерпретации: правильный и важный с философской точки зрения, а также необоснованный и вредный с философской точки зрения. Необоснованным является утверждение, что я создаю величину с помощью измерения. Правильным является то, что измеренное наблюдаемое имеет хорошо определенное значение *до* измерения, но значение, которое экспериментатор считывает с прибора, может отличаться от него вследствие сложного процесса взаимодействия между самим прибором и системой, которую мы измеряем.

АКАДЕМУС

Почему вы считаете, что такая интерпретация важна с философской точки зрения?

КАНДИДО

Потому что в этом случае остается значимой базовая интуиция отцов-основателей квантовой теории: *активная роль процесса измерения*. Нужно было бы еще раз подтвердить тот факт, что в противоположность тому, что происходит в классической физике, процесс измерения не представляет собой *пассивную регистрацию* уже существующей реальности,

а является *участником*, вносящим свой вклад в установление реальности.

АКАДЕМУС

Но таким образом Вы возвращаетесь назад к ортодоксальной интерпретации.

КАНДИДО

С той разницей, что все метафизические симуляции *виртуальной реальности, наблюдаемых, которые не имеют значений до тех пор, пока их не измерят, сцепленных систем, нелокальности*... становятся ненужными. Ошибка ортодоксальной интерпретации заключается в том, что она заявляет о своем доказательстве того, что если тезис о создании значений в процессе измерения не принимается, то возникают противоречия с экспериментом. Квантовая вероятность доказала, что такое заявление ничем не оправдано.

АКАДЕМУС

Но каким *мировоззрением*, какой *физической интерпретацией* Вы бы заменили ортодоксальную идею перехода от виртуального в реальному?

КАНДИДО

Я уже говорил Вам: идеей *взаимодействия* или *реализмом хамелеонов*. Мы должны различать два утверждения:

в момент t наблюдаемое A имеет значение a ; (IX.2.1)

если я измеряю наблюдаемое A в момент t , я получаю значение a . (IX.2.2)

Физики могут ставить эксперименты только по проверке второго утверждения. С философской точки зрения это действительно новое в квантовой теории по сравнению с классической физикой, которая не делает различия между этими двумя утверждениями. Квантовая вероятность подчеркивает это положение, не доводя дело до метафизики и парадоксов.

АКАДЕМУС

Для классической физики все свойства системы (т.е. значения, принимаемые наблюдаемыми данной системы) были похожи на *маленькие бюллетени в черном ящике*. Мастерство физика-экспериментатора состоит в *извлечении* тех бюллетеней, которые ему интересны и которые он может *прочитать*. Но никто не думал, что процесс *извлечения* или *чтения* может изменить содержание бюллетеня.

КАНДИДО

В квантовой физике образ *изъятия из черного ящика* нужно заменить на образ *хамелеона*: хамелеон становится коричневым, когда он находится на

ветке, и зеленым, когда он находится на листьях. Экспериментатор знает, что в ящике сидит хамелеон, и задается вопросом, какого он цвета. Для того, чтобы заставить хамелеона вылезти из ящика, он кладет пищу на ветку рядом с ящиком и, пока хамелеон ест, рассматривает его окраску и приходит к выводу, что она коричневая. Но если он положит пищу не на ветку, а на листья, то он придет к правильному заключению, что хамелеон зеленый. Кроме того, ничто не говорит о том, что хамелеон, находящийся в ящике, имеет хорошо определяемую окраску. Поэтому не возникает противоречия с той точкой зрения, согласно которой . . .

Д'ЭСПАНЬЯ

. . . Физик пришел к заключению, что в каждой паре оба протона имеют спиновые компоненты, которые можно определить в любой момент времени⁵ . . .

КАНДИДО

И все же, если мы применили к хамелеону критерий, согласно которому . . .

ПЕРЕС

. . . Результат измерения наблюдаемого A зависит только от выбора A и объективных свойств той системы, которую мы измеряем.

КАНДИДО

. . . Мы бы непременно пришли к противоречивым результатам.

АКАДЕМУС

Я бы сказал, что у хамелеона *нет* окраски.

КАНДИДО

Это было бы неверно, потому что *всякий раз Вы хорошо определяете окраску*. Точно так же, как и в случае с частицами в квантовой теории: каждый раз при измерении положения, спина, энергии, скорости, . . . находят хорошо определяемые значения.

АКАДЕМУС

Я хотел сказать, что окраска не является *внутренним свойством* хамелеона.

КАНДИДО

Это Ваше утверждение выявляет предрассудки *Платона*: создается впечатление, что под *внутренним свойством* Вы понимаете *свойство, которое не зависит от окружающей среды*. Но ни одно свойство физических объектов не является полностью независимым от окружающей среды. Некоторые свойства достаточно стабильны и под воздействием окружающей среды не претерпевают изменений, которые находятся в *заранее установленных*

⁵B. D'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Acad. Press (1976), p. 134.

пределах. Эта стабильность настолько широко распространена в макроскопическом мире, что мы находим поведение хамелеона непонятным. Однако я вовсе не считаю странным то, что она исчезает в микромире.

АКАДЕМУС

Вы говорите, что объективных свойств, независимых от окружающей среды, не существует. Это как раз точка зрения квантовых ортодоксов: наблюдатель создает окружающую среду и, следовательно, в соответствие с тем, что Вы говорите, свойства. Ясно, что Вы тоже сейчас отрицаете реализм.

КАНДИДО

На мой взгляд, реальным внутренним и объективным свойством является способность *реагировать на окружающую среду*. Хамелеон всегда становится зеленым, когда его помещают на лист, и всегда становится коричневым, когда его помещают на ствол. Это объективное свойство, отличающееся от *коллапса волнового пакета*, который происходит только случайно.

АКАДЕМУС

То, что Вы называете *способностью реагировать*, является альтернативным способом введения *виртуальной реальности*, о которой Гейзенберг говорил, что это будет процесс измерения, который создает цвет хамелеона.

КАНДИДО

Отличие заключается в том, что по мнению ортодоксов цвет хамелеона *не может существовать* до измерения (вспомните выводы Фейнмана относительно эксперимента с двумя отверстиями); напротив, согласно новой интерпретации, он может существовать и изменяться вследствие измерения. Это небольшое различие, я уверен, что Бор и Гейзенберг были бы рады такой новой интерпретации. Не рады были бы только те, кто приложил усилия для создания ореола волшебства и таинственности вокруг квантовой теории, а также те, для кого поддержка идеи гораздо важнее понимания. Но есть еще одно, более важное различие, касающееся детерминизма. О нем мы поговорим в разд. IX.4.

АКАДЕМУС

Но в случае с хамелеонами вы бы никогда не получили такую *запутанную систему* как в случае с парадоксом ЭПР.

КАНДИДО

Почему? Давайте рассмотрим двух хамелеонов-близнецов и поместим их на очень большом расстоянии друг от друга. Два экспериментатора будут производить наблюдения за изменением окраски хамелеонов. Как и в случае ЭПР-эксперимента, они синхронизируют свои наблюдения так, что будут осуществлять измерения в одно и то же время. Позже они обменя-

ются данными и убедятся, что в каждый момент времени, когда условия эксперимента (лист или сук) были одними и теми же, результаты также были аналогичными: если использовать язык приверженцев основ квантовой теории, хамелеоны были *сцеплены*, совсем как синглетные пары в ЭПР-эксперименте.

АКАДЕМУС

Но хамелеоны не *сцеплены*. Они просто *одинаково реагируют на одни и те же пограничные условия*. В этом нет ничего удивительного или таинственного.

КАНДИДО

Что мешает нам применить к синглетным парам те же рассуждения, которые на Ваш взгляд столь очевидны для пар хамелеонов? В случае с хамелеонами суть состоит в том, что если я определяю цвет одного в момент t и выясняю, что он, скажем, *зеленый*, то я могу предсказать, что *если в тот же момент времени t его двойник был подвергнут такому же обследованию*, его цвет также непременно должен быть зеленым. С другой стороны, если в момент времени t хамелеон-двойник был помещен на сук, а не на лист, его окраска должна быть коричневой, а не зеленой. Мы показали на микроскопическом примере различие между утверждением (IX.2.1) и утверждением (IX.2.2). В нашем примере эти два утверждения будут соответственно:

в момент t хамелеон зеленый; (IX.2.3)

*если я фиксирую окраску хамелеона в момент t ,
она оказывается зеленой.* (IX.2.4)

АКАДЕМУС

Но почему этот пример должен обесценить рассуждения Д'Эспанья, Шимиони, Стаппа и др...?

КАНДИДО

Это похоже на то, что сказал Д'Эспанья: *если я определяю окраску хамелеона и вижу, что она зеленая, а затем измеряю вес его двойника, находящегося в ящике, и устанавливаю, что он равен 150 г, то я могу заключить, что последний зеленый и весит 150 г*. В этом-то и заключается ошибка: ничто не мешает хамелеону, находящемуся в ящике, быть коричневым.

АКАДЕМУС

Тогда мы должны сделать вывод, что окраска хамелеона не является *элементом реальности* в смысле ЭПР.

КАНДИДО

Идея об *элементе реальности* в смысле ЭПР принадлежит классической физике, и его надо отделять от *элемента реальности в данных условиях*

эксперимента, относящегося к современной физике. Модель измерения для классического физика — это процесс изъятия из черного ящика; для современного же физика — это должен быть хамелеон.

АКАДЕМУС

И все-таки Ваша аналогия с хамелеонами-двойниками и синглетными парами, на мой взгляд, не очень убедительна. Она упускает тот факт, что две частицы находятся в состоянии суперпозиции, и я не знаю, что это будет означать применительно к паре хамелеонов.

КАНДИДО

Вы повторяете ортодоксальную интерпретацию, которая, как мы только что видели, основана на смешении математической модели с физической реальностью! Выражение «две частицы находятся в синглетном состоянии» — это краткая форма выражения того, что, если в момент времени t я измеряю спин одной из них в любом направлении и обнаруживаю, что он равен $+1$, я могу с определенностью утверждать, что *если в момент времени t измеряли спин другой частицы в том же самом направлении*, то результатом такого измерения может быть только -1 . При подобных утверждениях мы видим, что единственным отличием синглетных пар от пар хамелеонов является то, что в первом случае корреляция относится к отсутствию ограничения двух значений ($+1$ или -1) наблюдаемых (спин в любом направлении); в последнем он относится только к двум наблюдаемым: *цвету листа и цвету сука*, имеющим два значения: зеленый и коричневый. Отметим, что они также являются несовместимыми наблюдаемыми: вы не можете *одновременно* наблюдать цвет на листе и на суку. Тот факт, что мы имеем строго отрицательную корреляцию в одном случае и строго положительную в другом, — имеет лишь дополнительное значение и никоим образом не приводит к концептуальным последствиям. Можно легко придумать объяснение, предположив, например, что один хамелеон является мутантом и становится коричневым, находясь на листе, и зеленым, находясь на суку.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что антифактический аргумент нельзя применять к хамелеонам?

КАНДИДО

Вы можете это сделать, но Вы должны быть осторожны и делать это правильно, отличая *утверждения Платона от эмпирических утверждений*. Если Вы путаете эти два понятия, то Вы придете к той же ошибке, что Белл, Д'Эспанья и многие другие...

АКАДЕМУС

Что означает это различие в том конкретном случае, который мы исследуем?

КАНДИДО

В том примере с двойниками-хамелеонами, который мы рассматривали выше, где окраска одного и вес другого определяются [в отсутствие наблюдения], это означает, что невозможно заключить, что ненаблюдаемый хамелеон *зеленый*, но только то, что *если его окраска определялась тогда, когда он находился на листе, то он непременно должен быть зеленым*. Это также антифактический аргумент, но несколько иной, нежели тот, который использовался неявно д'Эспанья, а также Эйнштейном, Подольским, Розеном, Беллом и многими другими . . .

АКАДЕМУС

В чем различие между этими двумя аргументами? Мне кажется, что оно заключается только в изменении того, как сказать о вещи, а не в изменении самой вещи. Если вместо того, чтобы вести подсчеты состояния окраски хамелеона, я подсчитывал бы *состояния окраски, которую они имели, если бы их измеряли* (на листе или на суку), Ваш пример был бы сведен к случаю, рассмотренному д'Эспанья и Беллом посредством простой замены термина *хамелеон* на *частицу* и альтернативы *коричневый-зеленый* на альтернативу + или -.

КАНДИДО

Во многих случаях, особенно в макроскопических явлениях, положение вещей именно такое, как Вы говорите. Но не всегда.

АКАДЕМУС

Что Вы подразумеваете под *не всегда*? Что могло измениться?

КАНДИДО

Вы не можете исключить возможность того, что благодаря каким-то еще не известным нам механизмам при измерении веса хамелеона я вызываю изменение его окраски. Используя более абстрактный язык, мы можем сказать, что посредством измерения наблюдаемого я могу вызвать изменение значения другого наблюдаемого.

АКАДЕМУС

Всякий квантовый физик очень хорошо знает, что такое может произойти. Но это не делает Ваш аргумент убедительным, потому что никто не мешает мне вести статистику не ответов на вопросы, возникающие в ходе экспериментов, а *ответов, которые можно было бы дать, если бы вопросы были другими*.

КАНДИДО

Искать такую информацию вполне допустимо для экспериментальной науки. Такая наука интересуется *реальными вещами*, и если при объединении дедуктивной логики и результатов измерений можно понять что-то, что непосредственно не выявляется в ходе самих измерений, то это действительно большая удача.

АКАДЕМУС

Чтобы быть более конкретным: если я знаю, что в каждой паре хамелеонов один является мутантным, и если я обнаруживаю, что измеряемый мною хамелеон, находящийся на листе, имеет зеленую окраску, то я могу заключить, что другой хамелеон *на листе имел бы непременно коричневую окраску*. В этом смысле, как Вы можете видеть, *антифактическая статистика* имеет точное эмпирическое значение.

КАНДИДО

Безусловно, но в том смысле, о котором Вы только что говорили, а не в более наивном, к которому часто прибегают в обсуждениях ЭПР-эксперимента, а именно, *если я обнаруживаю, что хамелеон, находящийся на листе, — зеленый, то я могу сделать вывод о том, что другой хамелеон — коричневый*. Уже доказано, что такая интерпретация антифактического аргумента ошибочна. Как Вы можете видеть, *критерий реализма Эйнштейна* не применим к хамелеонам.

АКАДЕМУС

Что Вы имеете в виду?

КАНДИДО

Вспомните формулировку этого критерия.

ЭЙНШТЕЙН

Если без каких-либо нарушений физической системы можно предсказать с достаточной степенью определенности (т. е. с вероятностью 1) значение некоторых ее наблюдаемых, то такое значение можно рассматривать как *элемент реальности* этой системы.

КАНДИДО

Если я определяю зеленую окраску находящегося на листе одного хамелеона из пары, то я могу *с определенностью предсказать*, что другой, находящийся на листе, будет коричневым. Но было бы неправильно полагать, что коричневая окраска является *элементом реальности* другого, т. е. мутантного, хамелеона, постольку поскольку определяя ее на суку, я бы обнаружил, что он зеленый.

АКАДЕМУС

Теперь мне кажется, что именно Вы играете словами! Настоящим элементом реальности является не цвет, а, скорее, окраска, определяемая на листе, и окраска, определяемая на сукку.

КАНДИДО

Именно то, что надо! Для того, чтобы полностью согласиться с тезисом квантовой вероятности, Вы просто должны принять для спина то, что, как Вы только что говорили, очевидно для хамелеонов: *настоящим элементом реальности является не спин, а спин, измеряемый в направлении а*. Вы понимаете о чем речь? Спин, подобно хамелеону, *чувствует локальное окружение и реагирует на него*.

АКАДЕМУС

А что если я буду быстро менять сук и лист, так что хамелеон не сможет понять, на чем будет определяться его окраска?

КАНДИДО

Если время замены сопоставимо со временем реакции, то на практике имеет значение только то, что будет предложено последним. Если же замена происходит намного быстрее, то даже Вы не знаете, какое измерение Вы произвели, и поэтому у Вас не будет никакой статистики.

АКАДЕМУС

Предложенный Вами для аргумента д'Эспанья пример со счетчиком хамелеонов не совсем уместен. Для того, чтобы вновь вернуться к аргументу д'Эспанья, Вы должны рассматривать не статистику эмпирически измеренных свойств хамелеонов, а статистику *тех свойств, которые были бы у них, если бы их измеряли определенным образом*.

КАНДИДО

То, что Вы говорите, — резонно, причем настолько, что это кажется *единственной* возможностью для тех, кого подобно нам обучали в духе *реализма черного ящика*. В разд. IX.5 я покажу, что *реализм хамелеонов* — более тонкая вещь. *Статистика адаптивных процессов может отличаться от статистики платонических явлений!*

IX.3. *Natura facit saltus* (природа совершает скачки)

АКАДЕМУС

Аналогия с хамелеоном может быть интересна для некоторых наблюдаемых, претерпевающих непрерывные изменения, но не думаю, что это имеет отношение к дискретным наблюдаемым, например, спинам частиц.

КАНДИДО

Почему спинам?

АКАДЕМУС

Спин — это к примеру. Думаю, это имеет отношение к любому наблюдаемому, претерпевающему *измерения первого типа*, т. е. измерения, которые, будучи повторенными через короткий интервал в той же системе, дают тот же самый результат. Согласно квантовой теории, наблюдаемые с таким свойством являются *дискретными*, или, более правильно, мы должны говорить о *дискретных значениях наблюдаемых*, поскольку существуют наблюдаемые, значения которых подразделяются на дискретную последовательность и на один или более непрерывных интервала.

КАНДИДО

Когда Вы говорите *очень короткий временной интервал*, вы имеете в виду то, что в физической литературе часто обозначается термином *сразу же после?*

АКАДЕМУС

Допустим, *да*, несмотря на некоторую неопределенность этого выражения. На самом деле важна не малая величина временного интервала, а тот факт, что в этом интервале систему можно рассматривать как *изолированную*, т. е. не взаимодействующую с окружающей средой.

КАНДИДО

Существование дискретных наблюдаемых или, в более общем случае, дискретных последовательностей значений для данного наблюдаемого является другой важной чертой квантовой физики по сравнению с классической физикой.

АКАДЕМУС

Действительно, классическая физика, включая теорию относительности, является *физикой непрерывности*, основанной на наблюдаемых, к которым приложимы непрерывные значения, обычно пространство и время.

КАНДИДО

Заряд, который, однако, может принимать только дискретные значения, также играет существенную роль в классическом электромагнетизме.

АКАДЕМУС

Заряд играет особую роль, которая сохраняется также и в современной формулировке квантовой теории: это *универсальное совместимое* наблюдаемое. Это означает, что оно может быть точно измерено вместе с другим наблюдаемым. На жаргоне это можно выразить следующим образом: заряд подчиняется *правилу суперселекции*.

КАНДИДО

Понятно. Это означает, что нет такого принципа неопределенности, который бы утверждал, что невозможно измерить одновременно заряд и какую-либо другую величину, подобно, например, паре местоположение – импульс или угловой момент (или спин) вдоль двух непараллельных направлений.

Иногда я задумываюсь над тем, сохранится ли в результате дальнейшего развития физики это универсальное свойство неизменным.

АКАДЕМУС

При нынешнем состоянии вещей это — чистой воды спекуляции.

Что точно установлено современной физикой, так это существование дискретных наблюдаемых, из чего вытекает необходимость введения скачкообразных элементов в описании природы.

КАНДИДО

Верно: до сих пор не существует экспериментального доказательства того, что значения дискретных наблюдаемых являются приближениями нижежащих непрерывных значений. Никто никогда не видел дробный заряд или спин . . .

С другой стороны, идея о такой величине, как спин, которая перескакивает от значения $+1$ к -1 вне пространства и времени, волнует мою интуицию. Если спин может принимать только два значения: $+1$ или -1 и не постоянен во времени, то переход из одного значения в другое должен обязательно быть *мгновенным*. Таким образом, должно иметь место изменение состояния, которое происходит с бесконечной скоростью, и это, на мой взгляд, противоречит моей интуиции в отношении теории относительности.

АКАДЕМУС

С математической точки зрения все правильно. Спин — это величина, которую нельзя выразить в пространственно-временных терминах, поэтому нет оснований задумываться над вопросом, *сколько времени требуется* спину для того, чтобы поменять одно значение на другое.

КАНДИДО

Знаю, но я не могу думать об этом с легкостью. Наша интуиция в отношении этих наблюдаемых, которые нельзя выразить в терминологии пространства и времени, весьма примитивна. Даже математика, которая описывает наблюдаемые такого рода (теория *расслоенных пространств*), достигла своего максимального развития только после Второй мировой войны. Чтобы помочь нашей интуиции в отношении этих наблюдаемых, крайне необходима метафора, точно так же как метафора с хамелеоном помогает понять,

почему необязательно прибегать к мистике или абсурду для того, чтобы объяснить нарушение аргумента, противоречащего фактам.

АКАДЕМУС

Ваша аналогия несостоятельна, поскольку никто никогда не видел суперпозиции макроскопических объектов: мы уже говорили об этом, когда обсуждали *кошек Шрёдингера*.

КАНДИДО

Возможно, это не касается хамелеонов, но, по-видимому, современные экспериментаторы могут осуществить суперпозицию SQUIDS (СКВИД)⁶. Вообще в современной физике имеется очень интересное направление исследований, особенно в области физики твердого тела и в квантовой оптике, которое пытается выявить состояния суперпозиции макроскопических объектов. Такие состояния также называют *кошками Шрёдингера*⁷.

