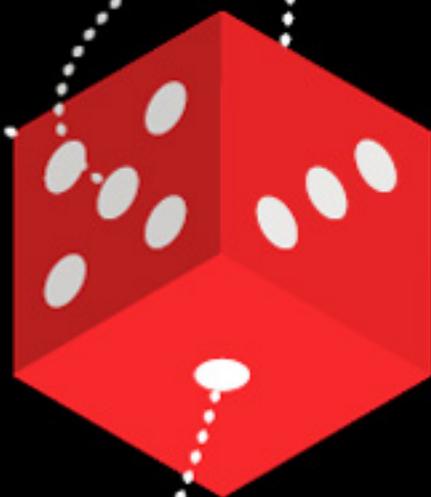


Николя Жизан

# Квантовая случайность

Нелокальность,  
телепортация  
и другие  
квантовые  
чудеса





Вы смогли скачать эту книгу бесплатно на законных основаниях благодаря проекту **«Дигитека»**. [Дигитека](#) — это цифровая коллекция лучших научно-популярных книг по самым важным темам — о том, как устроены мы сами и окружающий нас мир. Дигитека создается командой научно-просветительской программы [«Всенаука»](#). Чтобы сделать умные книги доступными для всех и при этом достойно вознаградить авторов и издателей, «Всенаука» организовала всенародный сбор средств.

Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин  
Алексей Сейкин  
Николай Кочкин  
Роман Гольд  
Максим Кузьмич  
Арсений Лозбень  
Михаил Бурцев  
Ислам Курсаев  
Вадим Мельников  
Павел Дорожкин  
Артем Шевченко  
Валерий Окулов  
Евгений Шевелев  
Александр Анисимов  
Роман Мойсеев  
Евдоким Шевелев

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую и организационную помощь:

Российскую государственную библиотеку  
Компанию «Яндекс»  
Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

*Этот экземпляр книги предназначен только для вашего личного использования. Его распространение, в том числе для извлечения коммерческой выгоды, не допускается.*

Николя Жизан

# Квантовая случайность

Нелокальность,  
телепортация  
и другие  
квантовые  
чудеса

Nicolas Gisin

# QUANTUM CHANCE

Nonlocality,  
Teleportation  
and Other Quantum Marvels



Springer

Николя Жизан

# КВАНТОВАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ

Нелокальность,  
телепортация  
и другие квантовые чудеса

*Перевод с французского*



МОСКВА  
2016

УДК 530.145  
ББК 22.314  
Ж71

Издательство благодарит *Russian Quantum Center*,  
Сергея Белоусова и Виктора Орловского  
за помощь в подготовке издания

Переводчик К. Ефимова  
Редактор И. Лисов

### Жизан Н.

Ж71 Квантовая случайность: Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса / Николя Жизан ; Пер. с англ. — М. : Альпина нон-фикшн, 2016. — 202 с.

ISBN 978-5-91671-489-0

Играет ли Бог в кости? И во что играют физики? Николя Жизан, автор прорывного Женевского эксперимента по передаче квантовой запутанности фотонных пар по оптоволокну, излагает свои взгляды на фундаментальные вопросы квантовой физики через призму игры Белла — воображаемого эксперимента, в котором рассматривается теоретическая возможность сверхсветовой передачи информации с использованием запутанных частиц. Реальные эксперименты с ними доказали нелокальную природу мира — вопреки интуитивному желанию ученых, события в удаленных точках Вселенной могут непосредственно зависеть друг от друга.

Истинная природа этих явлений и вытекающие из них следствия в последнее время стали горячей темой физики. По мнению автора, вторая квантовая революция, начавшаяся в последнем десятилетии XX века, позволит построить новый, непротиворечивый и плодотворный взгляд на мир.

УДК 530.145  
ББК 22.314

*Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу [lib@nonfiction.ru](mailto:lib@nonfiction.ru)*

ISBN 978-5-91671-489-0 (рус.)  
ISBN 978-2-7381-2831-7 (франц.)

© Odile Jacob, 2012  
© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
ПРЕАМБУЛА.....	17
ВВЕДЕНИЕ.....	19
<b>Глава 1</b>	
АПЕРИТИВ.....	25
<b>Глава 2</b>	
ЛОКАЛЬНЫЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ.....	33
<b>Глава 3</b>	
НЕЛОКАЛЬНОСТЬ И ИСТИННАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ.....	65
<b>Глава 4</b>	
НЕВОЗМОЖНОСТЬ КВАНТОВОГО КЛОНИРОВАНИЯ.....	81
<b>Глава 5</b>	
КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ.....	91
<b>Глава 6</b>	
ЭКСПЕРИМЕНТ.....	107

**Глава 7**

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ..... 119

**Глава 8**

КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ..... 129

**Глава 9**

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ПРИРОДА НЕЛОКАЛЬНА? ..... 145

**Глава 10**

ТЕКУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛОКАЛЬНОСТИ..... 177

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 193

БЛАГОДАРНОСТИ..... 201

*Разумный человек приспосабливается к миру, неразумный — упорно пытается приспособить мир к себе. Поэтому прогресс зависит от неразумных людей.*

Джордж Бернард Шоу

*Я могу представить себе такое будущее, в котором мы будем для роботов тем, чем сейчас являются собаки для людей.*

Клод Шеннон



## ПРЕДИСЛОВИЕ

«Любовь с первого взгляда!» — так Никола Жизан описал свои ощущения в день, когда он узнал о теореме Белла. Услышав это, я снова вернулся в тот осенний день 1974 года, когда, погруженный в изучение малоизвестной в то время работы Джона Белла, я понял, что спор между Бором и Эйнштейном об интерпретации квантовой механики может быть разрешен экспериментально. Не так уж много физиков были осведомлены о проблеме, поднятой Эйнштейном, Подольским и Розеном, немногие слышали о неравенствах Белла, и совсем мало было тех, кто считал вопросы основополагающих концепций квантовой механики достойными серьезного внимания. Работу ЭПР, опубликованную в 1935 году в журнале *Physical Review*, можно было легко найти в университетских библиотеках, чего нельзя было сказать о работе Белла, опубликованной в неизвестном новом журнале, которому суждено было исчезнуть после четвертого выпуска. В те времена, когда еще не существовало Интернета, работы, которые не были опубликованы в крупных журналах, приходилось распространять в фотокопиях.

Моя собственная копия досталась мне из папки, которую собрал Кристиан Эмбер (Christian Imbert), молодой профессор Института Оптики, по случаю визита Эбнера Шимони (Abner Shimony), приглашенного в Орсэ Бернаром д'Эспанья (Bernard d'Espagnat). Очарованный идеями Белла, я решил, что моя докторская диссертация будет основана на экспериментальных тестах неравенств Белла, и Эмбер согласился взять меня под свое крыло.

В удивительно ясной работе Белла я увидел серьезный вызов для экспериментаторов: изменение ориентации поляризационных детекторов, в то время как запутанные частицы распространяются от источника в область измерения. Было необходимо исключить влияние ориентации поляризатора как на механизм излучения, так и на измерение, применяя для этого принцип релятивистской причинности, который запрещает распространение любых физических эффектов со скоростью выше скорости света. Такой эксперимент мог бы объяснить саму суть конфликта между квантовой механикой, с одной стороны, и мировоззрением Эйнштейна — с другой.

Эйнштейн защищал локальный реализм, сочетавший два принципа. Первый утверждал *физическую реальность* системы. Второй — *гипотеза о локальности* — что система не подвержена влиянию событий, происходящих в другой системе, отделенной от первой пространственно-подобным интервалом пространства-времени, поскольку в противном случае две системы должны были бы обмениваться воздействиями, распространяющимися быстрее света. В итоге наши эксперименты подтвердили предсказания квантовой механики, и физикам пришлось отказаться от локального реализма — от взгляда на мир, который так убедительно защищал Эйнштейн. Но от чего же следовало отказаться — от реализма или от локальности?

Идея отказа от понятия физической реальности не представляется мне убедительной. Я вижу роль ученого как раз в описании реальности мироздания, а не просто в предсказании результатов, которые покажут наши измерительные приборы. Но если в этой части квантовая механика находит подтверждение, — а сегодня этот вывод представляется неизбежным, — то означает ли это, что мы должны принять существование нелокальных взаимодействий, которые явным образом противоречат принципу релятивистской причинности Эйнштейна? И есть ли надежда когда-нибудь использовать эту квантовую нелокальность для передачи полезного сигнала, например включения лампы или размещения ордера на фондовой бирже, со сверхсветовой скоростью? Но как раз здесь проявляется другая характерная черта квантовой механики, а именно: существование *фундаментальной квантовой неопределенности*. Из-за нее становится совершенно невозможным повлиять на фактический результат любого эксперимента, если квантовая механика говорит о том, что возможны несколько результатов. Да, квантовая механика позволяет очень точно рассчитать вероятность каждого из возможных результатов, но эти вероятности имеют лишь статистический смысл при многократном повторении эксперимента, но ничего не говорят нам о результате одного конкретного эксперимента. Именно эта *фундаментальная квантовая случайность* запрещает возможность сверхсветовой коммуникации.