АКАДЕМУС

С другой стороны, не думаю, что у кого-нибудь возникло бы желание настаивать на том, что два хамелеона в состоянии суперпозиции теряют свою индивидуальность, *сцеплены* и только в виртуальной реальности выглядят как хамелеоны.

IX.4. Месть детерминизма

АКАДЕМУС

В случае с хамелеоном реакция на граничные условия, т. е. на измерение, является детерминистской: лист обуславливает зеленую окраску, сук — коричневую. Разве в отношении микрочастиц не может действовать элемент статистики? В этом случае Ваша позиция совпала бы с ортодоксальной точкой зрения.

ШИМОНИ

... Поскольку результат измерения объективно неопределенной величины не определяется квантовым состоянием, а квантовое состояние несет всю информацию о системе, результат строго зависит от объективного случая и не является случайным в смысле непредсказуемости его учеными.

⁶SQUID: Superconducting Quantum Interferometric Device (сверхпроводящий квантовый интерферометр). См. статью А. О. Caldeira, А. J. Legget, *Physica* 121A (1983) 587; Erratum *Physica* 130A (1985) 374.

⁷Очень хороший обзор на эту тему: S. Haroche, *Mesoscopic coherence in Cavity QED*, *Il Nuovo Cimento* 110B, N5-6 (1995) 545-556.

Наконец, вероятность каждого возможного результата измерения является объективной вероятностью⁸.

ГЕЙЗЕНБЕРГ

Я думаю, что индетерминизм, т. е. отсутствие значимости строгого основания, не только возможен, но и необходим⁹.

АКАДЕМУС

Если вместо того, чтобы говорить, что виртуальная реальность с определенной вероятностью становится реальной, Вы скажете, что система взаимодействует с граничными условиями, и определенный результат достигается с определенной вероятностью, то Вы будете очень близки к ортодоксальной интерпретации.

КАНДИДО

Но я ведь так не говорю. Напротив, я говорю, что можно доказать, что вся эта ситуация с объективной случайностью, вообще говоря, неверна. Именно синглетное состояние дает контрпример: если взаимодействие с прибором вводит статистический элемент, то не должно быть четкой корреляции между результатами измерения спинов в одном и том же направлении и в одно и то же время у двух частиц. Но мы видели, что наличие четкой корреляции подтверждено экспериментами, и это всегда и везде подчеркивается во всех изданиях, посвященных квантовой теории.

АКАДЕМУС

Не говорите ли Вы о том, что для объяснения экспериментальных данных относительно синглетных состояний *необходимо* допустить, что механизм взаимодействия между частицей и измерительным прибором является *детерминистским*?

КАНДИДО

Не вижу никаких иных способов объяснения этой строгой корреляции. Вспомните еще раз пример с хамелеоном: он *детерминистски* становится коричневым, находясь на суку, и зеленым, находясь на листе.

АКАДЕМУС

Но Поппер прав: квантовая теория не может являться *концом пути*. Если эксперименты заставляют нас признать существование детерминистской реальности, лежащей в основе поведения микроскопических частиц, то тогда целью науки должно быть проникновение в эту реальность, а не ограни-

⁸ A. Shimony, *The Reality of the Quantum World*, «Scientific American», January (1988) 36–43.

⁹ Письмо к Эйнштейну от 10-6-1927, цит. по A. Pais, *Subtle is the Lord*, Oxford (1982).

чивание статистическим описанием, таким как квантовая теория, которое неизбежно будет *неполным*.

КАНДИДО

К сожалению, либо мы найдем способ обойти это препятствие, созданное принципом неопределенности, либо, боюсь, мы должны будем согласиться с тем, что рай детерминизма закрыт для нашей науки. Я допускаю, что заявление о том, что, с одной стороны, единственным способом объяснить экспериментальные данные является признание существования детерминистского механизма и, с другой стороны, что понимание такого механизма предоставлено экспериментальной науке, несколько смахивает на танталовы муки. Но я не вижу иного выхода из этой ситуации.

АКАДЕМУС

Единственным выходом могла бы стать фальсификация принципа Гейзенберга.

КАНДИДО

Мы уже говорили об этом. Понятно, что такую возможность нельзя исключить, но я в это не верю и убежден, что хотя бы в этом Вы согласитесь со мной.

АКАДЕМУС

Другая возможность, предложенная Эйнштейном, — чисто спекулятивная.

КАНДИДО

Это мне кажется более перспективным, чем предыдущий вариант, но и в этом случае есть риск остаться на уровне мечты. Попытка примирить детерминистскую теорию с принципом неопределенности противопоставлена проблеме, уже возникавшей в связи с теориями скрытых параметров, — произвольности гипотетического детерминистского завершения квантовой теории.

АКАДЕМУС

Если то, о чем Вы говорите, — правда, общепринятое представление, согласно которому квантовая теория доказала существование в природе *изначального детерминизма*, было бы дискредитировано. И верным было бы как раз противоположное, т. е. то, что *теория доказывает существование изначального детерминизма, но в то же время объявляет его в принципе недоступным человеческому познанию*.

КАНДИДО

Сколь бы странным это не казалось, думаю, что Ваша фраза очень точно отражает ситуацию.

АКАДЕМУС

Но не окажется ли при более пристальном рассмотрении, что эти идеи противоречат другим основным законам физики? Например, локальности, причинности...? В конце концов, аналогия с хамелеоном всего лишь метафора. Что действительно необходимо — так это наличие *правдоподобной теории квантовых измерений*, которая бы вобрала в себя строгую и последовательную аргументацию качественных характеристик, описанных в метафоре с хамелеоном.

КАНДИДО

Такая теория существует, и я опишу ее в разд. IX.7.

АКАДЕМУС

Синглетное состояние является особым случаем закона сохранения спина. Поскольку для пары частиц, находящихся в синглетном состоянии, при каждом измерении спина обеих частиц в одно и то же время и в одном и том же направлении для одной получаем $+1$, а для второй -1 , или наоборот, мы можем с определенностью сказать, что если в момент времени t_0 мы измеряем спин в направлении a одной из двух частиц синглетной пары и находим $+1$, то в тот же момент времени t_0 спин в направлении a второй частицы равен -1 , даже в том случае, если измерение не проводилось. Это и есть применение по отношению к спину антифактического аргумента.

КАНДИДО

Если бы значение спина, полученное в результате измерения, являлось результатом взаимодействия с измерительным прибором и частично было бы случайным, то, вероятно, в небольшом, но заметном количестве случаев мы бы получали $+1$ или -1 для обеих синглетных частиц.

АКАДЕМУС

Напротив, экспериментальные данные кажутся неопровержимыми: закон сохранения спина имеет *точное* значение, а не *статистическое*.

КАНДИДО

Существование измерений первого типа также согласуется с этим: если, измерив спин частицы в направлении a и найдя значение $+1$, мы повторим измерение, то непременно получим $+1$, а вовсе не в большинстве случаев $+1$ и лишь иногда -1 , как это было бы в том случае, если бы измерение приносило элемент случайности в результат самого измерения. Это и есть проявление детерминизма подобно тому, как хамелеон всегда становится зеленым, находясь на листе.

АКАДЕМУС

Тем не менее все эти аргументы не исключают допущения ортодоксальной интерпретации, согласно которой спин *создавался* бы в результате процесса измерения.

КАНДИДО

Верно, но как мы только что видели, в случае частицы, находящейся в синглетном состоянии, это указывало бы на действие на расстоянии, или, по крайней мере, на мгновенную передачу информации, поскольку два прибора всегда смогли бы создавать пары спинов с противоположными знаками.

АКАДЕМУС

С другой стороны, если я использую синглетное состояние для измерения как S_a^1 , так и S_b^1 в одно и то же время t_o , это не означает, что в этот момент я подготовил частицу 1 таким образом, что и S_a^1 и S_b^1 имеют хорошо определяемые значения в один и тот же момент времени. Действительно, если я измерял S_a^1 и S_b^2 в момент t_o и, скажем, обнаружил, что $S_a^1 = +1$ и $S_b^2 = +1$, то я безусловно могу заключить, что $S_a^1 = +1$ в момент времени t_o^+ и $S_b^1 = -1$ в момент времени t_o^- . Но я не могу заключить, что $S_b^1 = -1$ в момент времени t_o^+ , поскольку измерение S_a^1 могло изменить значение S_b^1 .

КАНДИДО

Что Вы понимаете под символами t_o^- и t_o^+ ? В конце концов, измерение происходит в момент времени t_o , а такие моментальные измерения являются идеализацией, широко используемой в физике.

АКАДЕМУС

Спин является дискретной величиной, в нашем примере он лишь принимает значения $+1$ или -1 , так что если воздействия, вызванные измерением, вызывают изменение значения спина, то такое изменение может быть только дискретным, т. е. переходом от $+1$ к -1 , и наоборот.

Этот скачок может произойти или не произойти, поскольку нет определенности в том, что значение спина изменилось именно в результате измерения. Но такую возможность нужно учитывать и поэтому необходимо различать значения в момент времени t_o^- , т. е. *до* измерения, и значения в момент времени t_o^+ , т. е. *после* измерения.

КАНДИДО

Хорошо, но ничто не мешает нам утверждать, что значение S_a^1 может соответствовать $+1$ и до измерения, а это означает, что $S_a^1 = +1$ в момент времени t_o^- . Следовательно, я могу ограничить всю мою статистику t_o^- . Относительно этого момента все предыдущие формулы остаются в силе.

АКАДЕМУС

Если на самом деле без каких-либо противоречий можно допустить, что спины во всех направлениях имеют четкие значения даже тогда, когда никто за ними не наблюдает, то можно рассматривать имеющееся у нас радиоактивное вещество как черный ящик, содержащий множество синглетных пар. Каждую пару можно рассматривать как образец, который можно вынуть из ящика. С каждой парой можно произвести по два измерения, т. е. измерить независимо спиновый компонент обеих частиц в любом направлении.

КАНДИДО

Но тогда вместо того, чтобы рассматривать пары частиц, мы рассматриваем ящик, содержащий множество отдельных частиц. Мы упрощаем проблему без изменения ее сущности. Каждая частица связана с бесконечными переменными

S_a = спин в направлении a

при изменении a в пространстве во всех возможных направлениях, и для каждой частицы в одно и то же время можно измерить не более двух наблюдаемых.

АКАДЕМУС

Кроме того, можно предположить, что количество частиц определяется конечной величиной, скажем, M , и мы будем учитывать только конечное число переменных. Это можно сделать, ограничившись конечным числом направлений в пространстве, допустим, a_1, \dots, a_n , где n — произвольное натуральное целое число, но определенное раз и навсегда. Затем имеет смысл рассмотреть эмпирические частоты, полученные при измерениях M спинов в n направлениях a_1, \dots, a_n .

КАНДИДО

Относительная частота определена соотношением:

$$\frac{M(S_{a_1} = \epsilon_1, \dots, S_{a_n} = \epsilon_n)}{M} =: P_M(S_{a_1} = \epsilon_1, \dots, S_{a_n} = \epsilon_n), \quad (\text{IX.4.1})$$

где $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ может принимать значения ± 1 , а $M(S_{a_1} = \epsilon_1, \dots, S_{a_n} = \epsilon_n)$ обозначает количество частиц, для которых в одно и то же время спин в направлении a_1 имеет значение ϵ_1 (т. е. $S_{a_1} = \epsilon_1$), \dots , а спин в направлении a_n имеет значение ϵ_n (т. е. $S_{a_n} = \epsilon_n$).

АКАДЕМУС

Частоты

$$\frac{M(S_{a_1} = \epsilon_1, \dots, S_{a_n} = \epsilon_n)}{M} \quad (\text{IX.4.2})$$

не наблюдаются, если $n \geq 3$, т.е. если имеется более двух наблюдаемых. Но понимая реализм в том смысле, что наблюдаемые имеют значения даже тогда, когда их не наблюдают, и они *существуют* лишь в платоническом смысле, как нечто *имеющее место быть*, но о чем человеку не дано знать, то эмпирические частоты

$$P_M(S_{a_1} = \epsilon_1, \dots, S_{a_n} = \epsilon_n), \quad (\text{IX.4.3})$$

определяемые равенством (IX.4.1), имеют тот же тип существования и определяют некоторые связанные вероятности для спиновых переменных S_{a_i} .¹⁰

КАНДИДО

Предположим, что относительные частоты стабильны при значениях, близких p , т.е.

$$P_M(S_{a_1} = \epsilon_1, S_{a_2} = \epsilon_2) \sim p, \quad (\text{IX.4.4})$$

где символ \sim означает *почти равны*, и это выражение имеет эмпирическое значение, а не *формально-логическое*.

АКАДЕМУС

... *Почти равны* ... , *приблизительно*, ... Разве наука не должна иметь дело с точными и твердыми формулировками ... ?

КАНДИДО

Но только не тогда, когда речь идет о вероятности. В этом случае жесткая альтернатива *правильный*–*неправильный* растворяется в бесконечном количестве оттенков.

АКАДЕМУС

Но даже если мы примем все эти ограничения, каково значение этого таинственного числа p , появившегося в (IX.4.4), и чье существование кажется очень уж *платоническим* в том смысле, который Вы придавали этому слову несколько минут тому назад?

КАНДИДО

Ваш вопрос затрагивает множество нюансов. Начнем с рассмотрения двух утверждений.

(I) Часть p испускаемых частиц имеет следующее свойство:

$$S_{a_1} = +; \quad S_{a_2} = -. \quad (\text{IX.4.5})$$

(II) В результате многочисленных измерений спина в двух направлениях a_1, a_2 установлено, что часть p испускаемых частиц имеет свойство (IX.4.5).

¹⁰На вероятностном языке это можно выразить следующим образом: связанные вероятности (IX.4.3) *совместимы*.

Которая из этих двух частей, по Вашему мнению, предусмотрена квантовой механикой? Первая или вторая?

АКАДЕМУС

Ясно, что вторая. Утверждение (I) чисто платоническое, а появившееся в нем число p нельзя проверить экспериментально.

КАНДИДО

Но если Вы с этим согласны, Вы должны исключить сравнение с черным ящиком, т. е. с пассивной проверкой чего-то уже существующего. В выражении (II.) результат измерения также зависит от взаимодействия с прибором. Другими словами, нельзя исключить, что полученная в результате измерения величина спина может являться результатом взаимодействия с измерительным прибором, *что не могло произойти случайно*. Это исключило бы сравнение с черным ящиком или, что то же самое, доказало бы, что в эксперименте ЭПР, также как и в эксперименте с двумя отверстиями, *черные ящики — разные*.

АКАДЕМУС

Я никак не могу понять, чем Ваши рассуждения отличаются от старой ортодоксальной интерпретации, согласно которой процесс измерения *создает* наблюдаемую величину.

КАНДИДО

Они отличаются тем, что согласно ортодоксальной интерпретации наблюдаемое *не может иметь какое-либо значение до измерения*. Напротив, согласно интерпретации квантовой вероятности, наблюдаемое может иметь некие значения, но результат моего измерения может зависеть от взаимодействия с измерительным прибором.

АКАДЕМУС

Все же мне не вполне понятно. Пожалуйста, объясните яснее. Если взаимодействие происходит не случайно, а детерминировано, как это должно происходить в случае эксперимента ЭПР, то доводы д'Эспанья не вносят существенных изменений. Было бы достаточно поменять формулировки такого анализа, повсюду заменив выражение:

(A1) *в момент времени t_0 спин частицы в направлении a положительный +* выражением:

(A2) *в момент времени t_0 полученный спин частицы в направлении a , если бы он был измерен, был бы положительным +.*

Поскольку второе выражение также относилось бы к объективному свойству, допущение д'Эспанья *локального реализма* осталось бы неизменным.

КАНДИДО

Вот здесь Вы ошибаетесь. Переход от формулировки (A1), чисто экзистенциалистской и платонической, к формулировке (A2), которая относится к результатам конкретных и реальных измерений, делает по крайней мере один этап рассуждений д'Эспанья ничем неоправданным.

АКАДЕМУС

Какой именно?

КАНДИДО

Этап, на котором он вводит величины $N(A^+B^-C^+)$, относящиеся к *последовательностям трех измерений*.

АКАДЕМУС

Но д'Эспанья не говорит о том, что эти величины можно измерить. Он лишь говорит, что спины отдельных частиц во всех трех направлениях *существуют одновременно* (реализм), следовательно, эти величины также *существуют*.

КАНДИДО

Я также согласен с их существованием, которое следует из допущения реализма. Но д'Эспанья не согласен с этим. Он принимает без доказательств, что эти величины удовлетворяют двум соотношениям:

$$N(A^+B^+C^+) + N(A^+B^-C^+) = N(A^+C^+) = n(A^-C^+). \quad (\text{IX.4.6})$$

АКАДЕМУС

Но эти уравнения непосредственно вытекают из допущения реализма.

КАНДИДО

Но не в том случае, если величина $n(A^-C^+)$, появившаяся в (IX.4.2), получена экспериментальным путем. Вы только что сказали, что интерпретация этой величины должна иметь смысл в выражении (A2). Но такая интерпретация не имела бы никакого смысла для величин типа $N(A^+B^+C^+)$.

АКАДЕМУС

Я понимаю, о чем Вы говорите. Действительно, в то время как д'Эспанья пытается придать смысл измерению пары A, B для одной и той же частицы, только не непосредственно, а с помощью свойств синглетного состояния, нельзя приписать не прямое значение измерению последовательности A, B, C .

КАНДИДО

Вы понимаете, в чем состоит слабость аргументации д'Эспанья: в то время как уравнение

$$N(A^+B^+C^+) + N(A^+B^-C^+) = N(A^+C^+) \quad (\text{IX.4.7})$$

следует из принципа реализма, а уравнение

$$N_{obs}(A^+C^+) = n(A^-C^+) \quad (\text{IX.4.8})$$

вытекает из экспериментальных данных и условия синглетности, он не отличается $N(A^+C^+)$ (платоническое) от $N_{obs}(A^+C^+)$ (наблюдаемого) и неявно вводит постулат:

$$N(A^+B^+) = N_{obs}(A^+B^+). \quad (\text{IX.4.9})$$

Именно этот постулат, а не локальность, опровергается экспериментами.

АКАДЕМУС

Я, кажется, припоминаю некоторые подобные рассуждения в отношении эксперимента с двумя отверстиями.

КАНДИДО

В том случае (см. разд. VI.3) Вы ввели *платонические условные вероятности* в противовес вероятностям, *которые можно проверить экспериментально*. Первые тавтологически удовлетворяют теореме составных вероятностей, но не сопоставимы с какими-либо экспериментальными данными. Последние — получены на основании экспериментальных данных, но не удовлетворяют теореме составных вероятностей. То же самое происходит и с рассуждениями д'Эспанья: соотношение, которое он вывел, т. е. неравенство (IX.1.7) в разд. IX.1, тавтологически существует для величин, которые не наблюдают, но не существует для величин, которые можно сравнить с экспериментальными данными. Ошибка д'Эспанья лежит в допущении того, что эти два типа величин одинаковы.

АКАДЕМУС

Все это кажется мне несколько абстрактным. Почему Вы не объясняете, что это означает в случае с двумя хамелеонами?

КАНДИДО

Все очень просто: в этом случае ошибка состоит в том, что хамелеону приписывают окраску его близнеца, например, зеленую, а также в том, что не учитывают тот факт, что *если бы я с первым хамелеоном провел такой же эксперимент, что и с его близнецом, то я обнаружил бы зеленую окраску*.

АКАДЕМУС

Можете играть словами столько, сколько захотите. По-моему, Ваша позиция равнозначна отказу от реализма!

КАНДИДО

С каких это пор *реализм черного ящика* должен быть *менее реалистичным*, чем *реализм хамелеонов*?

АКАДЕМУС

Вы, конечно же, не сможете с помощью хамелеонов нарушить неравенство Белла.

КАНДИДО

Почему? Просто помимо окраски мне необходимы еще два *адаптивных признака*. Поэтому мне нужен несколько идеализированный хамелеон, т. е. животное, которое не существует на самом деле, а вовсе не то, которое в принципе *не может существовать*, поскольку необходимые мне свойства не противоречат основным законам биологии или физики.

АКАДЕМУС

Приведите пример.

КАНДИДО

Давайте в качестве примера представим себе хамелеона, который, если его поместить на металлическую пластинку, будет иметь гладкую кожу, а если его пометить на кусочек стекла, будет иметь шероховатую кожу. Если его поместить на гранит, его хвост будет длинным и заостренным, в то время как на туфе его хвост будет становиться коротким и закругленным. Каждое из этих свойств, подобно изменению окраски, возникает вполне определенным и исключительным способом.

АКАДЕМУС

Я заметил, что Вы приводите такие примеры, когда эксперименты *нельзя проводить одновременно* с одним и тем же животным: альтернатива *сук или лист* не совместима с альтернативой *железная пластинка и кусочек стекла* или альтернативой *гранит или туф*.

КАНДИДО

Хорошее замечание. Начав с этих трех взаимоисключающих ситуаций, не трудно составить статистику свойств, удовлетворяющих неравенству Белла.

АКАДЕМУС

Но даже Вы допускаете, что хамелеона, обладающего нужными Вам свойствами, в природе не существует. В то же время эксперимент Белла вполне осуществим.

КАНДИДО

Такого хамелеона действительно не существует, но сама возможность его существования не противоречит ни одному закону природы. Более того, теперь, когда ясно, в каком направлении надо действовать, нетрудно привести

пример, который вполне осуществим, а не просто не *невозможен*, т. е. не противоречит логике или законам природы.

Как бы то ни было, этот пример показывает, что утверждение о том, что неравенство Белла типично для квантовых явлений, беспочвенно. Наконец, и на мой взгляд это самое важное, альтернатива *черный ящик-хамелеон* указывает на основные различия между идеей об измерении, типичной для классической физики, и идеей, характерной для квантовой физики. Другой подобный пример приведен в работе Д. Аэртса¹¹.

IX.5. Интуитивность квантовой теории

АКАДЕМУС

Неравенство Белла — это теорема. Вы не можете противостоять теореме болтовней о качественных признаках хамелеонов. Если Вы хотите, чтобы к Вам относились серьезно, Вы должны придумать другую теорему, касающуюся реализма и локальности для конкретной физической системы и в то же время воспроизводящую корреляции синглетного состояния.

Теорема Белла утверждает, что это невозможно.

КАНДИДО

Я не только опишу Вам такой пример, но и сделаю это с помощью таких макроскопических объектов, как хамелеоны.

Затем в разд. IX.7 я покажу Вам общую динамику, которая, независимо от метафоры с хамелеоном, позволит Вам привести столько примеров, сколько Вы пожелаете, и которые, к тому же, объединяют современные исследования квантовой теории измерений. С этой точки зрения интерпретация квантовой вероятности не противоречит современной физике, а напротив, она объединяет в рамках одной концепции то, что множество современных школ по теории квантовых измерений осуществляют эмпирически во многих феноменологических моделях.

АКАДЕМУС

Посмотрим.

КАНДИДО

В ящике находится N пар хамелеонов. Назовем T последовательность, элементы которой обозначают наблюдаемые с двумя значениями, скажем, $+1$ и -1 . Если x — элемент T , то соответствующее наблюдаемое, обозначенное S_x , будет называться *спином в направлении x* .

¹¹ *Du quantique au classique: étude des probabilités conditionnelles d'un modèle concret de processus de mesure*, Preprint (1995).

В произвольно взятые моменты времени (или детерминистски предопределенные — это на самом деле неважно) пара вынимается из ящика, каждый хамелеон из этой пары помещается в отдельный ящик, и оба ящика отправляются экспериментаторам, которые находятся на очень большом расстоянии друг от друга.

Каждый экспериментатор может произвольно выбирать (например, вытаскивать произвольное x последовательности T) любое наблюдаемое S_x и спрашивать хамелеона, какое, по его мнению, значение принимает S_x : $+1$ или -1 . Он также может принять решение ни о чем не спрашивать.

Интересно, какова статистика ответов хамелеонов.

АКАДЕМУС

Это нормальные хамелеоны или *нелокальные* хамелеоны, которые могут сразу же контактировать, возможно, посредством телепатии?

КАНДИДО

Это совершенно нормальные животные. Они не только не могут моментально контактировать друг с другом, но и их реакция носит *чисто локальный* характер: каждый хамелеон отвечает только на тот вопрос, который ему задает экспериментатор, находящийся рядом с ним. Они не знают, какой вопрос задают другому животному и даже не знают, *будут* ли тому вообще задавать вопросы.

АКАДЕМУС

Выполняется ли условие реализма? Правда ли, что в любой момент времени каждое наблюдаемое S_x имеет хорошо определяемые значения для обоих хамелеонов?

КАНДИДО

Правда: значения могут изменяться со временем (скачкообразно, поскольку наблюдаемые дискретны), но предполагается, что время, в течение которого происходит это изменение, настолько мало, что можно говорить о том, что в любой момент времени t , величина какого-либо наблюдаемого S_x хорошо определена (вспомним обозначения $t+$ и $t-$, введенные в предыдущем разделе, где речь шла о спине).

АКАДЕМУС

Когда Вы говорите о *статистике ответов*, то ссылаетесь на *корреляции* между значениями $+1$ и -1 различных наблюдаемых S_x и S_y ?

КАНДИДО

Да, именно так, как и в случае обсуждения ЭПР.

АКАДЕМУС

Тогда, согласно теории Белла, при Ваших допущениях реализма и локаль-

ности корреляции этих наблюдаемых не могут совпадать с корреляциями синглетного состояния.

КАНДИДО

Прежде чем делать свои выводы, дождитесь конца обсуждения.

До эксперимента N пар хамелеонов встречаются и обсуждают, как распределить значения $+1$ и -1 между парами и наблюдаемыми. Хамелеоны каждой пары можно различать, и мы их обозначим I и II (например, нормальный и мутантный). Пусть для них будут верны следующие критерии:

(i) **Сбалансированное распределение:** для каждого наблюдаемого количество значений $+1$ в N парах равно количеству значений -1 .

(ii) **Предопределенные корреляции:** для каждой пары наблюдаемых S_x и S_y корреляции между значениями S_x первого члена пары и S_y второго равны заранее определенной величине κ_{xy} .

(iii) **Инвариантность при вращении:** для каждой пары наблюдаемых S_x, S_y количество пар, для которых $S_x = +1$ в первом члене и $S_y = +1$ во втором равно количеству пар, для которых $S_x = -1$ в первом и $S_y = -1$ во втором члене. То же самое происходит и с $S_x = +1$ (соответственно -1) в первом члене и $S_y = -1$ (соответственно $+1$) во втором.

АКАДЕМУС

Условия (i), (ii) и (iii) автоматически выполняются в синглетном состоянии. С другой стороны, синглетное состояние однозначно определяет корреляции κ_{xy} .

Неортодоксальный хамелеон непременно бы возразил, что соглашение, подобное тому, о котором Вы говорили, невозможно, если величины κ_{xy} выбраны равными соответствующим синглетным корреляциям относительно направлений в пространстве x и y .

КАНДИДО

Математический хамелеон прежде чем ответить, сделал бы кое-какие вычисления. Давайте рассмотрим следующий пример. Для каждой пары обозначений x, y , а также для каждой из N пар хамелеонов мы утверждаем, что конфигурация $(+, +)$ была получена в том случае, если $S_x = +1$ для хамелеона I данной пары и $S_y = +1$ для хамелеона II . То же самое и для других возможных конфигураций: $(-, -)$, $(-, +)$, $(+, -)$.

Тогда

$$N_{xy}^{++} = \text{количество конфигураций } (+, +) \text{ в } N \text{ парах}; \quad (\text{IX.5.1a})$$

$$N_{xy}^{--} = \text{количество конфигураций } (-, -) \text{ в } N \text{ парах}; \quad (\text{IX.5.1b})$$

$$N_{xy}^{+-} = \text{количество конфигураций } (+, -) \text{ в } N \text{ парах}; \quad (\text{IX.5.1c})$$

$$N_{xy}^{-+} = \text{количество конфигураций } (-, +) \text{ в } N \text{ парах}. \quad (\text{IX.5.1d})$$

АКАДЕМУС

Задача состоит в том, чтобы выбрать эти величины таким образом, чтобы выполнялись три условия: (i), (ii), (iii). С другой стороны, корреляции κ_{xy} а priori приписаны условию (ii). Кто может убедить Вас в том, что для выбора каждой величины можно определить некие N_{xy}^{++} , N_{xy}^{+-} , ... таким образом, чтобы выполнялись перечисленные Вами условия?

КАНДИДО

Очевидно, что я не могу сказать это а priori, но можно сказать следующее: прежде всего, условие *инвариантности при вращении* можно выразить уравнениями:

$$N_{xy}^{++} = N_{xy}^{--}; \quad N_{xy}^{+-} = N_{xy}^{-+}. \quad (\text{IX.5.2})$$

Давайте определим величины N_x^+ , N_x^- с помощью уравнений

$$N_{xy}^{++} + N_{xy}^{+-} = N_x^+; \quad N_{xy}^{--} + N_{xy}^{-+} = N_x^-. \quad (\text{IX.5.3})$$

АКАДЕМУС

Минуточку: если Вы пишете N_x^+ , N_x^- , то Вы однозначно утверждаете, что эти величины *не зависят от y*. Таким образом, в уравнениях (IX.5.3) левая часть зависит от y , а правая часть — не зависит. Разве это возможно?

КАНДИДО

Это следствие допущений *реализма* и *локальности*. Если Вы задумаетесь о значении этих величин, то станет ясно: вспомните, что N_{xy}^{++} — это число пар хамелеонов, первый из которых *на вопрос, каково значение S_x* , ответит $+1$, а второй *на вопрос, каково значение S_y* , ответит -1 . Поскольку для каждого S_y ответ может быть только $+1$ или -1 и они взаимоисключающие (реализм), из этого следует, что $N_{xy}^{++} + N_{xy}^{+-}$ представляет количество пар, в которых хамелеон I *на вопрос, каково значение S_x* , ответит $+1$. По условию локальности это количество не может зависеть от y , поскольку хамелеон I реагирует только на вопрос, заданный ему независимо от того, что происходит с хамелеоном II . Поэтому вполне естественно обозначить это количество через N_x^+ . Наконец, обратите внимание на то, что выражение: *на вопрос, каково значение S_x* , должно означать, что первый заданный ему вопрос касается S_x . Сразу же после первого вопроса хамелеон вправе произвольно изменять все значения других наблюдаемых S_y

(на $x \neq y$). Например, если он хотел имитировать распределение, полученное при измерении квантового наблюдаемого несовместимыми с ним, он мог подбросить монетку в каждом направлении $y \neq x$ и изменить значение S_y в соответствии с результатом подбрасывания. Но гораздо важнее то, что *если его не спрашивают о значении S_x* , хамелеон сам по себе не сделает так, чтобы это наблюдаемое принимало то же значение, которое он бы дал в том случае, если бы его об этом спрашивали. Например, хамелеон, имеющий зеленую окраску на листе, находясь в ящике, может быть коричневым.

АКАДЕМУС

Как бы то ни было, допущение реализма требует также, чтобы

$$N_x^+ + N_x^- = N, \quad (\text{IX.5.4})$$

поскольку общее число пар равно N , а значения $+1$ и -1 взаимоисключающие.

КАНДИДО

Если Вы добавите к этому условие сбалансированного распределения, т. е. (i), то получите:

$$N_x^+ = N_x^- = N/2. \quad (\text{IX.5.5})$$

АКАДЕМУС

Мы должны включить самое строгое из заранее заданных условий.

КАНДИДО

Оно мне не кажется самым строгим: корреляция получена при вычитании количества несогласований (т. е. $N_{xy}^{+-} + N_{xy}^{-+}$) из количества согласований (т. е. $N_{xy}^{++} + N_{xy}^{--}$) и делении на общее количество (т. е. на N). Учитывая условие (IX.5.3) (инвариантность при вращении), мы получаем:

$$\kappa_{xy} = \frac{2N_{xy}^{++} - 2N_{xy}^{+-}}{N}. \quad (\text{IX.5.6})$$

АКАДЕМУС

Поэтому N пар хамелеонов для каждой пары направлений x, y , распределяют между собой значения $+1$ и -1 таким образом, чтобы удовлетворять уравнениям (IX.5.2), (IX.5.4), (IX.5.5), (IX.5.6).

КАНДИДО

Несложно проверить, что *независимо от выбора κ_{xy} величины*, варьирующие от -1 до $+1$ (это важно для того, чтобы они могли представлять

корреляции, наблюдаемые со значениями ± 1), задача может иметь лишь одно решение, записанное в виде:¹²

$$N_{xy}^{++} = \frac{N}{4}(1 + \kappa_{xy}); \quad N_{xy}^{+-} = \frac{N}{4}(1 - \kappa_{xy}). \quad (\text{IX.5.7})$$

Это особенно важно для корреляций синглетного состояния.

АКАДЕМУС

Я озадачен: Ваши рассуждения кажутся правильными, но и рассуждения Белла тоже верны. Как они могут привести к таким противоречивым выводам?

КАНДИДО

Здесь вступают в игру различия между интуицией, относящейся к *реализму черного ящика*, и интуицией, относящейся к *реализму хамелеонов*. Реализм Эйнштейна, Подольского, Розена и Белла — это реализм черного ящика. В этом случае *выбор всегда делается a priori*: хамелеоны распределяют все $+1$ и -1 значения *заранее*, и они остаются неизменными *независимо от локальных вопросов*.

АКАДЕМУС

Что Вы понимаете под *локальным вопросом*?

КАНДИДО

Вопрос, заданный каждому хамелеону экспериментатором, находящимся рядом с ним. Этот вопрос символизирует процесс измерения, который является локальным.

В теореме, которую мы только что сформулировали, все иначе: каждый хамелеон решил a priori, что он ответит, если первый заданный ему вопрос будет следующим: *каково значение S_x ?*

¹²В разд. VIII.4, поскольку синглетное состояние инвариантно по отношению к вращениям, мы имеем:

$$p_{++}(a, b) = p_{--}(a, b) =: p(a, b); \quad p_{+-}(a, b) = p_{-+}(a, b) =: q(a, b).$$

Поэтому, задав

$$\kappa_{ab} := E(S_a \cdot S_b),$$

уравнения

$$\kappa_{ab} = 2p(a, b) - 2q(a, b); \quad 1 = 2[p(a, b) + q(a, b)]$$

позволяют однозначно определить как $q(a, b)$, так и $p(a, b)$ как функцию κ_{ab} . Действительно,

$$\begin{aligned} \kappa_{ab} + 2q(a, b) = 2p(a, b) \quad 1 = \kappa_{ab} + 4q(a, b) \quad q(a, b) &= \frac{1 - \kappa_{ab}}{4} p(a, b) = \\ &= \frac{1}{2} [\kappa_{a,b} + 2q(a, b)] = \frac{1}{2} \left[\kappa_{ab} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \kappa_{ab} \right] = \frac{1 + \kappa_{ab}}{4}. \end{aligned}$$

Помните, что вопросы несовместимы: нельзя *одновременно спрашивать одного и того же хамелеона*, каково значение S_x и каково значение S_y .

АКАДЕМУС

Не вижу разницы: в первом случае я могу составить список всех значений, которые решили принять N хамелеонов типа I . Во втором случае я сделаю список всех ответов, которые они решили дать. В обоих случаях список даст мне *сопряженные относительные частоты*, а их существование по теореме Белла не совместимо с синглетной корреляцией.

КАНДИДО

Существует разница и довольно значительная: в случае реализма с черными ящичками Вы можете использовать антифактический аргумент, а в случае реализма с хамелеонами — нет.

Вспомним пример с хамелеонами-близнецами: из того факта, что каждый раз, когда Вы определяете, что окраска животного, находящегося на листе, — зеленая, Вы не можете заключить, что раз окраска этого животного зеленая, то и другое животное — зеленое. Речь идет лишь о том, *как хамелеон будет реагировать на отдельные вопросы, а не о том, каково будет его состояние в отсутствие вопросов*.

Процедуры *определения окраски на листе* и *определения окраски на суку* являются взаимоисключающими, точно так же как и измерение спина в двух различных направлениях. В этом случае наблюдаемое — это не просто окраска (так же как и не просто спин), а окраска на листе и окраска на суку должны рассматриваться как различные наблюдаемые, подобно спину в двух различных направлениях.

АКАДЕМУС

Я начинаю понимать: если я не могу прибегнуть к антифактическому аргументу, то я не могу говорить и о связанных частотах, даже на платоническом уровне. С физической точки зрения это означает, что соглашение затрагивает только одного хамелеона в отношении того, *как он будет реагировать, если первый заданный ему вопрос будет о S_x* , в то же время он предоставляет ему полную свободу в отношении других значений. Поэтому знание того, что *на вопрос, заданный в момент времени t о значении S_y* , я непременно бы получил ответ $+1$, не дает мне право заключить, что значение S_y равно $+1$, если в момент времени t я измерял S_x . Скрытое допущение в рассуждениях Белла и его последователей состоит в том, что хамелеоны ведут себя подобно шарам в черном ящике, т. е. заранее решают, какие будут принимать значения *независимо от вопроса*. Результат Белла исключает именно такой аргумент, а не тот, что Вы описали.

КАНДИДО

Ошибка Белла, д'Эспанья, Шимони и многих других состояла в том, что они смешивали статистические данные событий, имевших место в момент времени $t+$ (после измерения), со статистическими данными событий, происходивших в момент времени $t-$ (до измерения), и выводили на их основании существование сопряженных распределений, на которые накладывались некоторые ограничения, которые, как было доказано позже, являлись несовместимыми.

АКАДЕМУС

Я не совсем понял последнее замечание.

КАНДИДО

Если Вы будете рассматривать договор, заключенный хамелеонами, то Вы заметите, что они договорились об ответе, если первый заданный им вопрос будет: «Каково значение S_x ?». Теперь, вопреки тому, что говорит ортодоксальная интерпретация, нельзя исключить вероятность того, что сопряженное событие:

значение S_x равно $+1$ и значение S_y равно $+1$

имеет платоническое значение. Но сопряженное событие:

Первый заданный вопрос был «Каково значение S_x ?» и первый заданный вопрос был «Каково значение S_y ?»

не имеет значения, поскольку оба вопроса взаимоисключающие.

АКАДЕМУС

Я все еще не удовлетворен. Давайте вернемся к возражению, которое я сделал в ответ на Вашу критику аргумента д'Эспанья в разд. IX.3. Я могу рассматривать число

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

хамелеонов, которые решили отвечать $+$ на вопрос о значении A ; $-$ на вопрос о значении B ; снова отвечать $+$ на вопрос о значении C и всех других чисел, полученных при всевозможных изменениях в обозначении $N(A^+, B^-, C^+)$ знаков $+$ и $-$. Я допускаю, что это числа Платона, недоступные для экспериментов, но такие числа должны существовать в природе из-за допущения реализма. Кроме того, очевидно, что такие числа должны быть совместимы с числами, полученными эмпирически, в том смысле, что

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

и, следовательно, можно применить аргумент д'Эспанья, который и приведет к уравнению Белла.

Поэтому я делаю вывод, что Ваш аргумент нужно интерпретировать в смысле, противоположном тому, в котором Вы бы хотели его интерпретировать: хамелеоны *не могут сделать аргумент таким, каким Вы описали*, и препятствием к этому являются уравнения, похожие на уравнения для эксперимента с двумя отверстиями или уравнения Белла.

КАНДИДО

Я попробую сформулировать этот аргумент более четко таким образом, чтобы подчеркнуть различие между *статистикой черного ящика* и *статистикой хамелеонов*. Для этого необходимо ввести *динамику*, т. е. закон, который управляет изменением во времени различных физических свойств хамелеонов.

АКАДЕМУС

Это означает, что договор хамелеонов распространяется не непосредственно на ответ, который они дадут на определенный экспериментальный вопрос (например, возможна ли зеленая окраска, когда животное находится на листе), а на закон эволюции, который приведет их к такому ответу?

КАНДИДО

Именно. Задать экспериментальный вопрос означает локально обеспечить измерение определенного наблюдаемого с помощью измерительного прибора. В нашем примере у нас три наблюдаемых: A , B , C (скажем, окраска животного, находящегося на листе, окраска животного, находящегося на суку, и шероховатость кожи). Измерительный прибор локально взаимодействует с хамелеоном, изменяющим свою эволюцию. *Локально* — означает, что на эволюцию хамелеона влияет только измерительный прибор, находящийся рядом, а не прибор, находящийся вблизи другого хамелеона. Давайте назовем T_A динамическую эволюцию хамелеона, который сталкивается с прибором, подготовленным для измерения наблюдаемого A . Аналогичным образом обозначим T_B , T_C .

АКАДЕМУС

Говоря *эволюция*, Вы имеете в виду *детерминистскую эволюцию*?

КАНДИДО

Конечно. Мы уже доказали это в разд. IX.4: если бы эволюция не была детерминистской, не было бы точной антикорреляции. Индетерминизм в эксперименте ЭПР находится лишь в начальных условиях: мы можем предположить, что два хамелеона в каждой паре изображают *голова или хвосты*

для того, чтобы решить, который из них должен идти направо, а который — налево.

АКАДЕМУС

Но в таком случае Вы соглашаетесь с существованием изначального индетерминизма в природе.

КАНДИДО

Я сказал, что *мы можем представить* этот процесс. Но мы также можем представить и процесс чисто детерминистского выбора, но не известный нам (и недоступный для принципа неопределенности). Именно для того, чтобы закрепить эти идеи (даже если это совсем и не обязательно), давайте предположим, что договор воспроизводит точную антикорреляцию синглетного состояния. Иными словами: каждое наблюдаемое имеет только два значения, начальные состояния двух хамелеонов таковы, что

(i) каждое наблюдаемое A , B , C принимает противоположные значения для обоих хамелеонов, образующих пару;

(ii) локальная динамика такова, что это условие не меняется.

Условие (ii) называется *законом сохранения*, и как классическая, так и квантовая теории изобилуют примерами таких законов.

АКАДЕМУС

Но если динамика однозначно определяет значение наблюдаемых (являющихся детерминистскими), то соглашаться с динамикой — это то же самое, что соглашаться с тем, что одиночный хамелеон ответит, когда его спросят, каково значение наблюдаемого A или B или C .

Таким образом, Вы опять можете определить, как и в аргументе д'Эспанья, величины $N(A^+, B^-, C^+)$, ... и поэтому Вы снова попадаете в ограничения, заданные неравенством Белла.