Среди многих популярных изложений последних достижений квантовой физики книга Николя Жизана подчеркивает ключевую роль фундаментальной квантовой случайности, не будь которой, мы бы могли рассчитывать на изобретение сверхсветового телеграфа. Если это научно-фантастическое изобретение когда-нибудь воплотится в жизнь, нам придется радикально пересмотреть все, что мы знаем о физике.

Я совсем не имею в виду, что существуют неприкасаемые и непреложные физические законы, неподвластные никакому пересмотру. Совсем наоборот, лично я уверен, что каждая физическая теория однажды будет заменена другой теорией большего масштаба. Но некоторые из теорий настолько фундаментальны, что их пересмотр влечет за собой концептуальную революцию с далеко идущими последствиями. И хотя нам всем известны несколько примеров таких переворотов в истории человечества, они тем не менее столь исключительны, что к ним не следует относиться спокойно. В этом контексте объяснение, почему квантовая нелокальность, какой бы сверхъестественной она ни казалась, не может низвергнуть принцип релятивистской причинности, который запрещает сверхсветовую коммуникацию, кажется мне очень важной темой в книге Николая Жизана.

Тот факт, что эта книга занимает определенную позицию по этому вопросу, вразрез с другими популярными взглядами, неудивителен. Николай Жизан является одним из ключевых игроков в новой квантовой революции, которая произошла в последней четверти XX столетия.

Первая квантовая революция, в начале XX века, основывалась на открытии корпускулярно-волнового дуализма. Это открытие дало способ довольно точно описать статистическое поведение атомов, из которых состоит материя, облаков электронов, которые переносят электрический ток в металле или полупроводнике, и миллиардов и миллиардов фотонов в луче света. У нас появился инструментарий для понимания механических свойств твердых тел, в то время как классическая физика не могла объяснить, почему вещество, состоящее из положительных и отрицательных зарядов, которые притягивают друг друга, не сплющивается. Квантовая механика дала точное количественное описание электрических и оптических свойств материалов и предложила систему

концепций, необходимую для описания таких удивительных явлений, как сверхпроводимость и странные свойства определенных элементарных частиц. В эту первую квантовую революцию физики изобрели новые приборы: транзистор, лазер, интегральные схемы, благодаря чему сегодня мы живем в информационном обществе.

Но уже к 1960-м годам физики начали задавать новые вопросы, которые в первую квантовую революцию оставались за кадром:

- Как можно применять квантовую физику, если все ее предсказания носят чисто статистический характер и относятся к отдельным микроскопическим объектам?
- Те невероятные свойства *запутанных пар квантовых объектов* (которые были описаны в 1935 году в работе об ЭПР-парадоксе, но ни разу не наблюдались в действительности), они действительно соответствуют реальному поведению природы или в этом вопросе мы достигли пределов квантовой механики?

Именно ответы на эти вопросы, которые сначала дали экспериментаторы, а потом уточнили теоретики, привели ко второй, продолжающейся по сей день квантовой революции<sup>1</sup>.

Поведение отдельных квантовых объектов давно являлось предметом оживленных дебатов среди физиков.

---

<sup>1</sup> См., например, A. Aspect: *John Bell and the second quantum revolution*, foreword of J. Bell: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy*, Cambridge University Press (2004); J. Dowling and G. Milburn: *Quantum technology: the second quantum revolution*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **361**, 1809, pp. 1655–1674 (2003).

В течение долгого времени большая часть ученого сообщества считала, что сам вопрос не имеет смысла и что он в любом случае неважен, так как никто не мог себе представить, что можно наблюдать отдельный квантовый объект, не говоря уже о том, чтобы управлять и манипулировать им. По словам Эрвина Шрёдингера<sup>1</sup>, «с отдельными частицами не экспериментируют, так же как ихтиозавров не выращивают в зоопарках».

Но начиная с 1970-х годов экспериментаторы разрабатывали способы, позволяющие наблюдать отдельные микроскопические объекты — электроны, атомы и ионы, манипулировать и управлять ими. Я помню всеобщее воодушевление на международной конференции по атомной физике в Бостоне в 1980 году, когда Петер Тошек представил первое изображение одного захваченного иона — его можно было непосредственно наблюдать по флюоресцентным фотонам, которые он испускал под воздействием луча лазера. Благодаря прогрессу экспериментальной физики мы можем прямо наблюдать квантовые скачки, что положило конец многолетним спорам. Мы также увидели, что квантовый формализм прекрасно описывает поведение отдельного квантового объекта — при условии, что мы правильно интерпретируем вероятностные результаты расчетов. Что касается второго вопроса о свойствах запутанности, то предсказания квантовой теории сначала были проверены на фотонных парах в серии экспериментов, условия проведения которых постепенно приближаются к идеальным, в соответствии с замыслом теоретиков вроде Джона Белла. Эти эксперименты полностью подтвердили предсказания квантовой теории, какими бы удивительными те ни были.

---

<sup>1</sup> E. Schrödinger: Are there quantum jumps? *British Journal for the Philosophy of Sciences*, Vol. III, p. 240.

В 1980-х годах Николая Жизан собрал группу специалистов по прикладной физике для работы над оптоволоконными технологиями. Он всегда испытывал личный и теоретический интерес к основам квантовой механики (но держал его в секрете, по крайней мере от своего работодателя, так как в те времена постановка подобных вопросов не всегда считалась стоящим занятием), поэтому неудивительно, что Николая Жизан стал одним из первых в экспериментах с квантовой запутанностью фотонных пар в оптоволоконных кабелях. Обладая глубокими познаниями в оптоволоконных технологиях, он смог использовать коммерческие телекоммуникационные сети возле Женевы, чтобы продемонстрировать, к удивлению самих экспериментаторов, что явление запутанности можно наблюдать даже при расхождении на несколько десятков километров. Он провел несколько концептуально простых тестов и вывел совершенно поразительные черты запутанности между удаленными событиями, а также экспериментально реализовал протокол квантовой телепортации. Сочетая навыки теоретика в квантовой физике и эксперта в оптоволоконных технологиях, он был одним из первых, кто начал работать над практическими применениями явления запутанности, такими как квантовая криптография и генерация истинно случайных чисел.

Это сочетание талантов прослеживается в его увлекательной книге, где тонкие вопросы квантовой физики излагаются при помощи языка, доступного далекой от науки публике и без привлечения математического аппарата. Николая объясняет явления запутанности, квантовой нелокальности и квантовой случайности и описывает примеры практического применения. Но это не просто популярное изложение. Специалисты в квантовой области найдут здесь глубокие рассуждения об этих явлениях, истинная природа и последствия которых все еще непостижимы для нас.

Касательно вопроса о том, должны ли мы после экспериментального опровержения локального реализма отбросить физическую реальность или идею локальности<sup>1</sup>, я придерживаюсь того же мнения, что и Николя Жизан: даже если считать концепцию локального реализма целостной и разумной, было бы странно делить ее на две части и сохранять лишь одну из них. Как можно определить автономную физическую реальность системы, которая находится в определенном месте пространства-времени, если эта система подвержена влиянию событий в другой системе, отделенной от нее пространственно-подобным интервалом? Эта книга предлагает более изящное решение, показывая, что если принимать во внимание существование фундаментальной квантовой случайности, то нелокальная физическая реальность может вполне мирно сосуществовать с релятивистской причинностью, что была так дорога Эйнштейну. Поэтому даже те ученые, кто хорошо знаком с этими проблемами, найдут в книге Николя Жизана пищу для размышлений. А простого читателя, лишь открывающего для себя тайны запутанности и квантовой нелокальности, ждет погружение во все тонкости этого сложного вопроса, описанного просто и ясно одним из ведущих мировых экспертов<sup>2</sup>.

*Ален Аспе  
Пализо, май 2012*

---

<sup>1</sup> Можно забыть безвыходное решение, которое заключается в отрицании понятия свободной воли, — шаг, который превращает человеческих существ в простых кукол, которыми управляет бог знает что за демон Лапласа.