КАНДИДО

Не верно. Предположим, что хамелеон I взаимодействует с прибором, подготовленным для измерения A , а хамелеон II — с прибором, подготовленным для измерения B . Тогда первый будет эволюционировать в соответствии с динамикой T_A , а второй — в соответствии с динамикой T_B . Для обоих хамелеонов такие динамические законы будут влиять не только на значения наблюдаемых A и B , но и на значения всех других наблюдаемых, особенно C . Следовательно, платонические величины $N(A^+, B^-, C^+)$, ..., о которых говорили Вы, д'Эспанья, Белл, ..., *будут зависеть и от A , и от B .*

Такая зависимость не позволяет применять аргументы Белла и д'Эспанья.

АКАДЕМУС

Объясните это более понятно.

КАНДИДО

Вам может помочь вероятностная интерпретация. Если Вы помните, в разд. VI.1 мы видели, что *скрытое* (и негарантированное) *допущение* отцов-основателей квантовой теории заключалось в том, что *существование скрытых параметров привело к появлению одной вероятностной модели*, соответствующей статистическим данным, которые получены в различных экспериментах и являются несовместимыми.

Переведя на язык события, вычисление этого *скрытого допущения* эквивалентно постулату (подразумеваемому в рассуждениях д'Эспанья и в Ваших) о том, что платонические числа $N(A^+, B^-, C^+)$, ..., *не зависят от пары измерений, которые будут произведены с системой.*

АКАДЕМУС

Но эта независимость — допущение *локальности*: хамелеон I не может знать, что происходит с хамелеоном II , и наоборот. Именно поэтому многие авторы настаивали на том, что квантовая теория несовместима с локальностью.

КАНДИДО

Простите, в моей аргументации динамика хамелеонов *абсолютно локальна*, хотя она и ведет к зависимости чисел $N(A^+, B^-, C^+)$, ..., от измерений, которые будут осуществлены. Это должно убедить Вас в том, что это предполагает независимость от чисел $N(A^+, B^-, C^+)$... измерений, и вовсе не есть выражение физической локальности, а лишь аргумент, который не учитывает новые характеристики, появляющиеся, когда мы переходим от статистики черного ящика к статистике хамелеонов¹³.

АКАДЕМУС

Тогда образ хамелеона может помочь восстановить большинство из того, о чем часто говорил Бор.

КАНДИДО

Конечно: если Вы перечитаете все, что говорили отцы-основатели теории

¹³Это один из тех многочисленных случаев, когда формула предпочтительней слов. Если через σ обозначить синглетное состояние (начальные приготовления), T_A (соответственно T_B) детерминистскую динамику, которую измерительный прибор I индуцирует у частицы 1 (соответственно, измерительный прибор II индуцирует у частицы 2), то в момент измерения (считается, что оно происходит одновременно для обеих частиц) состояние будет $\sigma_{AB} = (T_A \otimes T_B)\sigma$. Локальность выражается через разложение динамики. Состояние σ_{AB} , напротив, нельзя разложить, потому что σ (синглетное состояние) не разлагается. В приложении IX.7 дано детальное описание этой формулировки локальности.

в первых трех главах, то увидите, что их можно интерпретировать в свете реализма хамелеонов, который вполне приемлем с точки зрения здравого смысла. Пример с хамелеонами также подтверждает (*mutatis mutandis*) слова Шимони.

ШИМОНИ

Каким-то образом второму фотону пары известно, проходить ли ему через поляризованную пленку для того, чтобы выразить согласие с прохождением или не прохождением первого фотона, несмотря на то, что оба фотона достаточно удалены и не имеют механизма для оповещения друг друга о своем поведении¹⁴.

КАНДИДО

Хамелеоны, как и фотоны, *знают об этом*, поскольку они *предварительно* решили, как они будут (детерминистски) реагировать, если *им будет задан определенный вопрос*. Однако процесс их ответа совершенно локализован, и поэтому следующий вывод Шимони не верен.

ШИМОНИ

В ситуации такого рода квантовая механика тогда оспаривает релятивистскую концепцию локальности, которая придерживается того мнения, что событие не может иметь эффектов, распространяющихся быстрее света (и, особенно, мгновенных эффектов на расстоянии)¹⁵.

КАНДИДО

Совпадение ответов на самом деле является результатом не таинственных сверхсветовых посланий, а лишь *предварительных детерминистских договоренностей* типа ... *если ... , то ...* и это очень хорошо согласуется с локальностью.

АКАДЕМУС

Таким образом, новая интерпретация квантовой теории не полностью отказывается от стандартной интерпретации, а лишь модифицирует ее физическую интерпретацию состояний суперпозиции.

КАНДИДО

Кроме того, не отвергается идея Бора о том, что процесс измерения может повлиять на то, что измеряется, внося свой вклад в его определение, но эта *активная роль* понимается в обычном смысле физических взаимодействий, так же как и для хамелеона, и утрачивает таинственную и волшебную ауру, возникающую при переходе от виртуального (возможность) к реальному (действие).

¹⁴A. Shimony, *The reality of the Quantum World*, «Scientific American», January (1988) 36–43.

¹⁵См. предыдущую ссылку.

АКАДЕМУС

Само собой разумеется, это вовсе не требует, чтобы мы отказались от того, что называется *здравым смыслом*, а только улучшили бы его.

IX.6. Выводы

АКАДЕМУС

Вы меня не убедили.

КАНДИДО

Я просто привел кое-какие доказательства и рассуждения. Что здесь не так?

АКАДЕМУС

Вы думаете, что можете убедить людей с помощью доказательств и рассуждений?

КАНДИДО

Я думал, что они, имея отношение к науке, могут иметь определенное влияние.

АКАДЕМУС

Почему Вы думаете, будто ученые настолько отличаются от остальных людей, что на них могут влиять такие абстрактные вещи, как *рассуждения, доказательства* . . . ?

КАНДИДО

Тот, кто посвятил себя науке, верит в разум, и поэтому, если *все* аргументы в пользу теории были признаны несостоятельными, эта теория должна быть отвергнута.

АКАДЕМУС

Вы имеете в виду теорию о том, что наблюдаемые, за которыми не наблюдают, не имеют значений? Или нелокальность? Или зацепленность? А может быть, объективные вероятности? Или объектификацию? Или макрореализм (или микронереализм, если это Вам больше нравится)?

КАНДИДО

Да.

АКАДЕМУС

Хорошо, все это останется. Мы будем продолжать учить этому молодых людей, говорить о них на конференциях, доставляя наслаждение тем, кто обожает все таинственное, вместо того, чтобы скромно искать луч света, описывать их и заставлять людей писать о них в прессе и книгах . . .

КАНДИДО

Вы не боитесь, что аргументы, благодаря которым этот карточный домик разваливается, сами станут настолько же разрекламированными, как этот карточный домик?

АКАДЕМУС

В этом нет никакого риска: большинство людей не интересуются самой проблемой и очень мало тех, кто может выразить независимое мнение. Что до остальных, то на каждого сторонника рационализма найдется сотня или тысяча ортодоксов, неоортодоксов или просто людей, которые не сочувствуя ни одной из сторон по ряду социально-психологических причин выступают против этой новой теории.

КАНДИДО

Даже если бы их было тысяча против одного, этого было бы недостаточно, чтобы превратить неверные рассуждения в правильные. То, что кажущиеся парадоксы происходят из утверждения, что наблюдаемые, за которыми не наблюдают, не имеют каких-либо значений (или подобные утверждения, например, Белла), теперь уже доказано. Также была доказана несостоятельность теории, согласно которой это утверждение было бы необходимым следствием экспериментальных данных. Поскольку пока еще никто, к счастью, не предложил подтверждать чью-либо правоту голосованием, то в том случае, если доказательство одного человека верно, сотни тысяч, выступающие против, вынуждены будут его признать.

АКАДЕМУС

Но не слушать. Поскольку нельзя подтвердить правильность рассуждений, мы отказались не только признавать это, но и слушать.

КАНДИДО

Это напоминает мне ситуацию, когда раньше отказывались смотреть в телескоп.

АКАДЕМУС

Сейчас уже все не так наивны. Легче освободиться от теории, претендующей на тщательное исследование этого вопроса, хотя оно и не было проведено: вместо аргументов достаточно распространить негативное мнение о ней.

КАНДИДО

Но люди не глупы. Они, без сомнения, могут сказать, где присутствуют детальные и четкие аргументы, попытка дойти до самой сути проблемы со всей концептуальной строгостью . . . , и наоборот, где за отсутствием аргументов используют авторитет, прикрываются жаргоном, отвлекая слушателя

логическими скачками или отклоняясь от темы в технологические дебри, не имеющие никакого концептуального значения, и взывающие скорее к корпоративному духу и психологии, нежели к чистому разуму.

АКАДЕМУС

Люди не глупы, но, во-первых, они осторожны, во-вторых, не могут бесконечно заниматься абстрактными вопросами. Если бы спор мог возникнуть в рамках рационализма под председательством человека, который мог бы придерживаться сути обсуждаемого вопроса и пресекать его разбиение на тысячи незначительных вопросов, то реальное число сторонников теории не имело бы значения. Но такой идеальной ситуации не существует. На самом деле все обстоит иначе. Окружающая среда воздействует на людей значительно сильнее, чем абстрактные аргументы. Поэтому, если мы добьемся контроля над окружающей средой, то сможем *сформировать вкус* таким образом, что некоторые предложения автоматически будут приниматься враждебно.

КАНДИДО

Я согласен с этим. Политики учат нас (и многие представители научного мира хорошо усваивают их уроки), что в отсутствие разумных аргументов, которые могли бы противостоять критике, лучше всего подтвердить теорию, на которую была направлена критика, сделав это таким многословным и непонятым образом, чтобы у большинства слушателей создалось впечатление, будто среди множества непонятных им вещей, возможно, и было что-то, что отвечало критике.

АКАДЕМУС

Именно так. Как я уже ранее говорил, рационалисты верят в разумные аргументы и по-видимому не понимают, что они составляют лишь небольшую часть средств человеческого общения.

КАНДИДО

Но именно с помощью этой *очень малой части* и происходит научное общение. Ясно, что научное общение — это часть науки. Например, научное открытие имеет свой извилистый и завуалированный путь, который можно сравнить с интуицией художника, а иногда и с мистическим мышлением. Однако различие между открытием и научным мышлением состоит в том, что, если открытие было сделано, оно должно распространяться только объективными и разумными способами, не зависящими от того, каким образом оно было сделано.

А разве отсутствие возможности опровергнуть какую-либо критику, с помощью которой, как я видел, был разрушен воздушный замок, построен-

ный вокруг квантовой теории, не заставляет Вас засомневаться, что настаивать на этом противоречит научным принципам? Напротив, интерпретация квантовой вероятности, хотя и глубока, поскольку требует радикального изменения всех наших знаний о вероятности и законах вероятности, легко распространяется даже среди людей, которые никогда не учили ни физики, ни математики. Достаточно того, что у них есть искренний интерес к современным концептуальным проблемам.

АКАДЕМУС

А Вы не боитесь, что это может уменьшить привлекательность теории? Ясность разума оставляет людей холодными, в то время как загадочность возбуждает воображение и любопытство.

КАНДИДО

Наше знание просто вычеркивает все тайны из законов природы. Каждый небольшой шаг в направлении выяснения их является психологическим зарядом, который позволяет сконцентрировать энергию на следующем этапе, а не распылять ее в тупиках. Именно потому, что в окружающем нас мире очень много *настоящих загадок*, нельзя мнимым тайнам позволять вводить нас в заблуждение.

АКАДЕМУС

То, о чем Вы говорите, может быть и верно с рациональной точки зрения. Но кого в наше время интересует разум? Какие *практические* последствия будет иметь эта новая интерпретация?

КАНДИДО

Непросто оценить последствия преодоления исторических предрассудков. Например, ни в коем случае нельзя сказать, что теория относительности есть лишь *применение* неевклидовой геометрии. С другой стороны, кто может сомневаться в том, что без преодоления исторического предрассудка о единственности концепции пространства мы едва ли пришли бы к относительности?

АКАДЕМУС

Рассматривать все *если* в истории — это пустая трата времени.

КАНДИДО

А разве не хуже тратить понапрасну время и привлекать впустую внимание молодых людей, обучая их теориям, которые не могут существовать? В чем смысл сохранять скорлупу, внутри которой нет содержимого?

АКАДЕМУС

Чисто рационалистическая позиция не только узка, но и неприятна: люди хотят свободы и не любят ограничений, даже тех, которые исходят от так на-

зываемого абстрактного рационализма. К несчастью история подтвердила, что чудовища рождаются не только тогда, когда разум *спит*, но и тогда, когда он *грезит*. После снов наступает пробуждение, которое часто оказывается горьким.

КАНДИДО

Разум подобен демократии: он дает возможность для перерождения, ошибок, неправильных интерпретаций, но содержит некий восстановительный механизм, которого больше нигде нет. Современный рационализм гораздо более утонченный и сложный, чем рационализм наивного Просвещения. Деятельность, основанная на иррациональном, такая как например, астрология, расизм, некоторые формы сектантского мистицизма, а также (почему бы и нет?) некоторые формы академического согласия, напротив, по сути не менялись и не развивались в течение тысячелетий.

АКАДЕМУС

Как раз наоборот, очень часто именно так называемые рационалисты напоминают о высокомерии диктатур. Например, Ваши слова: *он не прав, квантовая вероятность доказывает, что . . .* — являются достаточно жестким утверждением, а это неприятно. Вы похожи на человека, у которого есть иллюзия, что он знает *правду* и поэтому чувствует, что имеет право объявить *святую войну* любой альтернативной теории.

КАНДИДО

На мой взгляд, и такая строгость, и попытки делать ясные и однозначные утверждения — ошибочны. Трудно достичь ясности, для этого требуется многолетняя работа и отвага, потому что гораздо проще защищать нечеткие формулировки, открытые для различных интерпретаций, чем формулировки строгие.

АКАДЕМУС

Обвинять в агрессивности тех, кто пытается выразиться ясно, — это ребячество.

КАНДИДО

Никто не обвиняет математика, заявляющего о том, что он *доказал* некое утверждение, в высокомерии или агрессивности. Напротив, математика, отвергающего теорию, в которой он сам не уверен, не слишком бы уважали его коллеги. Почему же тогда люди, которые стараются привнести в философию концептуальную строгость, столь обычную для математики, не должны ожидать такой же благожелательности от остальных людей?

Тот, кто ищет ясности, доказывает, что он верит в существование чего-то, что является *правдой* независимо от всеобщего одобрения. Без этой веры не было бы науки.

АКАДЕМУС

Вы лишены *проницательности*. Людей, очарованных темными сторонами мышления, гораздо больше, чем людей, чувствующих *эстетику разума*. Разве не было бы лучше, если бы научный мир признал это и с риском для себя попытался справиться с этими темными сторонами, а не отбрасывал бы их на задворки разума?

КАНДИДО

Рациональность — это не задворки. Как и у любой другой ценности ее корни гораздо глубже самой рациональности.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что рациональность не может себя оправдать?

КАНДИДО

Нет. В этом она похожа на любую другую ценность.

АКАДЕМУС

Но ограничивая роль научного мира управлением рациональностью, мы сужаем ее и рискуем остаться в изоляции.

КАНДИДО

Возможно, опыт церкви с ее двухтысячелетней историей сможет нас чему-нибудь научить. Признание чьих-либо заслуг в управлении какими-либо ценностями не означает его отчуждения от остальных. Здесь не может быть никакого конкретного результата: подобно тому как роль церкви состоит в управлении религиозным духом, так и роль науки заключается в управлении рациональным мышлением. Любое другое значение нужно рассматривать в соответствии с этим. Выживание черт, типичных для рационального мышления, которые в настоящее время подвергаются расспросам и нападкам со всех сторон, на мой взгляд, является основным предметом, объединяющим всех тех, кто интересуется наукой, несмотря на границы, разделяющие отдельные дисциплины. Это, очевидно, применимо к институту, а не к отдельному индивидууму, который свободно может на свое усмотрение комбинировать и уравнивать весь комплекс своих ценностей.

АКАДЕМУС

Каковы могли бы быть эти черты типичного рационального мышления?

КАНДИДО

В рациональном мышлении существует *необходимость*, которая всегда пленяла тех, кто пытался искать правду вне субъективности отдельных индиви-

дуумов. Я не понимаю, каким образом человек может посвятить себя науке, если он в нее не верит.

АКАДЕМУС

Если Вы так очарованы этой *необходимостью*, которая, конечно же, противостоит *свободе*, то Вы неявно соглашаетесь с теми, кто связывает рационализм с *авторитаризмом*. Люди любят подчеркивать внутреннюю *свободу мышления*, в то время как Вы, на мой взгляд, подчеркиваете *необходимость*, т. е. принуждение.

КАНДИДО

Напротив. Только рационализм гарантирует настоящую свободу. Только тот, кто не знаком с рациональным мышлением, может ошибочно принимать его за иллюзию несомненных фактов. Я не знаю другой человеческой деятельности, которая бы так непрерывно и систематически обсуждала бы свои собственные предпосылки.

Не могу понять, почему этого нельзя принять по той же причине, по которой были приняты различные аспекты общественной жизни, т. е. вследствие различия между свободой и *произволом*.

АКАДЕМУС

Я не понимаю этой параллели между разумом и обществом.

КАНДИДО

Именно тот факт, что свобода является *универсальной* ценностью, накладывает некоторые ограничения на индивидуальные свободы, т. е. он привносит в *свободу необходимость*. Эта необходимость в государстве становится *законами*, а в научной мысли превращается в *теории*.

Если принимаются общие ценности, такие как, например, принципы, провозглашенные в конституции государства, тогда законы *должны* быть совместимыми с заявленными ценностями. *Постулаты* теории подобны *пунктам* конституции, теоремы соответствуют законам; они также должны быть совместимы с основными принципами и настолько, насколько это возможно, быть их *необходимыми* следствиями.

АКАДЕМУС

Но сами постулаты совершенно необязательны в том смысле, который Вы имеете в виду, поэтому они произвольны. Таким образом, мы приходим к парадоксу: предполагаемая *необходимость* теории основывается на *произвольности* аксиом.

КАНДИДО

Разум отличается от любой другой интеллектуальной активности именно тем, что распознает границы и делает их предметом своего анализа. *Необ-*

ходимость, на которую я ссылался, имеет отношение к *дедуктивной рациональности*, которая гарантирует *согласованность со значениями* (или, на языке науки, — аксиомами) и наблюдает их общее соответствие. С другой стороны, действительно, рациональность нельзя свести к дедуктивной рациональности. Например, нет сомнения в том, что исторический процесс, ведущий к аксиомам теории, включает в себя глубокую рациональность, но это не дедуктивный тип. В этом типе рационализма необходимость, скорее, *амбиция*, а не *факт*.

АКАДЕМУС

Если Вы сами допускаете, что нельзя говорить о *необходимости аксиом*, если Вы определенно признаете, что нельзя говорить о необходимости интерпретации, то по какому праву Вы требуете, чтобы мы стали иначе преподавать интерпретацию квантовой теории? Как Вы можете говорить, что квантовая вероятность *лучше*?

КАНДИДО

Я утверждаю это с помощью того типа рациональности, который заставляет Вас выбирать одну систему аксиом, т. е. математическую модель, а не другую.

Старой интерпретации, а не новой, нужно *доказывать* свою необходимость на основании экспериментальных данных. Старая интерпретация противопоставляется некоторым основам физики, таким как локальность и реализм, а новая — нет. Все аргументы свидетельствуют в пользу того, что старая теория оказалась ошибочной, а новая основывается на неоспоримых математических теоремах. Старая интерпретация породила бесконечные и пустые споры, новая — позволила бы направить эту интеллектуальную энергию не на искусственные, а на реально существующие проблемы. Старая интерпретация мешала исследованию фундаментальных проблем формальными упражнениями, такими как квантовая логика, новая — с помощью идеи об *относительности законов вероятности*, обнажает для философских размышлений огромную нетронутую область, которая только и ждет, чтобы ее исследовали. Старая интерпретация привела к разделению исследований на фундаментальные и прикладные (активные), превратив одни из них в гетто; новая — вновь объединяет эти направления мышления, демонстрируя плодотворность такого взаимодействия. Старая интерпретация нарушила связи между старым взглядом, оперирующим терминами здравого смысла, и современной физикой; новая — восстанавливает эту связь, не сходя с ума, и ставит физику в рамки здравого смысла, не требуя ни радикальных, ни беспочвенных отречений.

АКАДЕМУС

Не обосновывает ли это доказательство *логическую необходимость отказа* от старой интерпретации?

КАНДИДО

Оно *не требует* отказа, но, безусловно, доказывает суетность его предполагаемой *экспериментальной необходимости*. С другой стороны, если термин *историческая необходимость* что-то значит, то настало время использовать его.

IX.7. Приложение: реалистичная теория измерения¹⁶

КАНДИДО

Создается впечатление, что до сих пор Вы не обсуждали идею о том, что условие локальности не подразумевает каких-либо противоречий квантовой теории. Позвольте мне напомнить Вам вкратце эти рассуждения:

(i) Неравенство Белла противоречит некоторым предсказаниям квантовой теории, которые подтверждены экспериментально.

(ii) Белл, как и многие другие, заявляет, что его неравенство следует из условия локальности, и делает вывод о противоречии между локальностью и экспериментальными данными.

(iii) Анализ неравенства Белла, напротив, доказывает, что это не так: противоречия между экспериментальными данными и неравенством Белла (или другими эквивалентными неравенствами, известными задолго до Белла) не имеют ничего общего с локальностью.