<sup>2</sup> В 2009 году Николя Жизан стал первым лауреатом престижной премии Джона Стюарта Белла, присуждаемой за исследования в области фундаментальных проблем квантовой механики и ее практического применения.

# ПРЕАМБУЛА

Если бы вы жили во времена ньютоновской научной революции, хотели бы вы быть в курсе дела? Сегодня квантовая физика дает нам шанс пережить концептуальную революцию сравнимой значимости. Эта книга поможет вам понять происходящее, с одной стороны не погружаясь в математику, а с другой — не скрывая концептуальных сложностей. Физики используют математику для поиска следствий из их гипотез и для точных расчетов вытекающих из них предсказаний, но разве нужна математика для того, чтобы поведать великую историю физики? Ведь самое интересное в физике — это не математика, а идеи. Цель этой книги не забросать вас уравнениями, а помочь понять.

Некоторые главы потребуют от читателя истинного умственного усилия. Каждый поймет кое-что, но никто не поймет все! В этой области знания сама идея понимания представляется зыбкой и размытой. Тем не менее, я уверен, что каждый может, пусть лишь частично, понять концептуальную революцию, которая происходит прямо на наших глазах, и получить удовольствие от этого понимания. Просто

примите, что не все будет очевидно, и, конечно, не стоит исходить из распространенного мнения, что понять физику — безнадежное дело.

Если какая-то часть повествования покажется вам слишком сложной, просто продолжайте читать. Скорее всего, продолжение внесет ясность. А может быть, это один из трудных моментов, которые я приберег для коллег-физиков, чтобы им тоже было интересно читать эту книгу. При необходимости возвращайтесь назад и перечитывайте те отрывки, которые вызвали сложности. Ведь важно получить общее представление, а не разобрать все досконально. В итоге однажды вы с удивлением обнаружите, что многое из квантовой физики можно понять, не прибегая к математике!

Квантовая физика всегда была предметом пространных объяснений и путаных философских трактатов. Единственный способ не попасть в эти ловушки — руководствоваться здравым смыслом. Ведь что такое эксперимент? Это вопрос, который ученые задают окружающей действительности. Физик решает, какой вопрос и когда задать. Получив ответ, в виде, к примеру, появившегося красного огонька, он не задается вопросом, красный ли огонек на самом деле и не является ли он иллюзией того или иного рода. Ответ: «красный», и точка.

Читатель увидит, что одни и те же истории всплывают в разных главах книги. Мой учительский опыт говорит, что повторение важных вещей в разных контекстах очень полезно. Ведь моя книга не претендует на историческую точность. Любые замечания относительно моих знаменитых предшественников отражают лишь мои личные впечатления, приобретенные за более чем тридцать лет профессиональной работы в качестве физика.

# ВВЕДЕНИЕ

В самом нежном возрасте каждый узнает, что существует лишь две возможности взаимодействовать с чем-то, до чего никак не дотянуться рукой. Нужно или переместиться в сторону объекта, то есть подползти к нему, как это делают младенцы, или найти какой-нибудь длинный предмет вроде палки, который позволит расширить пределы досягаемости. Позже мы открываем для себя более сложные механизмы, которые можно использовать, к примеру письмо можно опустить в почтовый ящик. Его заберет почтальон, служащий на почте положит его в нужную стопку, потом грузовик, поезд или самолет перевезет письмо в нужный город, и в итоге оно будет доставлено к двери человека, имя которого обозначено на конверте. Интернет, телевидение и многие другие примеры, с которыми мы сталкиваемся каждый день, говорят нам, что в итоге любое взаимодействие и коммуникация между двумя пространственно разделенными объектами распространяется непрерывно, от точки к точке, посредством некоторого механизма. Этот механизм может быть сложным, но всегда следует непрерывной траектории,

которую, по крайней мере теоретически, можно проследить в пространстве и времени.

Тем не менее квантовая физика, которая исследует мир вне пределов нашего непосредственного восприятия, утверждает, что пространственно удаленные друг от друга объекты иногда образуют единое целое. Более того, в таких системах, как бы далеко ни были разнесены их компоненты, при воздействии на один из них реагировать будут оба! Как можно в такое поверить? Как можно проверить это утверждение? Как это понимать? И можно ли использовать это странное проявление квантовой физики, эти удаленные объекты, образующие единое целое, для передачи информации на расстоянии? Вот основные вопросы, на которые мы постараемся ответить в этой книге.

Я попытаюсь поделиться с вами завораживающим открытием мира, который невозможно описать при помощи взаимодействий, последовательно распространяющихся от точки к точке, — мира, в котором так называемые нелокальные корреляции становятся обыденностью. Мы поговорим о нередуцируемых вероятностях, корреляциях, информации и даже о свободной воле.

Мы также увидим, как физики создают нелокальные корреляции, как они используют их в криптографии для создания абсолютно надежных ключей и как можно использовать эти удивительные корреляции для квантовой телепортации. Другая цель этой книги — проиллюстрировать научный метод. Как можно убедиться в чем-то, что совершенно противоречит привычному интуитивному восприятию мира? Какие доказательства потребуются для полной смены научной парадигмы, для принятия такого рода концептуальной революции? Отступив немного назад, мы увидим, что история квантовой нелокальности довольно проста и даже человечна. Мы также увидим, что природа

производит нередуцируемо случайные события, которые могут происходить в значительно удаленных друг от друга точках пространства, при отсутствии чего бы то ни было, что перемещалось бы от точки к точке вдоль любой траектории, соединяющей две эти точки. Но мы обнаружим также, что случайный характер этих эффектов лишает нас какой-либо возможности использовать эту форму нелокальности для связи, тем самым уберегая от противоречия с одним из фундаментальных принципов теории относительности, в соответствии с которым никакая информация не может распространяться быстрее скорости света.

Мы живем в удивительное время. Физики только что открыли, что одно из наших глубочайших интуитивных представлений о невозможности «дальнодействия» — взаимодействия объектов на расстоянии — неверно. Слово «взаимодействие» не случайно стоит в кавычках; они напоминают о необходимости четко указать, что мы имеем в виду под этим понятием. Физики исследуют мир квантовой физики — мир, населенный атомами, фотонами и другими загадочными для нас объектами. Не уделить этому революционному прорыву внимание так же стыдно, как было бы стыдно ничего не знать о научной революции Ньютона или Дарвина, будь мы их современниками. Ведь концептуальная революция, происходящая сейчас, не менее важна. Она полностью переворачивает нашу картину мира и, без сомнения, даст толчок целому спектру новых технологий, которые будут выглядеть как волшебство.

В главе 2 мы дадим представление о корреляции, лежащей в основе предмета нашего рассказа, путем обсуждения игры, которую мы назовем игрой Белла. Мы увидим, что определенные корреляции не могли бы возникнуть, если бы были разрешены лишь взаимодействия, которые распространяются из точки в точку через пространство. Эта глава — ключевая для всего последующего повествования, несмотря

на то что в ней ни разу не упоминается квантовая физика. Скорее всего, это будет самая сложная для понимания глава, но уверяю: чем дальше, тем яснее будет становиться картина.

Потом мы зададимся вопросом, что делать, если кто-то когда-нибудь победит в игре Белла, хоть это совершенно невозможно, даже если так утверждает квантовая физика. Потом познакомимся с концепцией истинной случайности в главе 3 и с невозможностью клонирования квантовых систем в главе 4. В двух следующих главах мы представим эту странную теорию квантовой физики: сначала рассмотрим теоретическую основу запутанности, а затем опишем соответствующие эксперименты, из которых следует неминуемый вывод, что природа нелокальна.

Вместо того чтобы принять это заключение на веру, мы проверим, действительно ли неизбежен такой вывод. В главе 9 мы рассмотрим множество мысленных попыток ученых умов сохранить локальное описание мироздания. Этот вопрос все еще является животрепещущим и активно изучается в мире физики. Более того, вы увидите насколько хитры бывают ученые! В главе 10 я опишу удивительные исследования, которые все еще продолжаются, и вы получите актуальное представление о мире научных исследований.

## **ЗАЧЕМ ЭТО?**

Чаще всего мне задают именно этот вопрос. Можно подумать, никогда не нужно заниматься чем-то, что нельзя немедленно применить с пользой. Я мог бы ответить: «А зачем ходить в кино?» Правда, за эти исследования, которые я так люблю, я получаю деньги, а когда иду в кино, то деньги берут с меня, поэтому лучше подобрать более корректный пример. Откровенно говоря, лучшим ответом было бы сказать, что это очень увлекательно! Хотя я возглавляю группу специалистов

по прикладной физике, я не вскакиваю с постели по утрам в надежде изобрести новый гаджет. Я просто очарован физикой. Понять природу, и в частности понять, как она может создавать нелокальные корреляции, — вполне достаточная мотивация. Почему же тогда я работаю в области прикладной физики? Не есть ли это следование конъюнктуре? На самом деле есть серьезная причина думать о практическом применении даже тогда, а может быть, особенно тогда, когда руководствуешься желанием понять концептуальные основы. Ведь новая идея такой значимости обязательно имеет последствия, она обязательно открывает новые практические перспективы. И чем революционнее концепция, тем более удивительными могут быть ее применения. Большое преимущество работы над потенциальными прикладными областями как раз в том, что она предоставляет инструмент для тестирования основополагающих идей. Вдобавок, как только мы выявили область применения, никто не сможет отрицать актуальность лежащей в ее основе концепции! Ведь нельзя отрицать актуальность концепции, для которой найдено реальное применение?

История квантовой нелокальности — прекрасная тому иллюстрация. До тех пор, пока она не нашла применения, значительное большинство ученых не обращало на запутанность и нелокальность никакого внимания и даже считало их существование исключительно философским вопросом. Любому, кто намеревался рассматривать эти явления примерно до 1991 года, требовалась смелость и даже некоторая дерзость<sup>1</sup>. Тогда по этому направлению исследований

---

<sup>1</sup> Когда Ален Аспе начинал свою исследовательскую карьеру, он пришел к Джону Беллу и предложил провести эксперимент Белла, на что последний ответил: «А у вас уже есть постоянная должность?» По своему опыту Белл знал, насколько рискованно для молодого ученого было работать над предметом, который вызывал такую неприязнь в научном сообществе.

почти не было академических должностей, а сегодня почти все следят за их результатами. Естественно, правительства, выделяющие средства на исследовательские центры, больше озабочены квантовыми технологиями, чем научными концепциями, лежащими в их основе, но важно, чтобы студенты в этих центрах изучали новую физику.

В главе 7 вы познакомитесь с двумя областями применения, которые уже поставлены на коммерческую основу: квантовая криптография и квантовый генератор случайных чисел. А в главе 8 я расскажу вам о самой удивительной области применения — о квантовой телепортации.

## Глава 1

# АПЕРИТИВ

Перед тем как перейти к основной теме этой книги, мне хотелось бы рассказать две короткие истории, которые послужат декорациями. Одна из них — о реальных событиях, случившихся в прошлом, а другая — чистый вымысел, который может стать реальностью в ближайшем будущем.

### **НЬЮТОН: НЕВИДАННЫЙ АБСУРД**

Все слышали о законе всемирного тяготения Ньютона, согласно которому все объекты притягиваются друг к другу в соответствии с их массами и расстоянием между ними (говоря конкретно, обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, но сейчас это неважно). К примеру, Солнце и Земля связаны друг с другом силой притяжения, которая компенсирует центробежную силу и удерживает Землю на приблизительно круговой орбите вокруг Солнца. Тот же принцип работает и для других планет, и для системы Земля — Луна, и даже для всей нашей галактики, которая вращается вокруг центра скопления галактик.

Сосредоточимся на системе Земля — Луна. Откуда Луна знает, что она должна притягиваться к Земле в зависимости от массы и удаленности от нее? Если угодно, откуда Луна знает массу Земли и расстояние до нее? Меряет палкой, как тот ребенок, о котором мы говорили выше? Или бросает какие-нибудь крошечные шарики? В самом деле, общается ли она с Землей каким-либо специальным образом? Этот на первый взгляд детский вопрос на самом деле чрезвычайно серьезен. В действительности он приводил в замешательство и самого Ньютона, для которого идея всемирного тяготения (несмотря на то, что он сам его открыл и тем прославился) звучала настолько абсурдно, что ни один человек в здравом уме не смог бы отнестись к ней серьезно (см. справку ниже).

Пока нам достаточно знать, что интуиция Ньютона его не подвела, хотя потребовались несколько столетий и гений Эйнштейна, чтобы закрыть этот концептуальный пробел и дать удовлетворительный ответ. Сегодня физики знают, что действие на расстоянии, которое происходит в форме гравитации или при взаимодействии между двумя электрическими зарядами, отнюдь не мгновенно. На самом деле оно является результатом обмена посыльными, и получается, что высказанная выше догадка о «маленьких шариках» близка к правде. Эти посыльные — микрочастицы, которым физики дают имена. Посыльные гравитации называются гравитонами, а те, что отвечают за электрические силы — фотонами.

**СПРАВКА 1. Ньютон.** «Непостижимо, чтобы неодушевленная грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения, как это должно бы происходить, если бы тяготение в смысле Эпикура было существенным и врожденным в материи. Предполагать, что тяготение является

существенным, неразрывным и врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, это, по-моему, такой абсурд, который немислим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах».<sup>1</sup>

Таким образом, со времен Эйнштейна физика описывала природу как набор локальных сущностей, которые могут взаимодействовать друг с другом лишь путем непрерывной передачи от точки к точке в пространстве. Эта идея хорошо укладывается в наше интуитивное восприятие мира, как и в восприятие Ньютона. Но современная физика также опирается на другой теоретический фундамент, а именно на квантовую физику, описывающую мир атомов и фотонов. Эйнштейн также принял участие в этом открытии. В 1905 году он объяснил явление фотоэлектрического эффекта как результат бомбардировки частицами света, фотонами, которые выбивают электроны из поверхности металла, взаимодействуя с ними механически, при непосредственном контакте, подобно шарам на бильярде. Но как только была разработана и сформулирована квантовая теория, Эйнштейн быстро занял более критическую позицию, так как понял, что эта странная новая теория возвращает в картину мира новую форму дальнего действия<sup>2</sup>. Как и Ньютон за три века до него, Эйнштейн отверг эту гипотезу как

---

<sup>1</sup> Cohen B., Schofield R. E. (Eds): *Isaac Newton Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, Harvard University Press (1958). Русский перевод письма Ньютона к Бентли приводится по: Вавилов С. И. Исаак Ньютон. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1945. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Gilder L.: *The Age of Entanglement. When Quantum Physics Was Reborn*, Alfred A. Knopf (2008).

абсурдную и впредь называл ее «призрачным действием на расстоянии».

Сегодня квантовая механика утвердилась в самом центре современной физики. И да, квантовая механика допускает определенную форму нелокальности, которая, вероятно, не понравилась бы Эйнштейну, хотя она и очень отличается от той нелокальности, что не давала покоя Ньютону. Кроме того, этот вид квантовой нелокальности хорошо подтверждается экспериментом. У него даже есть многообещающие приложения в криптографии, и он делает возможным удивительное явление квантовой телепортации.

## **СТРАННЫЙ НЕЛОКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕФОН**

А теперь — небольшой научно-фантастический рассказ, хотя не такой уж футуристический, как может показаться. На самом деле технологии скоро воплотят это в жизнь.

Представьте себе «телефонную» линию между двумя собеседниками, которых мы назовем по традиции именами Алиса и Боб, что соответствует первым двум буквам алфавита. Как это иногда случается, связь очень плохая и сопровождается помехами. Настолько плохая, что Алиса не может расслышать ничего из того, что пытается сказать ей Боб. Все, что она может разобрать, — это непрекращающийся шум: «Шчукрпшчрчкщщарчшт»... Точно так же все, что слышит Боб, — «шчукрпшчрчкщщарчшт»... Они кричат в трубку, трясут ее, носятся с ней из угла в угол, но ничего не помогает. Это так раздражает! Разговаривать при помощи этого устройства просто невозможно; совершенно ясно, что это и телефоном не назовешь.

Но ведь Алиса и Боб физики. Каждый из них делает запись шумов со своего телефонного аппарата в течение одной минуты. Так Алиса и Боб могут доказать друг другу, что

старались как могли. К их удивлению, записи шумов оказываются строго идентичными друг другу. Так как оба записывающих устройства являются цифровыми, Алиса и Боб могут убедиться, что каждый бит информации в одной записи точь-в-точь повторяет соответствующий фрагмент на другой записи. Невероятно! Тогда источник шума должен находиться либо у оператора на телефонной станции, либо где-то еще на протяжении телефонной линии. Так как шум идеально синхронизирован, друзья делают вывод, что источник помех расположен точно посередине телефонной линии между ними, и поэтому шум доходит до Алисы и Боба одновременно.