АКАДЕМУС

Что Вы имеете в виду, говоря, что это *не так*?

КАНДИДО

Во-первых, в разд. VIII.5 мы видели, что то, что Белл называет *существенным допущением* (т. е. его формулировка локальности), совсем необязательно для доказательства его неравенства.

¹⁶Это приложение, помещенное в текст для полноты изложения, носит, скорее, технический характер и с концептуальной точки зрения не добавляет многого к тому, что уже было сказано. На самом деле его можно рассматривать как пример описания с применением точных математических терминов, так называемого *эффекта хамелеона*. Используя эту схему, читатель сможет сконструировать столько макроскопических систем, сколько захочет, нарушая классические (или даже квантовые) статистические инварианты, такие как неравенства Белла. Для более детального изучения обсуждаемого здесь предмета см. L. Accardi, *The realism of the urns and the realism of chameleons*, in *Philosophy of Science in Florence*, 1995, eds. M. Dalla Chiara, R. Giuntini, F. Laudisa, Kluwer (1988).

Далее в разд. VIII.6 мы видели, что действительно *существенное* допущение в доказательстве неравенства Белла — это допущение *зависимости от граничных условий*, как и в эксперименте с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Здесь у меня возникают сомнения относительно Вашего анализа. Я подозреваю, что то, что Вы называете *независимостью от граничных условий*, — всего лишь другое название того, что Белл называет *локальностью*.

КАНДИДО

Для доказательства того, что эти сомнения беспочвенны, я опишу модель процесса измерения, так чтобы всем было понятно, что условие локальности может выполняться при сохранении зависимости от граничных условий. Это непременно должно положить конец дискуссии.

АКАДЕМУС

Я понимаю, что Вы имеете в виду: если бы имели место ситуации, в которых выполнялось условие локальности при сохранении зависимости от граничных условий, то это доказывало бы, что оба понятия концептуально различны и поэтому возможность того, что одно из них является просто иной формулировкой другого, была бы исключена. Мне действительно интересно узнать об этих *физических ситуациях*, на которые Вы ссылаетесь.

КАНДИДО

Это не искусственно смоделированные ситуации. Напротив, то, что я собираюсь Вам описать, — это модель, описывающая процесс измерения в его общем виде. То, что я собираюсь Вам объяснить, можно было бы определить как *реалистичный и локальный анализ процесса измерения*.

АКАДЕМУС

Короче говоря, Вы хотите сделать все то, что последователи стандартных интерпретаций (ортодоксальной, Белла и макрореалистической) считают невозможным. С другой стороны, *реализм* — это неуловимый термин.

КАНДИДО

Но в разд. III.1 я уже говорил Вам, что мой реализм — это слабый реализм: я доволен тем, что *с моей точки зрения противоречие не может возникнуть из допущения того, что ненаблюдаемые объекты имеют те же свойства, что и наблюдаемые объекты*. Сильный реализм нельзя доказать, а мой слабый — можно. Это можно выразить более понятным языком: я не говорю, что *докажу, что ненаблюдаемая частица всегда имеет хорошо определяемое положение и скорость* (не думаю, что такое доказательство вообще возможно). Вместо этого можно доказать, что *утверждение физиков, согласно которому допущение того, что ненаблюдаемая частица*

имеет хорошо определяемое положение в любой момент, ведет к противоречиям с экспериментальными данными, беспочвенно.

АКАДЕМУС

Но даже ваша позиция *слабого реализма* противоречит доминирующей в настоящее время интерпретации квантовой теории, согласно которой *принятие того, что ненаблюдаемые объекты имеют те же свойства, что и наблюдаемые, эквивалентно возникновению противоречий с экспериментальными данными* (см. разд. II.1).

КАНДИДО

Не думаю, что такая интерпретация будет долго оставаться *доминирующей*.

АКАДЕМУС

А какова альтернатива?

КАНДИДО

Альтернатива записана в самой физике. Мы просто должны иметь возможность ее прочитать.

АКАДЕМУС

Так давайте прочитаем!

КАНДИДО

Вместо того, чтобы рассуждать в абстрактной терминологии, давайте сконцентрируемся и рассмотрим наши идеи на примере эксперимента ЭПР. Распространение на более общие случаи не представляет ни концептуальных, ни технических трудностей.

АКАДЕМУС

Это небольшое ограничение при условии, что анализ настолько четкий, что он моментально распространяется на более общие случаи.

КАНДИДО

Это именно то, что я собираюсь сделать. Но обратите внимание: в своих рассуждениях я использую нечто такое, что окажется небольшим сюрпризом для Вас и о чем Вы узнаете только в самом конце моих рассуждений, если сами не обнаружите это раньше.

АКАДЕМУС

Вы теперь показываете фокусы?

КАНДИДО

Нет, это совершенно безболезненный эксперимент, предназначенный для того, чтобы указать на некоторые предрассудки, которые все еще пускают корни в научной среде и становятся общим местом или парадигмами, несмотря на полное отсутствие каких-либо логических оснований.

АКАДЕМУС

Я принимаю вызов. Пожалуйста, начинайте ваш анализ.

КАНДИДО

Во избежание длинных выражений лучше всего ввести некоторые обозначения.

Давайте обозначим:

S — систему, образованную парой частиц в синглетном состоянии;

M — измерительный прибор.

Для описания этой системы в рамках какой-либо физической теории, как классической, так и квантовой, необходимо обозначить:

— начальное состояние пары частиц (синглетное);

— начальное состояние измерительного прибора;

— свободную эволюцию пары частиц;

— свободную эволюцию измерительного прибора;

— взаимодействие между S и M , т. е. между парой частиц и измерительным прибором.

АКАДЕМУС

Что Вы понимаете под *свободной эволюцией*?

КАНДИДО

Это та эволюция, которую претерпевала бы любая система, если бы она больше ни с чем не взаимодействовала.

АКАДЕМУС

Количественные данные о спиновых наблюдаемых вычисляются только с помощью синглетного состояния: в расчетах никогда не учитывается измерительный прибор. Ясно, что таким образом вводится некое приближение, но оно должно быть достаточно хорошим, поскольку экспериментальные данные подтверждают предсказания квантовой теории.

КАНДИДО

То, что Вы говорите, — верно, но Вы не должны забывать, что это дело аппроксимаций. Теоретически верные установки полезны по крайней мере для того, чтобы показать нам, *что* мы на самом деле измеряем. Чтобы быть более точными, давайте подумаем об эволюции системы (S, M) как о *динамическом законе* и давайте для описания такого закона введем обозначение:

$$T_{(S,M)}^t,$$

где t обозначает любой момент времени. Затем введем обозначения

$$T_S^t; \quad T_M^t$$

для обозначения соответственно свободной эволюции системы S и системы M .

АКАДЕМУС

Вы можете вводить столько обозначений, сколько хотите. Но до тех пор пока Вы не определите, какую *физическую реальность* они описывают, они будут оставаться всего лишь бессмысленными знаками, начертанными на бумаге.

КАНДИДО

Давайте назовем:

$S_o(t)$ — совокупность всех физических свойств, которые система S имела бы в момент времени t , если бы она не взаимодействовала с измерительным прибором M ;

$M_o(t)$ — совокупность всех физических свойств, которые измерительный прибор имел бы в момент времени t , если бы он не взаимодействовал с системой S ;

$S(t)$ — совокупность всех физических свойств системы S после взаимодействия с прибором M ;

$M(t)$ — совокупность всех физических свойств прибора M после взаимодействия с системой S .

С помощью этих обозначений три закона динамики $T_{(S,M)}^t$, T_S^t , S_M^t нужно интерпретировать в следующем смысле:

$$T_{(S,M)}^t(S_o(0), M_o(0)) = (S(t), M(t));$$

$$T_S^t S(0) = S_o(t);$$

$$T_M^t M(0) = M_o(t).$$

Заметьте, пожалуйста, что когда я пишу это, я допускаю, что:

$$S_o(0) = S(0); \quad M_o(0) = M(0),$$

что эквивалентно тому, что в момент 0 система S и прибор M не взаимодействуют.

АКАДЕМУС

Вот теперь стало яснее. Законы динамики описывают эволюцию во времени физических свойств систем. Очевидно, что такие свойства будут различными в зависимости от того, взаимодействуют системы друг с другом или нет.

КАНДИДО

Основной постулат классической теории измерения может быть сформулирован следующим образом: наличие измерительного прибора M имеет отрицательное воздействие на эволюцию системы S , но не наоборот. Используя обозначения, это можно выразить следующим образом:

эволюция взаимодействия $S =$ свободная эволюция S :

$$T_{(S,M)}^t(S(0)) = S(t) = S_o(t) = T_S^t S(0);$$

эволюция взаимодействия $M \neq$ свободная эволюция M :

$$T_{(S,M)}^t(M(0)) = M(t) \neq M_o(t) = T_M^t M(0).$$

АКАДЕМУС

Для эксперимента с двумя отверстиями и мраморными или бильярдными шарами это приемлемо: если нет шарика, фотозащитный элемент, помещенный между двумя экранами, не работает, в то время как наличие шара заставляет его работать. Таким образом, в случае с измерительным прибором эволюция взаимодействия отличается от свободной эволюции ($T_{(S,M)}^t(M(0)) \neq T_M^t M(0)$). С другой стороны, я думаю, что наличие фотозащитного элемента не влияет сколь-нибудь значительно на траекторию бильярдного шара (при условии, что я разместил его таким образом, что столкновения исключены), так что для данной системы эволюция взаимодействия отличается от свободной эволюции ($T_{(S,M)}^t(S(0)) = T_S^t S(0)$).

КАНДИДО

Верно, но не забывайте, что различие между *системой* и *измерительным прибором* является *категорией разума*, скорее удобным отличием, нежели чем объективным фактом. Природа видит только *одну систему*. Именно мы отделяем роли двух систем, называя одну из них *измерительным прибором*, а другую — *системой*. Поскольку это приближение, необходимо помнить о его ограничениях.

АКАДЕМУС

С определенной точки зрения различное отношение к взаимодействию, которое я только что подчеркнул, можно интерпретировать как попытку *выразить* при помощи объективных (хотя и приблизительных) терминов различие между *системой* и *измерительным прибором*.

КАНДИДО

Но эта попытка обоснована только в контексте *классических теорий*: безразличие системы в отношении взаимодействия с прибором является при-

емлемым приближением только тогда, когда сама система является *макроскопической*, но даже в этом случае это не представляет из себя всеобщего правила.

КАНДИДО

Но эксперимент с двумя отверстиями показывает нам, что *основной постулат классической теории измерения не обоснован на микроскопическом уровне*.

АКАДЕМУС

Верно: это совершенно явно вытекает из анализа Бора, Гейзенберга и Фейнмана.

КАНДИДО

Мы должны признать это и развить качественное описание процесса измерения, которое, если не вдаваться в детали специфических взаимодействий, может отразить концептуальную новизну, которую необходимо ввести в *основной постулат классической теории измерения*, когда рассматриваются микроскопические системы или, в более общем смысле, когда этот *постулат безразличия* экспериментально не обоснован.

АКАДЕМУС

В литературе имеется много идеализированных моделей, которые пытаются охватить некоторые аспекты взаимодействия между микроскопической и макроскопической системами.

КАНДИДО

Да, но я имею в виду нечто другое: общее описание, *не зависящее от модели*. Короче говоря, я хотел бы заменить то, что мы называли *основным постулатом классической теории измерения*, на общую формулировку, которая особенно значима при рассмотрении микроскопических систем. Именно вследствие своего обобщенного характера такая формулировка непременно будет качественной. Успех такой программы легко определить: если все специфические модели, изобретенные физиками для имитации процесса измерения, подходят нашей общей формулировке, то это означает, что формулировка действительно уловила сущность этих моделей независимо от конкретного выбора.

АКАДЕМУС

Сомневаюсь, что такая формулировка может существовать. Однако посмотрим...

КАНДИДО

Для того, чтобы подойти к такой формулировке, давайте начнем еще раз с

эксперимента с двумя отверстиями и попытаемся выяснить роль граничных условий.

КАНДИДО

Можно сказать, что три возможных условия для первого экрана (т. е. открыты оба отверстия, открыто только отверстие 1, открыто только отверстие 2) определяют *три различных измерительных прибора*. Для того, чтобы различать их, давайте пометим их тремя различными обозначениями:

$$M_{1,2}; \quad M_1; \quad M_2.$$

Им соответствуют эволюции во времени, которые а priori являются различными:

$$T_{(S,M_{1,2})}^t; \quad T_{(S,M_1)}^t; \quad T_{(S,M_2)}^t.$$

То, что в некоторых случаях различия являются настолько малыми, что ими можно пренебречь, а в других случаях — таковыми не являются, представляет интерес, но с концептуальной точки зрения не вызывает удивления. Иными словами, мы должны а priori ожидать, что эти три эволюции отличаются друг от друга (что является обычным явлением на микроскопическом уровне) и не совпадают (что является обычным явлением на макроскопическом уровне). Например, в случае с двумя отверстиями, если мы назовем $M_{1,2}$ ситуацию, когда оба отверстия открыты и M_1 (соответственно M_2) ситуацию, когда открыто только одно отверстие, и назовем σ начальное состояние системы (например, случайную частицу и подготовку прибора), состояние системы в момент времени t в этих трех случаях будет:

$$T_{(S,M_{1,2})}^t \sigma, \quad T_{(S,M_1)}^t \sigma, \quad T_{(S,M_2)}^t \sigma$$

Как вы можете видеть, на самом деле поразительно то, что в некоторых случаях (например, с бильярдными шарами) эти три состояния совпадают, а совсем не то, что в некоторых других случаях (например, с электронами) — не совпадают.

АКАДЕМУС

Мы знаем об этом, ведь мы это уже обсуждали! Я не вижу здесь ничего нового.

КАНДИДО

Это доказывает то, что из допущения *детерминистской* эволюции шаров не возникает никаких противоречий.

АКАДЕМУС

Но в случае парадокса ЭПР из этого следует нелокальность.

КАНДИДО

В случае, проанализированном Беллом и экспериментально реализованном Аспектом, S обозначает синглетную пару, а M — измерительный прибор. Состояние последнего зависит от направлений a и b поляризаторов, поэтому

$$M = M_{a,b},$$

и, следовательно, динамический закон также будет зависеть от направлений поляризации:

$$T_{(S,M)}^t = T_{(S,M_{a,b})}^t.$$

Mutatis mutandis (очевидно измененная) ситуация точно такая же, как и в случае с экспериментом с двумя отверстиями.

АКАДЕМУС

Это, возможно, применимо к первым экспериментам Аспекта, где два направления a , b оставались неизменными, но, безусловно, не к последним, где они изменялись.

КАНДИДО

Это не верно. Оба случая подходят к моей схеме: единственное отличие между ними заключается в свободной эволюции прибора, т. е. T_M^t . В первых экспериментах не было макроэволюции прибора $M_{a,b}$. В последующих экспериментах экспериментатор инициировал макроэволюцию во времени, которая очень быстро изменяла направления a и b . Это техническая виртуозность заслуживает максимального восхищения как достижение экспериментальной техники, но концептуально ничего не значит, поскольку свободная эволюция M включена в эволюцию взаимодействия, т. е. $T_{(S,M)}^t$.

АКАДЕМУС

До сих пор локальность не играла никакой роли.

КАНДИДО

Моя теория как раз в том и заключается, что она не играла никакой роли. Как бы то ни было, ее очень легко ввести в мою схему.

АКАДЕМУС

Если это так просто, почему Вы это не сделали?

КАНДИДО

Для того, чтобы это сделать, лучше ввести то, что на жаргоне называется *динамическим генератором* или *бесконечно малым законом динамической эволюции*.

АКАДЕМУС

Вы имеете в виду *гамильтониан* системы?

КАНДИДО

Да, но, как всегда, название не имеет значения. Что действительно важно знать, так это то, что динамическая эволюция системы, как классической, так и квантовой, однозначно определяется *одним-единственным объектом* H , называемым *гамильтонианом* системы или же *генератором* его динамической эволюции. В случае системы (S, M) динамический генератор выражен через сумму трех составляющих:

$$H = H_S + H_M + H_I, \quad (\text{IX.7.1})$$

первая из которых (H_S) обуславливает свободную эволюцию системы S (т. е. T_S^t); вторая — (H_M) обуславливает свободную эволюцию прибора M (т. е. T_M^t); а третья (H_I) обуславливает взаимодействие между системой S и прибором M .¹⁷

АКАДЕМУС

Все это хорошо известно. Причина, по которой физики вместо того, чтобы говорить об эволюции $T_{(S,M)}^t$, предпочитают говорить об образующей H , заданной уравнением (IX.7.1), заключается в том, что вклад в нее трех динамических законов S и M можно легко отделить от вклада взаимодействия. Такое различие менее понятно в динамическом законе $T_{(S,M)}^t$.

КАНДИДО

В терминах образующей H очень легко ввести условие локальности. Для этого достаточно помнить, что как S , так и M состоят из двух подсистем; S состоит из двух частиц 1 и 2:

$$S = (1, 2),$$

а M состоит из двух приборов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга:

$$M = (M_1, M_2).$$

Соответственно этим подразделениям имеется подразделение закона движения:

$$\begin{aligned} H_S &= H_1 + H_2 + H_{1,2}; \\ H_M &= H_{M_1} + H_{M_2} + H_{(M_1, M_2)}. \end{aligned}$$

¹⁷Обратите, пожалуйста, внимание на то, что образующая сопряженной эволюции $T_{(S,M)}^t$ не H_I , а H .

АКАДЕМУС

В рассматриваемом случае экспериментальные данные дают нам право рассмотреть взаимодействие двух частиц $(H_{1,2})$ и двух приборов $(H_{(M_1, M_2)})$. Эти объекты на самом деле весьма удалены друг от друга. Поэтому мы можем предположить, что

$$H_S = H_1 + H_2; \quad H_M = H_{M_1} + H_{M_2}, \quad (\text{IX.7.2})$$

где (H_1) (соответственно (H_{M_1})) является законом движения частицы 1 (соответственно прибора M_1) и законом движения частицы 2 и прибора M_2 .

КАНДИДО

Именно так. И ничто не мешает нам думать, что законы движения M_1 или M_2 содержат макроскопические компоненты, индуцированные экспериментатором. Быстрые изменения, которые в эксперименте Аспекта индуцированы в приборе M_1, M_2 , можно записать в рамках законов движения H_{M_1}, H_{M_2} (для этого достаточно ввести временную зависимость этих операторов). Тот факт, что они не зависят друг от друга, означает, что закон движения для M_1 не влияет на M_2 , и наоборот.

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что разложение S - и M -гамильтониана, описанного уравнением (IX.7.2), является корректной формулировкой условия локальности?

КАНДИДО

Не совсем. Чтобы выразить это наиболее полно, необходимо ввести аналогичное разложение для взаимодействия между двумя частицами, т. е. $S = (1, 2)$, и двумя частями прибора, т. е. $M = (M_1, M_2)$. Дано:

$$H_{(S, M)} = H_{(1, 2)(M_1, M_2)}.$$

В этом взаимодействии мы различаем несколько составляющих:

- взаимодействие между 1 и M_1 : H_{1, M_1} ;
- взаимодействие между 2 и M_2 : H_{2, M_2} ;
- взаимодействие между 1 и M_2 : H_{1, M_2} ;
- взаимодействие между 2 и M_1 : H_{2, M_1} .

Вследствие этого мы а priori должны иметь

$$H_I = H_{(S, M)} = H_{1, M_1} + H_{2, M_2} + H_{1, M_2} + H_{2, M_1}.$$

Условие локальности эквивалентно утверждению о том, что вклад в движение взаимодействий между 1 и M_2 и между 2 и M_1 бесконечно мал,

поскольку эти объекты находятся на очень большом расстоянии друг от друга.

АКАДЕМУС

Это допустимо и похоже на утверждение о том, что мы допускаем бесконечно малую ошибку, если полагаем, что

$$H_{1,M_2} = H_{2,M_1} = 0.$$

Следовательно, в приближении бесконечно малой ошибки система 1 взаимодействует только с прибором M_1 , а система 2 взаимодействует только с прибором M_2 . Формула:

$$H_1 = H_{(S,M)} = H_{1,M_1} + H_{2,M_2}.$$

КАНДИДО

При этих допущениях динамическая образующая будет, в приближении бесконечно малой ошибки, представлять собой сумму двух компонентов: один из которых относится только к паре система 1 плюс прибор M_1 ; другой — только к паре система 2 плюс прибор M_2 . Формула:

$$H = (H_1 + H_{M_1} + H_{1,M_1}) + (H_2 + H_{M_2} + H_{2,M_2}).$$

АКАДЕМУС

Да, но концептуально, т. е. независимо от всех этих символов, что означает это уравнение?

КАНДИДО

Концептуальное значение вполне понятно: динамический закон взаимодействия система $(S, M) = 2$ частицы + 2 измерительных прибора, которые мы назвали $T_{(S,M)}^t$, разложен на две части:

$$T_{(S,M)}^t = (T_{(1,M_1)}^t, T_{(2,M_2)}^t). \quad (\text{IX.7.3})$$

Это означает, что частица 1 эволюционирует только под влиянием измерительного прибора 1; это же справедливо и для частицы 2. Это *правильный перевод условия реальности Эйнштейна*, а не Белла (которое требует разложения не динамики, а состояния).

АКАДЕМУС

Я все еще не понимаю, в чем этот анализ противоречит анализу Белла.