Они решают проверить свою гипотезу, а именно то, что причина шума в дефекте, вероятно электрического свойства, точно посередине связывающей их телефонной линии. Алиса удлиняет свою часть линии, подключив длинный кабель, и ожидает, что тот шум, который доходит до нее, будет приходить с небольшой задержкой относительно шума, который доходит до Боба. Но нет! Ничего не изменилось. По-прежнему шум, по-прежнему одинаковый и, главное, по-прежнему идеально синхронизированный. Тогда Боб перерезает свой провод. Но шум продолжает идти!

Как можно объяснить такой феномен? Зачем тогда телефону провод — просто чтобы не потерять его в квартире? Может быть, это мобильный телефон, который повешен на стену исключительно ради удобства? Или шум производят сами приемники, а совсем не некий источник, расположенный между абонентами? Быть может, одинаковый шум в двух приемниках является эхом взрыва в какой-то далекой галактике? И как проверить такие гипотезы? Боб, который кое-что знает об электромагнитных волнах, закрывается в клетке Фарадея — это металлическая сетчатая конструкция, непроницаемая для радиоволн. Но шум не исчезает!

Алиса предлагает значительно увеличить расстояние между телефонными аппаратами. Ведь каким бы ни был механизм, позволяющий им связываться, качество связи при удалении должно снижаться, и в итоге она исчезнет совсем. Но большое расстояние не оказывает никакого эффекта на амплитуду шума.

Алиса и Боб приходят к выводу, что в их телефоны записали очень длинную шумовую последовательность, которая воспроизводится каждый раз, когда трубку снимают с рычага, причем с того места, которое очень аккуратно выбирается как функция точного времени. Тогда нет ничего удивительного в том, что две телефонные трубки всегда воспроизводят один и тот же шум.

Обрадованные успехами своего явно научного подхода к проблеме, Алиса и Боб спешат поделиться своим открытием с учителем физики. Тот должным образом оценивает их работу, но при этом делится следующим наблюдением: «Предположение, что телефонные аппараты производят одинаковый шум вследствие какой-то общей причины, а именно один и тот же шум, заранее записанный в обоих телефонных аппаратах, является гипотезой, которая сама по себе может быть проверена. Речь идет об эксперименте Белла».

В следующей главе я расскажу об экспериментах, или играх, Белла. А сейчас давайте представим, что Алиса и Боб разбежались по своим домам проводить тест Белла на своих телефонных аппаратах и этот эксперимент провалился. Они повторили его несколько раз, но результат был одним и тем же. Таким образом, предположение о существовании общей причины в виде записи на телефонах оказалось несостоятельным.

Алисе и Бобу остается только удивляться, что за механизм позволяет двум аппаратам выдавать одинаковый шум, притом что они разделены большим расстоянием и никак

не сообщаются между собой и не воспроизводят сделанную заранее запись. Несмотря на все усилия, друзья не могут придумать механизм, способный объяснить наблюдаемое явление, поэтому они возвращаются за советом к учителю:

— Неудивительно, что вы не можете найти механизм — его попросту нет. Это явление описывается не классической механикой, а квантовой физикой. Шум производится случайно, но это «истинная» случайность. Каждый бит шума не существует, пока он не раздастся из трубки в результате чистого акта творения. Более того, эта квантовая случайность может проявляться в разных местах в одно и то же время, к примеру в двух ваших телефонных трубках.

— Но это невозможно! — восклицает Алиса. — Сигнал должен ухудшаться по мере удаления приемников друг от друга, иначе это означало бы, что можно иметь связь на любых произвольных расстояниях.

— И не только, — добавляет Боб, — идеальная синхронизация предполагает сколь угодно высокую скорость сигнала, в том числе и превышающую скорость света, что невозможно.

Но учитель непреклонен:

— Вы сказали, что шум остается тем же самым, если вы кричите в трубку, бегаєте по квартире, кружитесь на месте и трясете аппарат. Понимаете, сам факт того, что одинаковый шум производится случайно на обеих сторонах, означает, что вы не можете использовать его для обмена информацией. Абонент ничего не узнает о том, что вы делаете. Таким образом, это не противоречит теории относительности Эйнштейна. Вы еще раз доказали, что сигнал не может идти быстрее света.

Алиса и Боб теряют дар речи. Если их удивительные «телефоны» не могут использоваться для общения, то это

и не телефоны вовсе, даже если и выглядят как телефоны. Но как они умудряются производить один и тот же результат, не обмениваясь никакой информацией и не «договорившись» заранее? А как вам предположение об «истинной» случайности, которая проявляется в нескольких местах одновременно?

После недолгого молчания Боб приходит в чувство:

— Но если все происходит действительно так, то должна быть возможность использовать это явление. В таком случае я смогу построить что-нибудь такое и экспериментировать, пока не пойму, как это работает. В конце концов, именно так я узнал, как работает электричество, как изменяется траектория полета мяча, если он крутится, да и вообще все, что я когда-либо узнавал.

И учитель соглашается.

Этот эффект может использоваться для получения рядов случайных чисел, для защиты секретных переговоров при помощи так называемой квантовой криптографии и даже для квантовой телепортации. Но сначала нам нужно понять главную идею этой книги, а именно нелокальность. Для этого мы перейдем к обсуждению идеи корреляции и к описанию игры Белла.

## Глава 2

# ЛОКАЛЬНЫЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ

Центральной концепцией этой книги является *нелокальная корреляция*. Мы увидим, что эта идея близка к идее истинной случайности, то есть к представлению о событиях, которые принципиально непредсказуемы. Тема случая удивительна сама по себе, но здесь мы будем говорить о нелокальной случайности. Эти понятия непривычны и поразительны, даже революционны, уловить их суть будет непросто. Скорее всего, эта глава будет самой сложной, но у нас впереди целая книга, чтобы внести ясность. Для того чтобы убедиться, что нелокальные корреляции и истинная случайность существуют, физики изобрели игру, которую назвали игрой Белла. Ведь физики — это большие дети: они постоянно разбирают игрушки, чтобы понять, что это там тикает.

Перед тем как начать рассказ об этой игре, освежим в памяти понятие корреляции. В сущности, наука тем и занимается, что ищет корреляции и придумывает объяснения

к ним. Джон Белл имел обыкновение говорить, что корреляции требуют, чтобы их объяснили<sup>1</sup>. Сначала мы рассмотрим простой пример корреляций, а потом подумаем, какого рода объяснение можно для них подобрать. Мы увидим, что существует несколько очень разных типов объяснений. Впрочем, если мы ограничимся локальными объяснениями, что предполагает механизм последовательного распространения из точки в точку пространства, то останется только два разных типа.

При помощи игры Белла мы можем изучить специфические корреляции. Это игра для двух игроков, которые должны сотрудничать с целью получить максимальное количество очков. Правила игры более чем просты, и играть совсем не сложно, но непросто сразу понять, в чем состоит ее цель — род нелокального вычисления. На самом деле вопрос не в самой игре, а в понимании ее механизма. На этом пути мы проникнем в сердце проблемы — к нелокальным корреляциям и происходящей сегодня концептуальной революции.

Но давайте начнем с самого начала, с концепции корреляции.

## **КОРРЕЛЯЦИИ**

Множество раз за день мы принимаем решения, и каждый раз решение влечет за собой последствия. В каких-то случаях принятое решение и его последствия очень важны, в каких-то — совсем нет.

Некоторые последствия проистекают только от нашего собственного решения, другие — частично или полностью

---

<sup>1</sup> Bell J. S.: *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (1987), p. 152.

от решений других людей. В этом случае последствия не являются независимыми — они коррелируют. К примеру, решение о том, что приготовить на ужин, зависит, помимо прочего, от цен на продукты в местном гастрономе, а эти цены определяют какие-то другие люди в соответствии с различными ограничениями. Таким образом, меню обитателей одного и того же района города будут коррелировать. Если свежий шпинат продается со скидкой, то, скорее всего, его будут готовить чаще. А еще на решение о том, что приготовить на ужин, может повлиять выбор соседей. Длинная очередь за чем-нибудь или заинтересует вас, или отпугнет. В обоих случаях мы будем наблюдать корреляцию, положительную в первом случае и отрицательную во втором.

Доведем пример до крайности. Представьте себе двух соседей, традиционно Алису и Боба. Предположим, что изо дня в день они едят на ужин одни и те же блюда. Другими словами, их вечерние меню идеально коррелируют между собой. Как мы можем объяснить такую корреляцию?

Во-первых, мы можем предположить, что Боб все время повторяет выбор Алисы, то есть не принимает решение самостоятельно. Или наоборот — Алиса следует за Бобом. Здесь мы наблюдаем первый из возможных типов объяснения: первое событие влияет на второе. Эту схему можно проверить экспериментально, что мы и сделаем, как настоящие ученые. Мысленно поместим Алису и Боба в два разных города на разных континентах, то есть на очень большое расстояние друг от друга, с условием, что у обоих неподалеку есть продовольственный магазин. Так как перед нами стоит задача исключить любое влияние одного события на другое, поставим условием, что Алиса и Боб совершают покупки в один и тот же момент. И вообще, пусть лучше они находятся в разных галактиках. В таких условиях они не смогут вступить в контакт и даже воздействовать друг на друга

неосознанно (как бывает, когда кто-то зевнул<sup>1</sup>). А теперь представим себе, что их меню их ужина по-прежнему идеально коррелируют. Теперь мы не можем объяснить эту корреляцию каким-либо влиянием их друг на друга, и нам придется искать другое объяснение.

Второй вариант объяснения этого явления может быть таким: каждый день хозяева этих магазинов предлагают Алисе и Бобу одно и то же блюдо, то есть принятие решения вообще не требуется. Быть может, давным-давно владельцы двух магазинов составили меню ужинов на много лет вперед. Меню может отличаться от вечера к вечеру, но в каждый определенный день ассортимент все равно соответствует этому расписанию. К примеру, его мог бы составить руководитель сети магазинов, чтобы потом разослать по электронной почте всем членам межгалактического консорциума. В этом случае совсем неудивительно, что изо дня в день мы обнаруживаем одинаковые блюда на столах Алисы и Боба. В этом варианте объяснения блюда, что друзья получают на ужин, определяются общей причиной — событием, которое произошло достаточно давно, чтобы оказать влияние на Алису и Боба, невзирая на огромное расстояние между ними. Эта общая причина передалась непрерывно сквозь пространство от точки к точке, без скачков или разрывов. В этом случае можно говорить об общей локальной причине; общей — потому что происходит из общего прошлого, и локальной — потому что все происходит локально и непрерывно, от одной точки пространства к другой.

---

<sup>1</sup> Всем известно, что если один человек в группе зевнул, то окружающие тоже начинают зевать, осознают они это или нет. Это пример бессознательного взаимодействия между людьми. Однако второй человек обязательно должен увидеть первого зевающим, поэтому такое воздействие, конечно, не может распространяться быстрее света.

Итак, перед нами возможное логичное объяснение. Давайте подумаем: может быть, существует еще какое-нибудь объяснение? Есть ли третий способ объяснить тот факт, что Алиса и Боб каждый вечер сидят перед одним и тем же блюдом, за исключением названных двух — версии прямого влияния Алисы на Боба или Боба на Алису и существования общей локальной причины? Или другого возможного объяснения не существует? Может показаться удивительным, но ученые до сих пор его не нашли.

Все наблюдаемые наукой корреляции — за пределами квантовой физики — могут быть объяснены либо влиянием одного события на другое (объяснение первого типа), либо наличием общей локальной причины, как в истории про руководителя сети магазинов готовой еды (объяснение второго типа). Но в обоих случаях такое влияние или общая причина распространяется непрерывно из точки в точку пространства, и в этом точном смысле оба объяснения являются локальными.

Будем называть корреляции локальными, когда мы хотим сказать, что они имеют некое локальное объяснение. Дальше мы увидим, что квантовая физика предлагает нам третье возможное объяснение, которое и является предметом этой книги. Однако вне квантовой физики — в геологии, медицине, социологии или биологии — есть только два типа объяснения для всех наблюдаемых корреляций. Эти два типа объяснений являются локальными, так как они ссылаются на цепочку механизмов, которая распространяется непрерывно через пространство, из точки в точку.

Именно поиск локальных объяснений принес такой успех науке. Наука характеризуется постоянным поиском хороших объяснений, причем объяснение признается хорошим, если оно удовлетворяет трем критериям. Самый очевидный из них — точность и проверяемость. Она формализуется

через математические уравнения, позволяющие сделать предсказания, которые затем сравнивают с наблюдениями и результатами опытов. Однако я считаю, что этот критерий не самый важный, хоть и существенный. Далее, хорошее объяснение характеризуется тем, что оно всегда рассказывает некую историю. Каждый урок естествознания начинается с интересного рассказа. Как же еще можно ввести новые понятия — что такое энергия, молекула, геологический слой или корреляция? До открытия квантовой стороны физики все эти истории происходили в локальном мире, где воздействие непрерывно распространяется сквозь пространство и время. Третий определяющий критерий хорошего объяснения состоит в том, что его трудно изменить. Хорошее объяснение, или качественная гипотеза, может быть проверена экспериментально как раз потому, что ее нельзя легко адаптировать под новые экспериментальные данные, которые иначе противоречили бы ей. Поппер называл этот критерий «фальсифицируемостью».

Вернемся к Алисе, Бобу и идеальной корреляции блюд, которые они едят на ужин. Значительное расстояние между ними исключает попытки объяснить это явление прямым влиянием (тип 1). Но как можно проверить объяснение общей локальной причиной (тип 2)? В нашем примере у Алисы нет выбора. Единственный магазин возле ее дома каждый вечер предлагает только одно возможное блюдо. Такой пример слишком прост, поэтому давайте его немного усложним.

Представьте, что рядом с домом Алисы есть два магазина готовой еды. Направо пойдешь — один, налево пойдешь — другой. Поблизости от дома Боба также есть два магазина, один слева и другой справа. Алиса и Боб все так же проживают в разных галактиках и, следовательно, не могут влиять друг на друга. А теперь представим, что каждый раз каждый из них случайно принимает решение отправиться

в магазин слева, и каждый раз их ужин состоит из одного и того же блюда. Единственным локальным объяснением этой корреляции может быть общий для магазинов «слева» список, в котором определяется состоящее из единственного блюда меню на каждый вечер. То есть ситуация для магазинов «слева» такая же, как была раньше. Но ведь мы имеем дело с несколькими магазинами и можем представить несколько возможных корреляций. К примеру, пусть Алиса выбирает пойти налево, Боб — направо, а меню снова одинаковое. И остается одинаковым, если Алиса решает пойти направо, а Боб — налево. Получается, мы наблюдаем три типа корреляций: «лево-лево», «лево-право» и «право-лево», и единственное локальное объяснение для всех трех состоит в том, что общее меню-расписание есть во всех четырех магазинах.

А теперь представим, что, когда Алиса и Боб принимают решение пойти в магазин справа, их блюда никогда не совпадают. Возможно ли это? На первый взгляд, устроить такое было бы сложно.

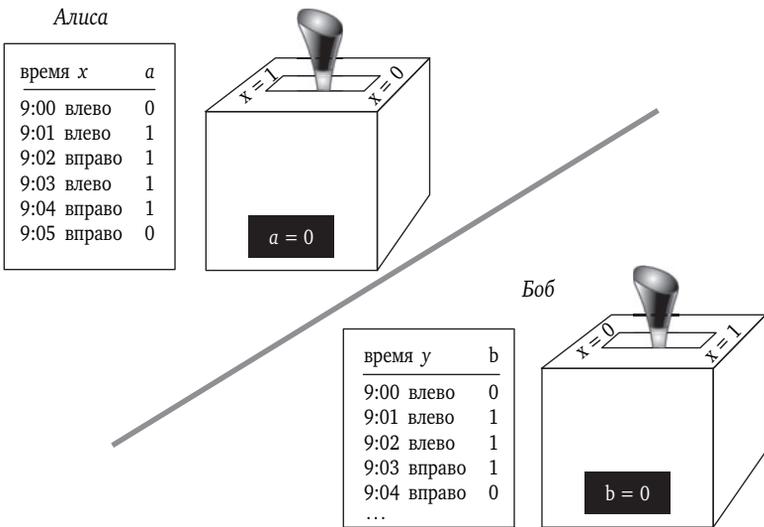
Здесь мы очень близко подходим к сути игры Белла. Поэтому оставим на время наши магазины. Пришло время применить научный подход и максимально упростить ситуацию. Далее мы будем говорить не о меню, а о результатах, а поскольку достаточно рассмотреть лишь два возможных результата, нам больше и не потребуется.