КАНДИДО

Противоречие кроется в его основополагающем допущении. В работах Белла была предпринята попытка подтвердить его a posteriori, апеллируя к

реализму: допущение одного сопряженного распределения, из которого выводились все три корреляции $E(S_a^1 S_b^2)$, $E(S_b^1 S_c^2)$, $E(S_c^1 S_a^2)$.

АКАДЕМУС

В чем заключается это противоречие?

КАНДИДО

Используем обозначения M_a , M_b , M_c вместо M_1 , M_2 для прибора, измеряющего поляризацию (или спин) в направлениях a , b , c . В этих обозначениях выражение (IX.7.3) выглядит следующим образом:

$$T_{(S,M)}^t = T_{a,b}^t = (T_{(1,M_a)}^t, T_{(2,M_b)}^t) = T_{(1,M_a)}^t \otimes T_{(2,M_b)}^t.$$

Эволюции во времени $T_{b,c}^t$, $T_{c,a}^t$ определены таким же образом.

Давайте, наконец, начальное состояние всей системы назовем σ . В обозначениях: $\sigma = \sigma_0 \otimes \sigma_M$, где σ_0 — синглетное состояние, а σ_M — состояние прибора в начальный момент. Разложение выражает очевидный факт, что частицы не имеют информации об измерении, которому они будут подвергнуты. При этих условиях состояние системы в момент t в трех экспериментальных ситуациях будет следующим:

$$\sigma_{ab}(t) = T_{ab}^t \sigma; \quad \sigma_{bc}(t) = T_{bc}^t \sigma; \quad \sigma_{ca}(t) = T_{ca}^t \sigma.$$

Это противоречит основному допущению в доказательстве неравенства Белла.

АКАДЕМУС

В чем заключается это противоречие?

КАНДИДО

В том, что как бы Вы не интерпретировали состояния $\sigma_{ab}(t)$, $\sigma_{bc}(t)$, $\sigma_{ca}(t)$, они будут определять результаты вычислений. У нас тогда будет три результата вычислений, соответствующие условиям эксперимента (ab) , (bc) , (ca) , и а priori нельзя предположить (как это делает Белл), что эти данные можно объединить в одну-единственную сопряженную вероятность для (a, b, c) (классическая вероятностная модель). Поскольку все это происходит в условиях локальности (частицы, как и хамелеоны, только реагируют на среду, которая их окружает), из этого следует, что совсем необязательно обращаться к загадочным нелокальным эффектам, чтобы объяснить невозможность примирения трех результатов вычислений, имеющих отношение к трем несовместимым экспериментам в рамках одной классической вероятностной модели.

АКАДЕМУС

Есть еще одна вещь, которую я не понимаю: формула, использованная в квантовой теории, для предсказания этих количественных данных, не включает в себя непосредственно измерительный прибор. В этой формуле используется одна динамика T^t , *независящая от какой-либо пары* (a, b) , (b, c) , (c, a) и действующая только в синглетном состоянии σ_0 . Величина σ_M измерительного прибора не введена и, никто не знает, какова она, так же как и операторы, детально описывающие взаимодействие частиц с прибором.

КАНДИДО

В этом красота квантовой теории и сила ее математического формализма. Эта унификация, которая, как видно из неравенства Белла (а в более общем случае — статистических инвариантов), невозможна в рамках классической вероятностной модели, осуществляется квантовой теорией в рамках новой модели, которая для вероятности является тем, чем для геометрии была неевклидова геометрия. Вот почему мы говорим о *квантовой вероятности*.

Описанный выше анализ процесса измерения был предназначен для доказательства *физической вероятности* предсказаний квантовой теории и их полной совместимости с реализмом и локальностью. С одной стороны, если б для того, чтобы предсказать результаты экспериментов, было бы необходимо каждый раз писать гамильтониан измерительного прибора, физику бы парализовало и она не смогла бы больше существовать. С другой стороны, тот факт, что вероятностная модель квантовой теории может предсказывать теоретические ожидания, которые так хорошо согласуются с экспериментальными данными в рамках общей схемы, не рассматривающей детали, касающиеся измерительного прибора, не может не вызывать энтузиазма и восхищения у тех, кто интересуется творениями человеческого разума. Можно было бы рассуждать о том, что это качество будет утеряно при описании более сложных систем, таких как биологические или социальные, но в настоящее время это все-таки остается спекуляцией, поскольку ни одна конкретная модель такого сорта не играла решающей роли в развитии *науки сложных систем*.

АКАДЕМУС

Понимаю, описанная Вами схема измерения на самом деле выполняет динамическую трансляцию того, что мы должны назвать *эффектом хамелеона*.

С другой стороны, в ожидании *формулировки условия локальности в терминах динамики*, которые я вижу здесь впервые, не думаю, что эта схема

нова: все математические модели квантового процесса измерения, развивавшиеся в последние годы, могут быть включены в эту общую схему. У них у всех есть общая черта — попытка включить в математическую модель не только систему, которая подвергается измерению, но и другую, взаимодействующую с ней систему, которая согласно имеющимся интерпретациям называется *измерительным прибором, окружающей средой, термостатом, резервуаром, полем, газом и т. д.*

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что теория измерения представляет собой всего лишь теорию взаимодействия систем?

КАНДИДО

Не совсем, необходимо, чтобы одна из взаимодействующих систем имела бы свойства, качественно отличные от других, и они каким-то образом отождествлялись с *измерительным прибором*, т. е. с *макроскопическим объектом*. В настоящее время нет однозначного и исчерпывающего определения *макроскопического объекта*, во всяком случае два свойства, по-видимому, присутствуют во всех имеющихся в литературе моделях, описывающих такие объекты:

- i) очень большое (возможно, бесконечное) число степеней свободы;
- ii) *большие*, по сравнению с постоянной Планка, массы.

Например, квантовое поле имеет множество (практически бесконечное число) степеней свободы; газ состоит из множества частиц, и так называемый *термодинамический предел* имеет в действительности бесконечное число частиц.

АКАДЕМУС

Термодинамический предел — это абстракция, но *хорошая* абстракция, поскольку она содержит физическую реальность, заключающуюся в том, что с ростом числа частиц некоторые физические параметры, которые можно экспериментально измерить, стремятся к стабильности.

Как бы то ни было, я не думаю, что описанная Вами абстрактная схема включает это различие между макроскопическим и микроскопическим.

КАНДИДО

Она не включает его, потому что такое различие является весьма типичной чертой уникальных моделей, и поэтому вряд ли имеет смысл пытаться описывать его независимо от модели.

АКАДЕМУС

А что такое упомянутые Вами *общие черты*?

КАНДИДО

С первой мы уже сталкивались: рассматриваются две взаимодействующие системы, которые мы будем называть *системой* и *измерительным прибором*.

АКАДЕМУС

Мы уже видели, что процесс измерения разделяет это свойство с процессом, включающим взаимодействие двух систем.

КАНДИДО

Специфичность проявляется в том, каким образом смоделирован измерительный прибор. Различают несколько типов моделей:

I) модели, в которых измерительный прибор представлен кристаллической решеткой частиц (термодинамическая модель)¹⁸;

II) модели, в которых измерительный прибор представлен стохастическим процессом, индексированным по времени. К ним принадлежат различные модели школы Людвига¹⁹. Или уже упомянутые модели Жирарди, Римини, Вебера или похожие на них модели Перла²⁰;

III) модели, в которых измерительный прибор также описан с квантовой точки зрения²¹.

¹⁸См., например, К. Hepp, *Quantum theory of measurement and macroscopic observables*, *Helv. Phys. Acta* **45** (1972) 273 или А. Frigerio, *Quasi-local observables and the problem of measurement in quantum mechanics*, *Ann. Ist. Poincaré A* **21** (1974) 259–270.

¹⁹L. Lanz, G. M. Prosperi, *A model for the macroscopic description of Continual observations in Quantum Mechanics*, *Il Nuovo Cimento* **72B** (1982) 79–121

²⁰Philip Pearle, *Reality Checkpoint* в *The interpretation of Quantum Theory: Where do we stand?*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana (1994), p. 187–204. В этом же томе см. также статью В. П. Белавкина, в которой дается объяснение того, почему эти модели динамической локализации и соответствующих нелинейных уравнений являются частными случаями более общей и удовлетворительной с физической точки зрения теории квантовой фильтрации. Классическая теория фильтрации имеет дело с проблемой динамической корректировки наших статистических ожиданий при наличии новой информации. Известно, что это ведет к нелинейным уравнениям. Квантовое обобщение этих уравнений было сделано Белавкиным и содержит общую схему теории так называемого непрерывного измерения. Феноменологические модели на базе отдельных уравнений были рассмотрены несколькими авторами: Жирарди, Римини, Вебером, Перлом, Диози, Джисинном, Персивалем... Но во многих из этих моделей тот факт, что это нелинейное уравнение не является новым фундаментальным уравнением в физике, а является лишь следствием сочетания обычной унитарной квантовой эволюции с квантовой фильтрацией, несколько завуалирован. Наконец, во всех этих феноменологических моделях проигнорирован стохастический процесс, описывающий шум, и почти во всех случаях считается, что таковым является классическое броуновское движение. Однако из вероятностных пределов квантовой теории мы знаем, что существует бесконечное множество шумов, и один из них, наиболее подходящий для описания данной физической ситуации, однозначно определен микроскопической структурой системы, которую мы описываем.

²¹См., например L. S. Schulman, *Particle detection Via special states* в *The interpretation of*

Модели типа (II) и (III) объединяет *стохастический предел квантовой теории*, в котором эти модели феноменологически не постулированы, а *выведены* из стандартных моделей гамильтониана. Это позволяет интерпретировать имеющиеся в них параметры на микроскопическом уровне²².

АКАДЕМУС

Вы полагаете, что эта абстрактная схема, которую мы только что обсуждали, объединяет *все* подходы к квантовой теории измерений?

КАНДИДО

Не только объединяет, но, повторю еще раз, единственная причина, по которой физикам предлагают забыть об ортодоксальной интерпретации, заключается в неудачной интерпретации состояний суперпозиции. Кроме того, новая интерпретация теории полностью совместима с практическим опытом и традицией физиков, а в некоторых отношениях даже улучшает ее.

АКАДЕМУС

Мне все же любопытно узнать, о каком *сюрипризе* Вы упоминали в начале этого раздела?

КАНДИДО

Пожалуйста. Если вернуться назад к нашим рассуждениям в этом разделе, Вы заметите, что *мы не использовали понятия, типичные для квантовой теории*. Все, о чем мы говорили, справедливо *как для классических, так и для квантовых моделей!*

АКАДЕМУС

Почему Вы считаете, что это очень важно?

КАНДИДО

Потому что это определенно доказывает, что не только локальность Белла не имеет ничего общего с локальностью Эйнштейна; что не только допущение локальности необязательно для доказательства его знаменитого неравенства, но что можно даже создать класс классических динамических моделей, удовлетворяющих условиям локальности, выраженных в корректной форме и не удовлетворяющих неравенству Белла. Как я Вам и обещал, эта схема позволяет преодолеть метафору с хамелеонами и создать бесконечное количество классических моделей, приемлемых с физической точки зрения, которые нарушают эти (или подобные) неравенства. Теперь уже

quantum theory: Where do we stand?, Istituto dell'Enciclopedia Italiana (1994), p. 265; или the already mentioned works by M. Namicki and S. Pascazio.

²²См. обзор L. Accardi, Y. G. Lu, I. Volovich, *Non commutative (quantum) probability, Master fields and Stochastic Bosonization*, Volterra Preprint n. 207 (1994), или монографию тех же авторов *Quantum Theory and Its Stochastic Limit*, Springer, 2002.

больше никто не сможет прибегнуть к эксперименту с двумя отверстиями или неравенствам Белла, чтобы оправдать предполагаемые таинственные, абсурдные или даже магические аспекты квантовой теории.

Послесловие

Черный ящик — это символ старых представлений о физической реальности: ящик (природа) содержит шарики, цвет которых (свойства физических объектов) должен установить экспериментатор, который либо может это сделать, либо нет; он либо может быть уверен в результате, либо ему достаточно приписать некие вероятности разным цветам. Однако цвет *существует вне ящика и вне нас*, он безразличен к человеку и не зависит от него, цвет — пассивен.

Хамелеон — это символ новых представлений о физической реальности: хамелеон (пусть несколько идеализированный, но разве схематизация не является самым мощным инструментом для понимания природы?) становится коричневым, если его поместить на сук дерева, или зеленым, если он находится на листе.

Экспериментатор знает, что в ящике находится хамелеон, и задается вопросом, какого же он цвета? Для того, чтобы ответить на этот вопрос, он кладет немного пищи на сук, расположенный рядом с ящиком, и ждет, когда хамелеон вылезет из ящика. Его вывод будет: хамелеон коричневый. Но если бы он положил пищу на лист, то он совершенно правильно заключил бы, что хамелеон зеленый. Для того, чтобы обладать интуитивными представлениями о поведении квантовых объектов в отношении измерительного прибора, лучше иметь в виду именно хамелеона, а не черный ящик.

Задумаемся, ведь если невозможно проверить окраску хамелеона, находящегося в ящике, как мы можем с уверенностью говорить о том, что *модель черного ящика* отличается от *модели хамелеона*? Другими словами, почему мы должны быть уверены, что в противоположность тому, что происходит с шарами, окраска хамелеона, выявленная в результате обследования, *вообще* не может быть точной такой же, какой она была *до* обследования? Ответ на этот вопрос затрагивает помимо квантовой теории вторую проблему, которой посвящена настоящая работа, а именно *законы теории вероятностей*. Можно доказать, что статистика окрасок должна быть различной в этих двух случаях и что во втором случае должны иметь место нарушения некоторых классических законов, по которым рассчитывается вероятность и которые

веками считались не допущениями, зависящими от выбранной модели, а формулировками, продиктованными здравым смыслом. Это заставило теорию вероятностей начать тщательную ревизию своих основ, как это было с революционным переосмыслением геометрии во второй половине XIX в., а позже привело к теории относительности, или логике в начале XX столетия, и привело к теореме Геделя. *Квантовая вероятность* или, в более широком смысле, *алгебраическая вероятность* явилась одним из первых результатов этого анализа.

Мы можем пойти еще дальше и обсудить *реальность* окраски хамелеона, находящегося в ящике: если нашей моделью *физической реальности*, согласно Эйнштейну, является цвет шара, находящегося в черном ящике, то, поскольку нашу ситуацию нельзя свести к такой модели, ее нельзя рассматривать как нечто, имеющее независимую физическую реальность. Должны ли мы тогда заключить, что *хамелеон, которого не наблюдают, не имеет окраски*, и что наблюдатель *создает окраску* непосредственно самой процедурой ее определения?

Как ни странно, в этом и заключается позиция современной физики. Конечно, мы должны заменить хамелеона на атомные и субатомные частицы, а его окраску — на более изысканные физические наблюдаемые, но суть останется прежней. Этой точки зрения придерживается большинство физиков, и она уже в течение десятилетий внедряется в умы молодых ученых в процессе их обучения.

Понятие *ортодоксальный* — это открытое предупреждение всевозможным *еретикам*, которое используется для того, чтобы конкретизировать эту точку зрения; оно вызывает ассоциации, имеющие мало общего с научным мышлением, но поднимает непростые вопросы.

Наука всегда была оплотом рационализма и выступала как против искушения искать упрощенные пути в сложном процессе познания, так и против подмены глубины неясностью.

Беспокоит то, что иррационализм мог проникнуть в науку и именно в те дисциплины, которые согласно общепринятым стереотипам должны быть оплотом строгого рационализма высочайшего уровня. Еще большее беспокойство вызывает то, что иррациональные элементы могут относиться к интерпретации самых современных физических теорий, например, квантовой теории, и распространяться среди молодых людей при помощи образования, ежедневных газет, журналов и даже телевидения.

Возможно благодаря именно этим вопросам проблема интерпретации квантовой теории, которая формировалась десятилетиями, до сих пор при-

влекает внимание большинства людей, интересующихся философией природы, и поднимает вопросы, в ходе обсуждения которых возникают новые концепции, сметающие стереотипы мышления, формирование которых происходило веками.

Для превращения науки в культуру в самом широком смысле этого слова и преодоления границ утилитарного технологизма понимание этой концептуальной революции не может по-прежнему ограничиваться узким кругом специалистов, которые прячутся за пеленой ненужного сленга и, зачастую, снисходительных и поверхностных объяснений, вызванных, как иногда кажется, скорее желанием удивить, чем понять самим и помочь понять другим людям.

В настоящее время проблемы, затрагивающие интерпретацию квантовой теории, можно считать решенными постольку, поскольку мы можем говорить о решении научной проблемы. Поэтому настал момент для критического пересмотра основных положений.

Историческое и разумное решение проблемы совсем не обязательно совпадает с социологическим, а научный мир не всегда свободен от искушения противопоставить разумной аргументации догмы, численное большинство, корпоративные ярлыки или просто неясные и незначительные слова, как будто достаточно повторять бесконечное число раз один и тот же аргумент, чтобы придать ему такие логические и рациональные качества, которых у него нет. Именно для таких ситуаций, а вовсе не для великих умов, занимающихся основой новой концепции природы, предназначена легкая и безобидная ирония, которую читатель может обнаружить в некоторых разделах книги. С другой стороны, именно потому, что существует различие между *научной истиной, установленной путем рационального мышления, и научной истиной, установленной путем договоренности между профессионалами* (хотя и на очень высоком уровне), необходимо принять вызов и противопоставить многочисленному большинству исключительно силу рационального мышления: *сделать аргументы ясными на том языке, на котором они были бы понятны даже тем, кто не является специалистом непосредственно в данной области, и они могли бы сказать, кто выдвигает понятные и разумные аргументы, а кто, напротив, прикрывается жаргоном.*

Критика взглядов, которые принимают и поддерживают даже самые признанные ученые, является частью научной игры при условии, что критика выражена настолько понятно, что любой человек может оценить аргументы как за, так и против конкретной точки зрения. В настоящее время,

по крайней мере в научном мире, никто бы не стал отрицать а priori, что на человека, который делает открытие, даже очень важное и чреватое последствиями, могут повлиять предрассудки, и поэтому он может прийти к необоснованным выводам. Однако, когда мы переходим от общих рассуждений к конкретной критике *такого-то и такого-то утверждения или такого-то и такого-то ученого*, то, как показывает опыт, неявное (или, используя психологический термин, *удаленное*) дополнение к авторитету *ipse dixit* в науке также распространено гораздо шире, чем мы можем предположить а priori. Тогда, во избежание непонимания и раскола, желательно, чтобы теория была выражена словами ее автора, а не ее критиками. Диалог — это, по-видимому, лучшая из форм для сочетания этой необходимости с легкостью чтения книги.

Есть ситуации, когда наука не ограничивается только изобретением языков и технологий, но посредством преодоления исторически сложившихся предрассудков ведет людей к вытекающей идее на основе фундаментальных концепций, на которых зиждутся устоявшиеся представления о мире. Попытка суммировать основные моменты такой ситуации, абстрагировать от нее основные идеи, отделяя их от технических и теоретических аспектов, может представлять интерес для тех, кто в большей степени интересуется историческим процессом, в ходе которого дискуссия, первоначально ограниченная узким кругом специалистов, породила новую концепцию реальности, законы вероятности, такое понятие, как *экспериментальное знание*, другими словами — новое мировоззрение.

Основной тезис настоящей работы очень прост: интерпретация квантовой теории должна быть изменена, и должна быть изменена сейчас, начиная с университетского образования. Из более чем двадцатилетнего опыта участия в конференциях, из переписки и литературы я хорошо знаю, что первая, инстинктивная реакция специалистов на этот тезис будет отрицательной. Недавно один американский физик-теоретик сказал мне: *«Если Вы скажете человеку, который всю ночь напролет пытался подобрать код к сейфу, почему бы ему не попробовать комбинацию 1, 2, 3, — он разозлится на Вас даже в том случае, если Вы назвали правильную комбинацию»*.

Перечисленные выше замечания, а также важность проблемы отложили публикацию этой книги более чем на десять лет. Такая отсрочка обусловлена не страхом, а моим желанием, чтобы критика старой интерпретации, так же как и описание новой, были бы настолько понятными, чтобы ни одно критическое замечание не осталось бы без ответа. Особенно это касается новых математических результатов (которые были получены в основном в

период 1979–1982 гг.), относящихся к концептуальной и философской стороне, достаточно обширной и определенной, так что можно подтвердить, что она представляет новую интерпретацию новейших современных физических теорий.

Мы также сознательно отказались от использования математических формул: представление данных на концептуальном уровне — это возврат к обычному языку после периода абстрактных представлений.

Читатель найдет в данной книге только очень простые и краткие ссылки на математические результаты, благодаря которым возникла новая интерпретация квантовой теории. Ссылки на специальную литературу позволят всем интересующимся более тщательно изучить связь между этими результатами и концептуальными выводами. Это одна из наиболее привлекательных сторон вопроса, но именно благодаря его природе необходимы технические знания, которые в настоящей книге нам не хочется принимать как нечто само собой разумеющееся. Напротив, если утверждается, что математическая теория поднимает некое новое содержание до уровня философии, и оно имеет отношение к концепции *законов теории вероятностей* и интерпретации квантовой теории, то эти концептуальные новинки должны быть представлены в *оригинальном* виде, без жаргона. Я неоднократно наблюдал попытку скрыть за завесой формул недостаток новых идей. Проблемы интерпретации квантовой теории проистекают из глубоких концептуальных вопросов, и их решения, безусловно, не будут выведены из *специально созданных моделей*, тривиальных для специалистов и недоступных неспециалистам.

К сожалению, некоторая часть современной философии науки, похоже, грешит *комплексом формул* и не уделяет, на мой взгляд, достаточно внимания попытке отделить внутренние трудности от вопросов, связанных с формализмом.

Структура данной книги такова. В первой главе после общей дискуссии о том, чем грозит отделение науки от культуры, описывается странная связь квантовой физики с реальностью. Вторая глава посвящена анализу исторического, концептуального и экспериментального происхождения этой связи и некоторых вытекающих из нее последствий: *так называемых парадоксов квантовой механики*. Этот анализ (и последующая критика) являются одной из отличительных черт настоящей работы по сравнению с имеющейся литературой, в которой суть ортодоксальной интерпретации безоговорочно принимается как теми, кто согласен с ней, так и теми, кто не согласен. Одним из основных вопросов, исследованных в нашей работе,

является следующий: правда ли, что требование физиков отойти от реализма (или локальности или сепарабельности) является непременно следствием результатов, полученных экспериментальным путем. Будет доказано, что ответ на этот вопрос отрицательный. Красота доказательств заключается в их публичном и открытом характере (в конце концов, любое доказательство — это вызов). В математике этот метод срабатывал. Что касается других дисциплин, то там реакция зачастую состояла в возведении словесного барьера в надежде на то, что возможный собеседник не будет обладать в достаточной степени заинтересованностью, компетентностью или энергией для выяснения этого.

В третьей главе начинается критика рассуждений, которые привели к принятой в настоящее время интерпретации квантовой теории. Обсуждаются некоторые, важные с концептуальной точки зрения, вопросы, такие как принцип неопределенности и дуализм волна-частица.

В главе IV рассматриваются взаимоотношения математических моделей с физической реальностью и их отношение к так называемой *проблеме полноты* квантовой механики.

В V и VI главах начинается конструктивная часть работы. В ходе анализа определена посылка вероятностного типа, которая ведет к парадоксам, описанным ранее, а также сформулировано решение, предложенное квантовой вероятностью. В главе VII это предположение сравнивается со всеми остальными, возникавшими в ходе дискуссии, продолжающейся вот уже около ста лет, и взвешиваются все *за* и *против*. В этой главе также обсуждаются концептуальные аспекты *скрытых параметров*.

Глава VIII целиком посвящена работе Дж. С. Белла. Это, возможно, единственная *социологическая уступка* строго рационалистической линии, которой мы придерживаемся в этой книге. Как это можно будет видеть, в хорошо известном *неравенстве Белла* нет ничего нового по сравнению с экспериментом с двумя отверстиями, который обсуждался в главе II. Поэтому со строго научной точки зрения в кратком приложении к главе II необходимо обсудить в качестве примера, помимо множества прочих статистических данных, данные, полученные в экспериментах по квантовой несовместимости, которые не могут быть описаны в рамках одной модели на базе классической теории вероятностей.

Однако, с точки зрения социологии науки, эффект работы Белла был настолько велик, что, говоря о нем, нельзя ограничиться лишь двумя словами. У нас есть все основания верить, что по крайней мере в научной аргументации разум в конце концов будет превалировать над эмоциями, а

общественное мнение не позволит недооценить то влияние, которое могут иметь такие журналы, как *Scientific American*, *Nature*, *Physical Review* в формировании научного мировоззрения, которое в наше время безусловно можно назвать *массовым*.

Заключительная глава IX озаглавлена так же как и сама книга. В ней описано различие между *реализмом черного ящика* и *реализмом хамелеонов*. С концептуальной точки зрения она играет важную роль в интерпретации предложенной здесь теории. На самом деле существование статистических данных, которые нельзя описать в рамках одной модели, построенной на базе классической теории вероятностей, является *фактом*, в то время как существование новых вероятностных моделей а priori касается математики и непосредственно не относится к природе, и различие между этими двумя типами реализма затрагивает *наше мировоззрение* и создает интуитивную основу для интерпретации квантовых явлений. Тот факт, что в течение длительного периода эти явления рассматривались как *странные* или *аномальные*, указывает лишь на то, что неоспоримые теоретические и экспериментальные достижения квантовой теории *предвосхитили формирование некой органичной и устойчивой области*, в пределах которой можно увязать важную концептуальную новизну этой теории с предшествующей научной и философской культурой.

Внутренняя логика теории и ее несомненная плодотворность являются важными, хотя и не достаточными, элементами этой операции.

Утверждение, что в настоящее время ясны основные черты этой ситуации, нельзя интерпретировать как требование прекратить дискуссию, вытекающую из гипотетического *решения всех проблем*, а следует рассматривать как предложение сместить фокус философских взглядов на квантовую теорию в сторону возникающих новых глубоких концептуальных проблем, отбрасывающих те, которые со всем заслуженным уважением к их исторической роли в наше время можно рассматривать как *псевдопроблемы*.

Благодарности

В 1980 г. Джулио Джарелло и Марко Мондатори предложили мне написать для Саджияторе обзор того, каким образом идея квантовой вероятности (появившаяся в то время) повлияла на интерпретацию квантовой теории. Я с энтузиазмом взялся за работу, но вместо нескольких месяцев, на которые я рассчитывал, это предприятие потребовало нескольких лет, и конечный

результат оставил меня настолько неудовлетворенным, что я не стал публиковать его.

Во всяком случае, именно из-за этой неудачной попытки я на личном опыте узнал, каким образом попытка ответить на философские вопросы может привести к доказательству далеко не рядовых математических результатов, которые, в свою очередь, могли бы послужить исходной точкой для рассуждений, имеющих, по всей видимости, мало общего с формулами и теоремами.

В 1991 г. Клаудио Магри обратился ко мне с предложением принять участие в программе *Междисциплинарной лаборатории естественных и гуманитарных наук*, касавшейся семинара *Язык литературы и язык науки*; последовавшая за ним дискуссия продолжалась еще пять часов, она стала поворотным моментом в написании настоящей работы.

После этого случая я осознал, что основной задачей была не новая вероятность или новая интерпретация квантовой теории, но ответ на два замечания Клаудио Магри, высказанные в начале настоящего *диалога*. Поэтому я начал все сначала, сменив установку и введя, кроме всего прочего, форму диалога.

Помимо этих дискуссий, сыгравших вполне определенную, хотя и косвенную роль, при написании настоящей работы, в течение всех этих лет у меня была возможность обмениваться мнениями, в вербальной или эпистолярной форме, со многими людьми, среди которых мне прежде всего хотелось бы вспомнить безвременно ушедшего Альберто Фриджеро, а затем — Игоря Воловича, Лу Юнь Ганга, Артура Файна, Нэнси Картрайт, Витторио Горини, Гвидо Асколи, Роландо Реболledo, Франческо Герра, Эдоардо Ревильо, Ульриха Оберста, Франко Фаньолу, Гвидо Рицци, Алессандро Лайо, Рудольфа Кальмана, Карло Чеккини, Джеффри Уотсона, Даниелу Дорн, Людовико Джеймоната, Джино Тароцци, Микио Намики, Сандро Ауридиккио, Луиджи Гальгани и многих других, которых невозможно вспомнить поименно.

Как при развитии любой научной теории, так и в этом случае критика и полемика сыграли фундаментальную роль, и все вопросы, которые читатель найдет в этом *диалоге*, в действительности были поставлены во время многочисленных семинаров, возникали на конгрессах, обсуждались с докладчиками или в обычных беседах, которые мне случалось вести во многих частях мира на эти темы вот уже почти тридцать лет.

История всегда опровергала претензии на то, чтобы *сделать все* по какому-то вопросу. Критерии, которым следует настоящая работа, можно

было бы определить как *исчерывающая критика*, а вдохновлявшие ее принципы можно описать следующим образом: отделить концептуальную новизну от чисто технического содержания и сделать предметом обсуждения именно ее. Что касается техники, то заинтересованный читатель может обратиться к вышеупомянутым специалистам и научным сборникам, посвященным этой теме.

*Луиджи Аккарди,
Кортин д'Ампреццо,
27 августа 1995 года*

Дискуссия «in pace» (о сути проблемы)

Настоящий раздел является кратким комментарием к тексту, который поможет читателю получить цельное представление об основах квантовой теории с помощью схематичного перечня основных проблем. Сокращение *ОИ* означает *ортодоксальную интерпретацию*, в скобках указаны соответствующие разделы книги.

0) Могут ли научные идеи освободиться от жаргона и технических подробностей? Должны ли они хотя бы попытаться это сделать? (I.1, I.2.)

1) Согласно *ОИ*, ненаблюдаемые объекты не существуют. Например, хамелеон, которого не наблюдают, не имеет окраски. В этом смысле говорят, что *квантовая теория отрицает реализм* (I.3).

2) Предыдущее утверждение является переводом с жаргона следующей фразы: в состоянии суперпозиции в отношении наблюдаемого (например, окраски) такое наблюдаемое не может иметь хорошо определяемое значение. Это, в свою очередь, связано с *дуализмом волна – частица* (II.1, II.2).

3) Экспериментальные данные показывают, что наблюдаемые, которые находятся под наблюдением, всегда имеют хорошо определяемые значения.

4) *ОИ* примиряет (2) и (3) с помощью утверждения, что процедура измерения создает значения: до определения окраски у хамелеона было только виртуальное значение, которое стало реальным в результате случайного выбора между двумя возможностями в момент измерения. Такой переход от виртуального к реальному называется *разрушением (коллапсом) волнового пакета или объективфикацией* (II.3, II.4).

5) Пункт 4 приводит к парадоксам типа *микроскопический – макроскопический*: Вы состоите из атомов, и если я не определяю положения Ваших атомов, то у Вас нет и значения, т. е. Вы нигде не находитесь. Отсюда вывод: если я Вас не наблюдаю, Вы не существуете (II.6, II.7).

6) *Макрореалисты* видят в этом количественный вопрос: поскольку и Вы, и луна состоите из множества атомов, различие между реальным существованием и виртуальным ничтожно мало, или имеет ничтожно малую продолжительность. Легко быть счастливым, если для счастья нужно совсем немного.

7) Если бы Вы состояли из нескольких атомов, то Вы должны были бы согласиться со своим виртуальным существованием в том случае, если я Вас не наблюдаю. Учитывая это, макрореалисты называются также *микронереалистами* (II.8).

8) Пункт 4 также приводит к парадоксам типа *мгновенного создания свойств на расстоянии* или парадоксов Эйнштейна – Подольского – Розена: два хамелеона-близнеца всегда имеют одну и ту же окраску, и это является *внутренним* свойством хамелеонов (*реализм черного ящика*, см. пункт 22). Вы помещаете хамелеонов в два разных ящика, везете одного из них из Рио-де-Жанейро в Рим и создаете окраску хамелеона, находящегося в нем, тем, что наблюдаете за ним. Поскольку окраска обоих хамелеонов всегда одна и та же, посредством исследования окраски в Риме Вы моментально создаете физическое свойство в Рио-де-Жанейро (II.9).

9) Теория относительности отрицает возможность мгновенного создания в Рио-де-Жанейро физического свойства с помощью процедуры, осуществляемой в Риме. Это называется *принципом локальности*.

10) Рассуждения, изложенные в пункте 8, показывают, что ОИ квантовой механики (пункт 4) противоречит теории относительности (пункт 9): это пресловутая *нелокальность* квантовой теории (II.10) (хотя корректнее говорить о нелокальности ОИ).

11) Сторонники ОИ считают это противоречие несущественным, потому что, по их мнению, это *всего лишь* противоречие в принципе и его нельзя использовать для создания телевизионных программ, распространяющихся быстрее скорости света. Есть люди, которых такие *объяснения* вполне удовлетворяют.

12) Почему защитники ОИ энергично отстаивают пункт 4, несмотря на то, что он порождает все эти парадоксы?

13) Пункт 4 обусловлен попыткой примирить пункты 2 и 3. Поскольку в пункте 3 говорится об очень хорошо подтвержденных экспериментальных данных, ничего не остается, кроме как сосредоточить всю критику на пункте 2, а именно: почему ОИ настаивает на том, что ненаблюдаемые объекты не существуют?

14) Среди всех подходов к основам квантовой теории выделяется подход, основанный на квантовой вероятности, поскольку он рассматривает этот вопрос как точку отсчета и видит в нем источник всех так называемых квантовых парадоксов. (V.1.)

15) Лишь малая доля всей литературы по основам квантовой теории посвящена непосредственно ответу на вопрос, сформулированный в пункте 13.

16) Согласно квантовой вероятности, ОИ: а) неправильно применяет правила классической теории вероятностей к статистическим данным, полученным в ходе несовместимых экспериментов (VI.1); б) не учитывает в своем понимании *физической реальности* различие между черным ящиком и хамелеонами (IX.2).

17) Гейзенберг, а затем и Фейнман были первыми, кто попытался *доказать* необходимость отрицания реализма (в том смысле, который изложен в пунктах 1 и 2). Их анализ является основой ОИ (V.1). Суть их аргументации состоит в следующем: если реализм сохранится, то не будет *интерференционных членов*; поскольку существование этих членов безоговорочно подтверждено экспериментально, необходимо отойти от реализма. Аргументы, подобные тем, которые предложил Белл, являются вариантами этой же идеи.

18) Обычно вывод, следующий из анализа Гейзенберга и Фейнмана, принимается за точку отсчета. Сторонники ОИ соглашались с противоречиями, вытекающими из такого вывода и согласующимися с тем фактом, что *они являются противоречиями только в общем и не имеют практического эффекта*. Сторонники детерминизма, напротив, тщетно пытались искать альтернативные корни или паллиативы, неудовлетворительные с концептуальной точки зрения.

19) Квантовая вероятность (КВ) сосредоточена на источнике проблемы и иначе формулирует вопрос пункта 13: правда ли, что эти глупости и эти противоречия являются *непрерывным следствием основных законов и экспериментальных данных*? Ответ *отрицательный*, и это уничтожает на корню все парадоксы. (VI.1.)

20) Сущность доказательства Гейзенберга и Фейнмана (эксперимент с двумя отверстиями) заключается в том, что, если наблюдаемые, *которых не наблюдают*, имеют хорошо определяемые значения, некоторые статистические данные должны удовлетворять точному соотношению. Поскольку эксперименты доказывают, что этого не происходит, мы должны заключить, что наблюдаемые, на которые не *смотрят*, не имеют четких значений. Именно в этом вопросе неразрывно переплелись основы теории вероятностей и квантовой теории (V.1).

21) Статистические данные, на которые ссылаются Гейзенберг и Фейнман, получены с помощью *вычисления относительных частот*. Соотношения, которые согласно этим авторам *должны выполняться*, являются следствием некоторых свойств классической теории вероятностей, которые обычно подтверждаются на основе вычислений относительных частот.

КВ выделяет в анализе Гейзенберга и Фейнмана (а также Белла) скрытый постулат о том, что статистические данные, полученные в несовместимых экспериментах, могут быть описаны в рамках одной модели, построенной на классической теории вероятностей. Чему на самом деле противоречат эксперименты — так это не реальности или локальности, а лишь этому скрытому (т. е. неявному) допущению.

22) Примерно через 25 лет после Гейзенберга и Фейнмана Белл обнаружил другой пример статистических данных, которые, *согласно теории*, должны удовлетворять определенному соотношению (знаменитому неравенству Белла), но которые в эксперименте не удовлетворяют ему (VII.4).

23) Белл не заметил концептуальную идентичность этих двух аргументов и думал, что новизной его эксперимента по сравнению с ОИ является принцип локальности. Благодаря его работе старый тезис о том, что квантовая теория нарушает принцип локальности взаимодействия, приобрел новую силу. В настоящее время можно доказать, что это утверждение ничем не оправдано, поскольку точно такой же результат можно получить, не вводя допущение Белла, обычно называемое *локальностью*. Из этого совершенно очевидно следует, что это допущение не важно для такого вывода (VIII.3, VIII.5).

24) Перед лицом такого неоспоримого факта некоторые фанатики от квантовой нелокальности весьма свободно используют термин *локальность* для обозначения условия чувствительности к граничным условиям (которые на жаргоне основ квантовой теории часто называются *контекстными*). Такое представление не имеет ничего общего с *релятивистской локальностью* (VIII.5). Напротив, современная квантовая теория измерений безусловно может выражать принцип локальности. То, каким образом это можно осуществить, изложено в разд. IX.5 и IX.7.

25) Некоторые авторы, воодушевленные результатом Белла, предложили изменить ОИ следующим образом: вместо того, чтобы говорить о том, что экспериментальные данные квантовой теории несовместимы с реализмом (*если я Вас не наблюдаю, то Вы и не существуете*), они предлагают говорить, что не совместимы три следующие вещи: экспериментальные данные квантовой теории, реализм и принцип локальности. Мы это будем называть *НеоОртодоксальной Интерпретацией* (НОИ).

26) С точки зрения того, о чем говорилось в пункте 8, не понятно, является ли НОИ шагом вперед по сравнению с ОИ, вернее с одним из ее выводов.

27) Несколько попыток привести статистические данные квантовой теории в соответствие с чисто классическим контекстом (*групповая интерпретация*, пристрастие Поппера) ничего не добавили к пониманию проблемы возникновения интерференционных членов, поднятой Гейзенбергом и Фейнманом (пункт 17) (II.5, VII.3, VIII.1).

28) Точно также бесчисленные в настоящее время модели *скрытых параметров* отнюдь не способствуют решению этой проблемы, поскольку для каждого набора экспериментальных данных (в зависимости от условий подготовки и проведения эксперимента и т. д.) они создают другую модель (вероятностную или детерминистскую). Но формулировка проблемы, изложенная в пункте 17 (т. е. объяснение интерференционных членов), настолько строгая, что не допускает никакого (классического) решения и изменяется таким образом, что позволяет существовать бесконечно большому количеству решений, отличающихся друг от друга, и объединенных тем, что их предсказания, которые можно проверить только экспериментальным путем, совпадают с *исходной теорией*, т. е. обычной квантовой теорией. В этом смысле они иногда называются *теориями-паразитами* (VII.4).

29) В науке неполное, неудовлетворительное и явно парадоксальное решение лучше, чем многие чисто вербальные псевдорешения, которые *решают проблему тем, что игнорируют ее* или просто скрывают ее за бесконечными напыщенными учеными, но неубедительными речами. С этой точки зрения ОИ со всей своей противоречивостью намного лучше, чем все то, о чем говорилось в пунктах 27 и 28.

30) Доказательство Гейзенберга и Фейнмана основано на вычислении относительных частот, которые вытекают из модели черного ящика (экспериментатор *пассивно записывает то, что получилось*). С математической точки зрения это то же самое, что подразумевать существование связанных вероятностей, из которых можно получить условные вероятности, полученные в трех несовместимых экспериментах (IX.1).

31) Реализм черного ящика базируется на экспериментальных данных, упомянутых выше в пункте 3, и сводится к следующему: поскольку система не может знать, какое наблюдаемое я собираюсь измерить, и поскольку, какое бы наблюдаемое я не измерял, я всегда нахожу значение, которое могу хорошо определить, то, следовательно, наблюдаемое должно иметь именно такое же, хорошо определяемое значение даже в том случае, если я его не измеряю (антифактический аргумент). Реализм Эйнштейна — это реализм черного ящика (IX.1).

32) Реализм хамелеонов допускает простые контр-примеры антифактических аргументов. Давайте возьмем пару хамелеонов-близнецов, один из которых — мутантный, т. е. коричневый на листе и зеленый на суку. Допустим, что такая пара хамелеонов находится в *синглетном* состоянии (относительно окраски). Давайте поместим их в два различных ящика и дадим эти ящики двум экспериментаторам. Каждый экспериментатор не знает, находится в его ящике мутант или нет, поэтому они оба предполагают, что при помещении пищи на лист, вынутый из ящика, хамелеон будет иметь зеленую окраску с вероятностью $1/2$. Если один экспериментатор видит, что его хамелеон, находящийся на листе, — зеленый, какой вывод он должен сделать о втором хамелеоне? Реализм черного ящика заставил бы его заключить, что второй хамелеон — *коричневый*. Это именно тот вывод, к которому пришли Эйнштейн, Белл, д'Эспанья и Шимони. Но правильный вывод заключается в том, что второй хамелеон, *если его наблюдают на листе, обязательно будет коричневым* (реализм хамелеонов). К хамелеонам нельзя применять антифактический аргумент.

Не было бы ошибкой, если бы мы говорили о шарах вместо хамелеонов (именно аналогия с шарами вдохновила этих авторов). Тут мы имеем нетривиальный пример того, как искусственное ограничение (реализм = реализм черных ящиков) может привести к конкретной ошибке в научных рассуждениях. Шар *пассивен*, а хамелеон *адаптивен*. Из этого следует, что подсчет событий, связанных с хамелеонами, не может следовать тем же правилам, что и подсчет событий, связанных с шарами.

Мы можем заменить отрицательное выражение (*у Эйнштейна и Белла не было права делать такой вывод о том, что...*) на положительное: *сочетая теорию с экспериментами, можно доказать, что реализм черного ящика отличается от реализма хамелеонов.*

Для этого недостаточно метафоры с хамелеоном, и мы должны обратиться к законам теории вероятностей как к *статистике подсчетов несовместимых экспериментов*. Такой тип статистики не рассматривался в классическом контексте, где понятие *несовместимые эксперименты* не является естественным путем.