## **ИГРА БЕЛЛА**

В комплект игры входят два одинаковых на вид ящика, как показано на рис. 2.1. К каждому из них прилагается джойстик и дисплей. В состоянии покоя джойстик всегда находится в вертикальном положении. Через секунду после перевода джойстика в положение «вправо» или «влево» на дисплее

появляется результат. Такие результаты двоичны, то есть могут принимать только два значения: либо 0, либо 1. Компьютерщики сказали бы, что результаты представляют собой биты информации. Для каждого ящика, или, если угодно, прибора, результаты выглядят произвольными.

Перед началом игры Алиса и Боб берут по ящику, сверяют часы и затем удаляются друг от друга на некоторое расстояние. Ровно в девять утра и затем в каждую следующую минуту участники наклоняют свои джойстики в ту или иную сторону и аккуратно записывают показания, которые



**Рис. 2.1.** Алиса и Боб играют в игру Белла. У каждого есть ящик с джойстиком. Раз в минуту они наклоняют джойстик влево или вправо, а на дисплее отображает результат. Алиса и Боб аккуратно записывают время, свой выбор и показания с дисплея. В конце дня они сравнивают результаты и определяют победителя. Цель упражнения — понять, как работают «черный ящик», так же как дети учатся понимать поведение своих игрушек

отображаются на дисплее, — время и результат собственного выбора. Важно, чтобы выбор правого или левого направления в каждую минуту был абсолютно свободным и независимым для каждого из участников. В частности, им не разрешено придерживать одного и того же выбора, равно как и предварительно договариваться между собой. Важно также, чтобы ни один участник не знал о том, какое направление выбирает другой. Заметьте, наши друзья не жульничают, ведь они и вправду хотят понять, как работают приборы для игры Белла.

Они играют ровно до семи часов вечера, получив к концу дня 600 точек данных (примерно по 150 для каждого из случаев: лево-лево, лево-право, право-лево и право-право). Вечером они встречаются, чтобы подсчитать очки и получить общий итог игры.

Правила подсчета таковы:

1. Каждый раз, когда Алиса наклоняет джойстик влево, или Боб наклоняет джойстик влево, или оба они наклоняют джойстик влево, и *при этом показания на дисплеях совпадают*, участники получают одно очко.
2. Каждый раз, когда Алиса и Боб наклоняют джойстик вправо, и *при этом показания на дисплеях различаются*, участники получают одно очко.

Общий итог игры рассчитывается так:

— сначала для каждой из четырех комбинаций выбора (лево-лево, лево-право, право-лево и право-право) вычисляется коэффициент удачных попыток. Для этого количество полученных очков делится на общее количество попыток и затем все четыре коэффициента складываются. Максимально возможный результат игры равен 4, так как есть четыре варианта выбора

- и по каждому показателю успеха не превышает 1. Результат  $S$  должен означать, что Алиса и Боб выиграли  $S$  раз из 4. Заметим, что результат является средним и может быть принимать любое значение от 0 и 4. К примеру, результат 3,41 означает, что Алиса и Боб в среднем выиграли 3,41 раза из 4 или 341 раз из 400;
- мы увидим, что очень просто устроить ящики так, чтобы участники получали общий результат, равный 3. Поэтому иногда, говоря, что они победили в игре Белла, мы будем иметь в виду, что они выигрывали чаще, чем 3 раза из 4.

Для лучшего понимания этой странной игры давайте вообразим, что Алиса и Боб не записывают фактические показания с дисплеев, а просто выдумывают их. Другими словами, они независимо друг от друга выдают случайный результат<sup>1</sup>. В этом случае все четыре показателя удачных попыток к неудачным будут равны  $1/2$ . К примеру, если половину отведенного времени Алиса и Боб записывают один и тот же результат, а вторую половину — противоположный, вне зависимости от направления наклона джойстика, то результатом игры будет  $4 \times 1/2 = 2$ . Чтобы получить счет больше 2, ящики Алисы и Боба не могут быть полностью независимыми друг от друга — они должны быть как-то связаны, скоординированы друг с другом, чтобы выдавать коррелированные результаты.

Если пойти чуть дальше, можно рассмотреть другой пример, в котором оба ящика всегда выдают одинаковые значения показаний, равные 0, невзирая на положение джойстика. В этом случае выбор Алисы и Боба никак не влияет на результат.

---

<sup>1</sup> Заметьте, что так же можно объяснить ситуацию, в которой один из двух игроков играет добросовестно, а второй совершенно не следует правилам. В этом случае отношение успешных попыток к успешным также составит  $1/2$  с общим счетом 2.

Несложно подсчитать, что для каждой из трех комбинаций: «лево-лево», «лево-право» и «право-лево» — коэффициент удачных попыток будет составлять 1, а для комбинации «право-право» — 0. В этом случае общий счет будет равен 3.

Перед тем как рассмотреть принцип работы приборов, добавим чуть-чуть абстракции. Это подведет нас к самой сути понятия нелокальности.

### НЕЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: $a + b = x \times y$

Ученые любят описывать изучаемые объекты при помощи чисел, так же как сделали мы с показаниями ящиков Белла. Это помогает сосредоточить внимание на главном и не путаться в длинных предложениях вроде «Алиса наклонила джойстик влево и получила результат 0». Математический аппарат также помогает выполнять сложение и умножение, и мы увидим, что можно уместить понятие нелокальности в очень простом уравнении.

Сначала займемся Алисой. Пусть переменная  $x$  обозначает ее выбор, а переменная  $a$  — результат. К примеру,  $x = 0$  будет означать, что Алиса выбрала наклонить джойстик влево, а  $x = 1$  будет означать, что она наклонила его направо. Точно так же обозначим переменные для Боба:  $y$  будет обозначать его выбор, а  $b$  — результат. При таких обозначениях следующая небольшая таблица описывает случаи, в которых, согласно правилам, Алиса и Боб получают очко.

	$x = 0$	$x = 1$
$y = 0$	$a = b$	$a = b$
$y = 1$	$a = b$	$a \neq b$

Оказывается, простые арифметические действия помогут нам свести всю игру Белла, в которой у Алисы и Боба

имеется по ящику, которые далеко разнесены друг от друга, чтобы избежать какой-либо возможности копирования, где каждый из них делает свободный выбор и записывает результат, в одно элегантное уравнение:

$$a + b = x \times y,$$

то есть сумма  $a$  и  $b$  равна произведению  $x$  и  $y$ .

В самом деле, произведение  $x \times y$  всегда равно 0, кроме случая, когда  $x = y = 1$ . Следовательно, говорит нам уравнение, сумма  $a + b$  всегда равна 0, кроме случая, когда  $x = y = 1$ .

Сначала рассмотрим случай, при котором  $x = y = 1$ . Сумма  $a + b$  при этом равна 1, а так как мы договорились, что переменные  $a$  и  $b$  могут принимать только значения 0 и 1, то уравнение  $a + b = 1$  имеет два решения: или  $a = 0$  и  $b = 1$ , или  $a = 1$  и  $b = 0$ . Следовательно, если  $a + b = 1$ , то  $a \neq b$ . В этом случае в соответствии с правилами игры участники получают очко.

Теперь рассмотрим три оставшихся случая:  $(x, y) = (0, 0)$ ,  $(0, 1)$  или  $(1, 0)$ . Во всех трех случаях произведение  $x \times y$  равно 0, поэтому мы можем упростить уравнение до  $a + b = 0$ . Первое возможное решение —  $a = b = 0$ . Второе решение: это  $a = b = 1$ . Второе решение на первый взгляд кажется странным, потому что сумма  $1 + 1$  обычно равна 2. Но, так как мы считаем битами, нулями и единицами, результат также может быть представлен только как 0 или 1. В нашем случае  $2 = 0$  (математики сказали бы о сравнении по модулю 2). Следовательно, уравнение  $a + b = 0$  эквивалентно  $a = b$ .

Таким образом, одно красивое уравнение  $a + b = x \times y$  весьма лаконично описывает игру Белла. Каждый раз, когда уравнение удовлетворяется, Алиса и Боб получают очко. Теперь вы убедились, что революционные идеи

квантового мира могут выражаться довольно простой математикой<sup>1</sup>.

Это уравнение выражает явление нелокальности. Ведь для того, чтобы систематически побеждать в игре Белла, ящики должны сами вычислять произведение  $x \times y$ . Но если выбор  $x$  доступен только на приборе Алисы, а выбор  $y$  — только на приборе Боба, то такой расчет невозможно выполнить локально. В лучшем случае они могут поставить на  $x \times y = 0$ , и они будут правы в трех случаях из четырех, так что счет составит 3. Любой счет больше 3 требует «нелокального» вычисления  $x \times y$ , потому что оба множителя существуют на огромном расстоянии друг от друга.