33) В квантовой теории эксперимент может выступать в качестве *подготовительного этапа* к следующему эксперименту, несовместимому с предыдущим; в этом случае мы говорим о *статистике несовместимых экспериментов*. А priori нельзя сказать, можно ли применять законы классической теории вероятностей к этим данным. Решение можно принять только a posteriori, поскольку результаты экспериментов выражены в тер-

минах подсчета. Математика *статистических инвариантов*, к которой ведет такое решение, может сильно усложниться при повышении сложности эксперимента. Однако основную идею можно проиллюстрировать двумя очень простыми примерами: двойным отверстием (VI.2) и неравенством Белла (VIII.6).

Шаг вперед, сделанный КВ (квантовой вероятностью) по сравнению с ОИ и НОИ, заключается в следующем: для того, чтобы объяснить противоречие между экспериментальными данными и теоретическими выкладками, Бор предложил ввести понятие *нереализма*; Белл предложил ввести понятие *нелокальности*; КВ доказывает, что при использовании неклассической статистики в описании данных, полученных в несовместимых экспериментах, не может возникать никаких парадоксов.

34) Хамелеоны полезны и для разоблачения другого мифа, а именно, что квантовая теория несовместима с детерминизмом (IX.3). Все описанное в пункте 32 является детерминистским: реакция каждого хамелеона, а также то, что каждый экспериментатор выбирает либо лист, либо сук. Тем не менее ни одно из действующих лиц не может удержаться от того, чтобы не ввести статистический элемент в описание ситуации: экспериментатор не знает, является ли находящийся в ящике хамелеон мутантным или нет; хамелеон не знает, нужно ли ему реагировать на сук или на лист. Если Господь играет в кости, это может произойти только в том случае, когда принимается решение, какой хамелеон движется в одном направлении, а какой в другом; все остальное должно быть детерминистским (см. пункт 36). Многие путают *индетерминизм с необходимостью статистического описания*. Первое относится к *природе*, второе — к нам как знатокам сути вещей (VIII).

35) Детерминизм черного ящика *не ограничен условиями*: в момент отделения друг от друга один шар — белый, а второй — красный, и они остаются такими все время. Детерминизм хамелеона *условный*: в момент отделения друг от друга каждый решает а priori *что будет, если он окажется на листе или на суку*. Почему последняя статистика отличается от первой? В этом случае имеет место физика как взаимодействие с окружающей средой (IX.5).

36) Можно ли *доказать, что кость нужно подбросить до измерения*, а не как в случае ОИ, в момент измерения? Иногда — да. Примером является дискуссия ЭПР: если хамелеон ждал, чтобы увидеть лист или сук для того, чтобы решить, вести себя как мутант или нет, то мы будем иметь только две возможности:

а) хамелеоны-близнецы, находящиеся на расстоянии друг от друга, общаются мгновенно (нарушая принцип локальности), сохраняя синглетную связь, т. е. при одних и тех же условиях, один хамелеон всегда приобретает окраску, противоположную окраске второго хамелеона;

б) синглетная связь между двумя хамелеонами-близнецами имеет значение не в строгом, а лишь в статистическом смысле.

Вторая возможность не совместима с экспериментами (согласно которым закон синглетности строго соблюдается). Из этого следует, что *либо мы отбрасываем локальность, либо соглашаемся с тем, что кости подбрасываются до измерения, а детерминизм применяется после (IX.3).*

Поскольку принцип локальности получил множество независимых подтверждений и ни один физический закон не был бы нарушен при принятии детерминизма (после подбрасывания кости), в выборе альтернативы не должно быть никаких сомнений.

37) Должны ли мы сделать вывод, что квантовая теория, которая не может описать такой детерминизм, является *неполной*, и что поэтому Эйнштейн был прав? Она *неполная в отношении природы* и *полная в отношении человеческих возможностей познания*. По крайней мере до тех пор, пока принцип неопределенности не будет опровергнут. Гордость рационалиста, которую символизирует знаменитое высказывание Лапласа, необходимо смягчить: *человек должен согласиться с тем, что его знание в принципе не может быть таким же, как знание Господа Бога (VI.1, VIII).*

38) Современная физика должна определять Бога как существо, которое может получать информацию о природе, не взаимодействуя с ней, и поэтому не должно подчиняться принципу Гейзенберга. Такое определение в принципе является *метафизическим*, т. е. находится за пределами того, что можно вообразить на основании современных знаний.

39) Детерминизм, существование которого мы доказали в пункте 27, начинается только *после принятия решения, в каком ящике будет находиться нормальный хамелеон. Но что мы можем сказать об этом выборе?* Он также основан на детерминистском соглашении между хамелеонами или это является результатом *подбрасывания кости* — внутренним детерминизмом? Следствием принципа неопределенности Гейзенберга является то, что по этому поводу наука не может выразить своего мнения, не потому что *в настоящее время* мы недостаточно знаем об этом, а потому, что такое различие невозможно в принципе. Принцип Гейзенберга говорит не о том, что Господь играет в кости, а о том, что человек на основании эксперимента не может решить, делает он это или нет.

40) Эйнштейн надеялся, что человеку хотя бы позволено преодолеть это узкое место с помощью спекулятивной интуиции. В принципе это не невозможно, но не в отношении физики, если только она на основании экспериментов не выявит различий между двумя теориями, предсказания которых различны. Предположим, у Вас есть такая интуиция, и предположим, дьявол зарождает у Вашего коллеги иную интуицию, задуманную таким образом, что она также согласуется с предсказаниями квантовой теории. Вы знаете, что Вы правы, но если принцип неопределенности верен, Вы никогда не сможете доказать с помощью экспериментов, что теория, соперничающая с Вашей, неверна (VII.3, IX.4). Эта ситуация не создана искусственным путем: взаимоотношения между огромным количеством существующих теорий скрытых параметров имеют точно такую же форму, которая описана выше. В своих формулировках наблюдаемого все они согласуются с квантовой теорией, а в формулировках ненаблюдаемого все они не согласуются друг с другом.

41) Возможно, именно по этой причине будут продолжаться попытки опровергнуть принцип неопределенности, также как и будут продолжаться попытки опровергнуть второй закон термодинамики.

42) Принцип Гейзенберга на самом деле является ядром квантовой физики не только в концептуальной терминологии, но и в строго математическом смысле: этот принцип можно выразить *внутренним* способом, т. е. независимо от математической модели, а затем из такой формулировки вывести всю математическую модель теории. Это является достижением квантовой вероятности (VIII).

43) Вывод математической модели теории из набора аксиом, значение которых не зависит от самой модели, создает то, что называется *аксиоматизацией* теории.

44) Аксиоматизация теории означает строгое отделение того, что принято, от того, что было выведено.

45) Научная дисциплина достигает своей зрелости тогда, когда ее можно аксиоматизировать.

46) Благодаря этому проблема аксиоматизации квантовой теории сливается с проблемой аксиоматизации вероятности настолько, насколько теория относительности объединяет аксиоматизацию гравитации с аксиоматизацией геометрии. При наличии большой концентрации масс мы предполагаем наличие неевклидовой геометрии. Если имеются причины подозревать, что новая информация, полученная экспериментальным путем, уничтожает ранее полученную информацию, мы предполагаем в этом случае неклассиче-

скую теорию вероятностей. В обоих случаях наше предположение можно сравнить с экспериментальными данными.

47) Вывод квантовой теории из ограниченного количества *физически значимых* аксиом, *независимых от модели*, является не просто математической процедурой, а имеет еще и концептуальное значение: если я могу интерпретировать аксиомы, не отказываясь ни от реализма, ни от локальности, то я могу сделать то же самое для всей теории, потому что *ни одна теория не требует для своей интерпретации больше, чем необходимо для интерпретации ее аксиом*.

48) Могут ли в научной дискуссии скрываться элементы иррационализма? В течение короткого отрезка времени, вероятно, могут, но со временем возобладает разум. Так действует вера. Таким образом, борьба за рационализм должна основываться на вере. А это — урок смирения.

Именной указатель

- Аккарди (Accardi L.) 172, 258, 288, 348, 351, 362, 422
Аристотель (Aristotele) 197, 303
Асколи (Ascoli G.) 431
Аспект (Aspect) 118, 122, 278, 315, 333, 334
Аурисиккио (Auriscichio S.) 431
Аэртс (Aerts D.) 386
- Байес (Bayes T.) 232, 238
Баллентайн (Ballantine Leslie E.) 89, 259, 260
Барут (Barut O. A.) 294
Баттерфилд (Butterfield J.) 351
Бауэр (Bauer E.) 96, 141
Бафико (Bafico R.) 14, 81, 96
Белинфанте (Belinfante F. J.) 146
Белл (Bell J. S.) 28, 84, 112, 118, 120, 122, 140, 148, 152, 161, 188, 271, 278, 309, 315, 316, 329, 336, 344, 352, 392
Белтраметти (Beltrametti Enrico G.) 278
Бенеттин (Benettin G.) 294
Беннет (Bennet C.) 115
Берман (Berman P. R.) 260
Бернардини (Bernardini C.) 70, 107, 112, 117, 312, 316
Бернулли (Bernoulli J.) 272
Бильбо (Bilbo) 287
- Биркхофф (Birkhoff G.) 218, 220
Блок (Block E.) 260
Богданов (Bogdanov I. e G.) 124, 126, 132, 146
Боллингер (Bollinger J. J.) 259
Больцман (Boltzmann L.) 234, 235
Бом (Bohm D.) 65, 92, 124, 295–298
Бор (Bohr N.) 36, 46, 77, 96, 101, 126, 134, 166, 187, 189, 190, 197, 289
Борн (Born M.) 129, 181, 182, 187
Боцци (Bozzi P.) 23
Брассард (Brassard G.) 115
Браун (Brown R.) 131
Брауни (Browne M. W.) 25
Буб (Bub J.) 65, 92
- Вайнланд (Wineland D. J.) 259
Ван Фрассен (Van Frassen B. C.) 136, 137
Ван ден Берг (Van der Berg H.) 284, 362
Ван дер Мерве (Van der Merwe A.) 293
Вебер (Weber T.) 105, 421
Вейль (Weyl H.) 22, 61, 183, 290
Вигнер (Wigner E.) 47, 96, 140, 141, 145, 355
Волович (Volovich I.) 422, 431
- Галилей (Galilei) 33, 39, 52, 150, 303
Галлино (Gallino L.) 53

- Гальгани (Galgani L.) 294, 431
 Ганг (Gang L. Y.) 431
 Гарош (Haroche S.) 374
 Гаруччио (Garuccio) 309, 315, 332
 Гвиттон (Guitton J.) 125, 133, 146, 147
 Гейзенберг (Heisenberg W.) 46, 48, 52, 77, 96, 101, 129, 134, 181, 186, 190, 192, 196, 197, 203, 227, 236, 256, 292, 375
 Геллман (Gell-Mann) 262
 Герберт (Herbert N.) 52, 62, 65, 76, 88
 Герра (Guerra F.) 172, 306, 431
 Гильберт (Hilbert D.) 126, 224
 Гиорелло (Giorello G.) 38
 Голдсмит (Goldsmith M.) 139
 Горвиц (Horwitz L. P.) 257
 Горини (Gorini V.) 431
 Греко (Greco P.) 45, 134, 147, 148, 157, 260, 317
 Гунтини (Giuntini R.) 406
 Гюйгенс (Huyghens C.) 303

 Д'Эспанья (d'Espagnat B.) 45, 71, 82, 137, 140, 357, 366, 384, 392
 Дайсон (Dyson F. J.) 44, 110
 Даламбер (D'Alembert) 37
 Далибар (Dalibard) 315, 333, 334
 Далла Чиара (Dalla Chiara M.) 406
 Данери (Daneri A.) 103
 Де Бройль (De Broglie L.) 295, 296, 298
 Де Финетти (De Finetti B.) 272
 Джаммер (Jammer M.) 178
 Джеймонат (Geymonat L.) 431
 Джейнс (Jaynes E. T.) 22, 31, 47, 57, 181, 294
 Джонс (Jones M.) 353
 Джордан (Jordan P.) 88, 224
 Ди Кастро (Di Castro C.) 172
 Дикс (Dieks D.) 178
 Динер (Diner S.) 258
 Дирак (Dirac P. A. M.) 234
 Донини (Donini E.) 245
 Дорн (Dohrn D.) 439

 Жирарди (Ghirardi G.) 316, 337
 Жирарди (Ghirardi G. C.) 44, 50, 91, 105, 112, 117, 132, 282, 421
 Занотти (Zanotti M.) 221
 Зоммерфельд (Sommerfeld T.) 234
 Зурек (Zurek W. H.) 181, 262

 Итано (Itano W. H.) 259

 Калдейра (Caldeira A. O.) 103, 374
 Кальман (Kalman R.) 431
 Кант (Kant E.) 186
 Капра (Capra F.) 148
 Картрайт (Cartwright N.) 69, 72, 73, 350, 431
 Кассинелли (Cassinelli G.) 278
 Кацнельсон (Katznelson E.) 257
 Кеплер (Keplero) 303
 Киатти (Chiatti L.) 103
 Клаузер (Clauser) 315, 332
 Колмогоров (Kolmogorov A. N.) 234, 238
 Колодни (Colodny G.) 42
 Коперник (Copernico) 303
 Кроче (Croce B.) 277
 Кук (Cook R. J.) 258
 Купман (Koopman) 268
 Кушинг (Cushing J. T.) 351
 Кэмбл (Kemble E.) 72

- Лайо (Laio A.) 431
Лакатос (Lakatos I.) 38
Ланц (Lanz L.) 105, 421
Лаудиса (Laudisa F.) 406
Леви-Леблонд (Levy-Leblond) 183
Леже (Leggett A. J.) 101, 103, 374
Леплин (Leplin J.) 138
Лойнгер (Loinger) 103
Лондон (London H. A.) 96, 141
Лоренц (Lorentz H. A.) 68
Лошак (Lochak G.) 158, 183
Лу (Lu Y. G.) 422
Людвиг (Ludwig G.) 96, 105, 421
- Магги (Maggi M.) 107
Магрис (Magris C.) 13
Макки (Mackey G. W.) 245
Максвелл (Maxwell J. C.) 303
Манго (Mungo P.) 115
Маргенау (Margenau H.) 89, 92, 96, 110
Марлоу (Marlow A. R.) 67
Массаренти (Massarenti A.) 157
Мермин (Mermin D.) 45, 96
Мисра Бадьянат (Misra Baidyanath) 258
Миттельштедт (Mittelstaedt P.) 86–89
Муллин (Mullin E. Mc) 351
- Намики (Namicki M.) 251, 421, 431
Нельсон (Nelson E.) 306
Нордхайм (Nordheim L.) 224
Норт (North J. D.) 305
Ньютон (Newton I.) 303
- Оберст (Oberst U.) 431
Оппенгеймер (Oppenheimer R.) 148
- Паис Абрахам (Pais Abraham) 96, 181, 375
Паризи (Parisi G.) 29
Пароди (Parodi M.) 14, 81, 96
Пасказио (Pascasio S.) 251, 421
Паули (Pauli W.) 78, 80, 181, 189
Пенроуз (Penrose R.) 43
Перес (Peres A.) 94, 260, 342, 366
Перл (Pearle P.) 421
Перрен (Perrin) 235
Пирон (Piron) 278
Пит (Peat F. D.) 101
Планк (Planck M.) 193
Подольский (Podolsky) 109, 151, 152, 154
Поппер (Popper K.) 14, 19, 36, 47, 53, 76, 77, 89, 107, 118, 136, 156, 187, 189, 190, 298, 320
Поссенти (Possenti) 157
Просперо (Prosperi G. M.) 103, 105, 196, 421
Пруст (Proust M.) 280
Птолемей (Tolomeo) 303
Пульчинелли (Pulcinelli C.) 81
Путнам (Putnam H.) 42, 45, 47, 67, 80, 88, 96, 97, 99, 103, 169, 171, 189, 288
Пьятелли-Палмарини (Piattelli-Palmarini M.) 48, 51, 61
- Раддер (Radder H.) 284, 362
Рамсей (Ramsay) 272
Раписард (Rapisarda) 315, 332
Рассел (Russell B.) 130, 131, 134
Реболledo (Rebolledo R.) 431
Ревильо (Reviglio E.) 431
Редже (Regge T.) 109, 111, 112, 118, 123, 129, 186

- Ривера (Rivera A. L.) 258
 Римини (Rimini A.) 105, 421
 Рицци (Rizzi G.) 431
 Роджер (Roger) 315, 333, 334
 Розен (Rosen) 109, 151, 152, 154
 Рон (Ron A.) 260
 Руббиа (Rubbia C.) 18
 Рюэль (Ruelle D.) 278, 279
- Селлери (Selleri F.) 321
 Серва (Serva M.) 103
 Смолуховский (Smoluchowski) 236
 Сокал (Sokal A.) 16
 Солвей (Solvay) 108
 Стайн (Stein H.) 136
 Стапп (Stapp H. P.) 312, 317, 355
 Сударшан (Sudarshan G.) 258
 Суппес (Suppes P.) 220, 221
 Сэвидж (Savage L. J.) 272
- Тароцци (Tarozzi G.) 293, 431
 Тейлор (Taylor G. I.) 65
 Томпсон (Thompson) 315, 332
- Уилер (Wheeler J. A.) 67, 68, 80, 111, 129, 132
 Уотсон (Watson G.) 431
- Файн (Fine A.) 53, 138, 176, 185, 244–246, 323, 350, 351, 431
 Фаньола (Fagnola F.) 431
 Фарабод (Pharabod J. P.) 153
 Фейнман (R. P.) 57–61, 68, 70, 89, 129, 134, 148, 196, 197, 203, 211, 214, 215, 224, 228, 229, 233, 237, 238, 256, 300
 Финкельштейн (Finklestein D.) 267
 Фон Мизес (Von Mises) 272
- Фон Нейман (Von Neumann J.) 218, 220, 224, 234, 245, 272, 308
 Форман (Forman P.) 181, 182
 Фрай (Fry) 315, 332
 Фрерих (Frerich V.) 258
 Фриджеро (Frigerio A.) 421, 431
 Фридман (Freedman) 315, 332
- Хартл (Hartle J. B.) 262
 Хельвиг (Hellwig K. E.) 258
 Хеп (Hepp K.) 421
 Хили (Hiley B. J.) 101, 224
 Хокинг (Hawking S.) 43
 Холтон (Holton G.) 21
 Хона-Ласинио (Jona-Lasinio G.) 172
 Хорн (Horne C.) 351
 Хортоли (Hortoli S. H.) 153
 Хоэкзема (Hoekzema D.) 284, 362
 Хукер (Hooker C. A.) 267
- Церрато (Cerrato S.) 99
- Чанг (Chang H.) 69
 Чеккини (Cecchini C.) 431
 Чини (Cini M.) 103
 Чумаков (Chumakov S. M.) 258
- Шенцль (Schenzle A.) 258
 Шильп (Schilpp Paul A.) 54, 289
 Шимони (Shimony A.) 57, 77, 113, 120, 123, 136, 148, 190, 311, 316, 319, 323, 330, 333, 375, 392, 397
 Шрёдингер (Schrödinger E.) 13, 36, 53, 77, 98, 179, 299
 Штраусс (Strauss M.) 267
 Шульман (Schulman L. S.) 421
- Эверетт (Everett) 130, 131, 134

- Эйнштейн (Einstein A.) 20, 36, 53, 54, 77, 96, 107–109, 132, 151–152, 154, 181, 182, 187, 188, 236, 289, 292, 303, 314, 344
- Экеланд (Ekeland I.) 183
- Эккерт (Eckert A.) 115
- Экс (Ax J.) 251
- Яух (Jauch J. M.) 233, 237

Интересующие Вас книги нашего издательства можно заказать почтой или электронной почтой:

subscribe@rcd.ru

Внимание: дешевле и быстрее всего книги можно приобрести через наш Интернет-магазин:

<http://shop.rcd.ru>

Книги также можно приобрести:

1. Москва, ФТИАН, Нахимовский проспект, д. 36/1, к. 307,
тел.: 332-48-92 (почтовый адрес: Нахимовский проспект, д. 34)
2. Москва, ИМАШ, ул. Бардина, д. 4, корп. 3, к. 414, тел. 135-54-37
3. МГУ им. Ломоносова (ГЗ, 1 этаж)

4. Магазины:

Москва: «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40)

«Московский дом книги» (ул. Новый Арбат, 8)

«Библиоглобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6)

Книжный магазин «ФИЗМАТКНИГА» (г. Долгопрудный,

Новый корпус МФТИ, 1 этаж, тел. 409-93-28)

С.-Пб.: «С.-Пб. дом книги» (Невский пр., 28)

Луиджи Аккарди

ДИАЛОГИ О КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ **ГЕЙЗЕНБЕРГ, ФЕЙНМАН, АКАДЕМУС, КАНДИДО** **И ХАМЕЛЕОН НА ВЕТКЕ**

Дизайнер М. В. Ботя

Технический редактор А. В. Широбоков

Компьютерная верстка С. В. Высоцкий

Корректор А. В. Соколова

Подписано в печать 15.07.04. Формат 60 × 84¹/₁₆.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 26,04. Уч. изд. л. 25,81.
Гарнитура Таймс. Бумага офсетная №1. Заказ №118.

АНО «Институт компьютерных исследований»

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

<http://shop.rcd.ru> E-mail: mail@rcd.ru