## ЛОКАЛЬНЫЕ СТРАТЕГИИ В ИГРЕ БЕЛЛА

Итак, Алиса и Боб сидят каждый перед своим ящиком и раз в минуту принимают независимое и свободное решение, аккуратно записывают свой выбор и результаты, отображаемые на дисплеях. Что могли бы сделать их приборы, чтобы помочь игрокам получить лучший счет?

Давайте представим себе, что расстояние между участниками исключает любую возможность влияния друг на друга. Для этого мы мысленно разнесем Алису и Боба так далеко друг от друга, чтобы любой обмен информацией стал бы невозможным. К примеру, разделим их расстоянием, которое свет преодолевает более чем за минуту, то есть более чем 18 млн км. В этом крайнем случае ни Алиса, ни ее ящик не в состоянии сообщить о сделанном выборе Бобу или его прибору. Таким образом, исключается

---

<sup>1</sup> Как часто я — хороший, но непослушный студент — просил своего преподавателя квантовой физики дать объяснение, но неизменно слышал в ответ, что квантовую физику невозможно понять, так как это требует очень сложного математического аппарата.

какое бы то ни было воздействие, и нам придется искать другое объяснение.

Я начну с анализа случая, в котором в результате совпадения оба джойстика оказываются в левом положении. В этом случае Алиса и Боб получают очко лишь тогда, когда показания их приборов одинаковы. Мы уже рассматривали такую ситуацию, где покупатели в магазинах всегда получают одно и то же блюдо на ужин в случае, если выбирают магазин слева. И видели, что при исключении всех прямых воздействий единственно возможным объяснением будет то, что у магазинов нет никакого выбора: они просто предлагают то, что предписано. Применительно к ящикам в игре Белла это означает, что если джойстики передвинуты влево, то они должны выдать один и тот же результат. Эти показания предопределены для каждой отдельной минуты, но могут изменяться от минуты к минуте, точно так же как единственное меню может быть иным на каждый вечер. Так мы получаем объяснение максимальной корреляции в случае, когда оба джойстика отклонены влево. Как мы уже знаем, это объяснение второго рода — через общую локальную причину: предопределенные для каждой минуты результаты должны быть записаны в каждом приборе, то есть локально.

Но продолжим анализ. Те результаты, которые изначально записаны в ящиках, могли быть получены многократным подбрасыванием монеты. Для Алисы они выглядят совершенно произвольными, как и для Боба. Однако когда друзья встретятся и обнаружат, что всегда получали одинаковые результаты, они уже не смогут поверить, что это произошло случайно — разве что если это была нелокальная случайность. Мы вернемся к этому позже.

**СПРАВКА 2. Случайность.** Когда мы говорим о результате «случайный», мы имеем в виду «неожиданный». Но неожиданный

для кого? Многие вещи происходят неожиданно либо потому, что являются результатом слишком сложных для понимания процессов, либо потому, что мы не учли всех деталей, которые повлияли на результат. Однако истинно случайный результат является неожиданным потому, что он непредсказуем *в силу своей природы*. Этот результат не обусловлен никакой причинно-следственной цепочкой, даже самой сложной. По-настоящему случайный результат не может быть предугадан — потому что до того, как он возник, он просто не существовал и не был необходимым. Его реализация предстает как чистый акт творения.

Чтобы наглядно проиллюстрировать эту идею, представим, что Алиса и Боб случайно встречаются на улице. Возможно, Алиса шла в ресторан, который находится на этой улице, а Боб решил зайти к другу, который живет на соседней. Начиная с того момента, когда каждый из них решил пойти пешком, наикратчайшим путем, Алиса — в ресторан, а Боб — к другу, эта встреча стала предсказуема. Это пример двух причинно-следственных цепочек: пути друзей пересекаются, создавая видимость случайной встречи. Но для кого-то, кто видит всю систему в целом, эта встреча предсказуема. Их встреча кажется случайной лишь вследствие недостаточной информации: Боб не знал, куда идет Алиса, и наоборот. Но каково было положение перед тем, как Алиса решила пойти в ресторан? Если мы согласимся, что Алиса свободна в своем выборе, то, перед тем как она приняла это решение, встреча действительно была непредсказуемой. Истинная случайность как раз такова.

Истинная случайность, таким образом, не имеет причины в том смысле, который подразумевается в классической физике. Результат истинного случая никоим образом не предопределен. Но тут необходимо уточнить, что событие, выглядящее как истинно случайное, может иметь

причину. Дело лишь в том, что эта причина определяет не результат, а только предрасположенность к реализации определенного результата.

В схеме с общей локальной причиной каждый ящик каждую минуту выдает некий предопределенный результат, и список этих результатов составлен заранее и записан в каждом ящике. Можно представить себе, что внутри каждого ящика спрятан маленький компьютер с большим объемом памяти, часами и программой, которая с интервалом в одну минуту считывает следующую запись из таблицы.

В зависимости от программы результат может зависеть или не зависеть от положения джойстика. Но какие программы исполняют ящики Алисы и Боба? Существует ли бесконечное или, по крайней мере, очень большое количество возможных программ? На самом деле нет, ведь мы применили научный подход и упростили ситуацию до бинарного выбора, что ограничивает количество возможных вариантов до четырех для каждого из ящиков. В самом деле, программа должна выводить один из двух возможных результатов для каждой из двух возможных выборов.

В приборе Алисы могут работать четыре возможных программы<sup>1</sup>:

1.  $a = 0$ , вне зависимости от значения  $x$ .
2.  $a = 1$ , вне зависимости от значения  $x$ .

---

<sup>1</sup> Понятие «программа» в нашем случае абстрактно и подразумевает, что *такие-то результаты получаются из таких-то данных*. Очевидно, что абстрактная программа может быть записана разными способами, на разных языках программирования и, возможно, с большим количеством необязательных строк. Бывает сложно увидеть, что две программы, написанные по-разному, на самом деле соответствуют одному и тому же абстрактному алгоритму.

3. Значение результата идентично значению выбора, то есть  $a = x$ .
4. Значение результата всегда отличается от значения выбора, то есть  $a = 1 - x$ .

То же самое справедливо для прибора Боба. Это означает, что общее количество комбинаций программ для обоих приборов равно:  $4 \times 4 = 16$ . Конечно, программа Алисы, как и программа Боба, может меняться от минуты к минуте, но для каждой конкретной минуты одна из четырех программ в ящике Алисы определяет результат  $a$  и одна из четырех программ в приборе Боба определяет результат  $b$ .

Давайте изучим эти 16 возможных комбинаций и рассчитаем соответствующие им результаты игры. Помните, что наша цель — найти максимально возможный счет в рамках локального объяснения. Мы увидим, что невозможно создать аппараты, использующие локальные стратегии, которые бы давали счет больше 3. Вы можете принять мои слова на веру и сразу перейти к странице раздела «Победить в игре Белла: нелокальные корреляции» или убедиться в этом самостоятельно, потратив время на рассуждения в следующем абзаце. И я настоятельно рекомендую сделать именно так.

**Таблица 2.1.** Итоговый счет для 16 возможных комбинаций программ, исполняемых двумя устройствами

Программа Алисы	Программа Боба	Результаты для выбора				Счет
		$(x, y) = (0, 0)$	$(x, y) = (0, 1)$	$(x, y) = (1, 0)$	$(x, y) = (1, 1)$	
1	1	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 0$	3
1	2	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 1$	1
1	3	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 1$	3
1	4	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 0$	1

Программа Алисы	Программа Боба	Результаты для выбора				Счет
		$(x, y) = (0, 0)$	$(x, y) = (0, 1)$	$(x, y) = (1, 0)$	$(x, y) = (1, 1)$	
2	1	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 0$	1
2	2	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 1$	3
2	3	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 1$	1
2	4	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 0$	3
3	1	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 0$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 0$	3
3	2	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 1$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 1$	1
3	3	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 1$	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 1$	1
3	4	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 0$	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 0$	3
4	1	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 0$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 0$	1
4	2	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 1$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 1$	3
4	3	$a = 1, b = 0$	$a = 1, b = 1$	$a = 0, b = 0$	$a = 0, b = 1$	3
4	4	$a = 1, b = 1$	$a = 1, b = 0$	$a = 0, b = 1$	$a = 0, b = 0$	1

Начнем с сочетания программы № 1 для Алисы и программы № 1 для Боба. В этом случае оба результата всегда будут равны 0, то есть  $a = b = 0$ , и Алиса и Боб выигрывают три раза из четырех. В самом деле, они проигрывают лишь в том случае когда оба выбирают 1. Возьмем второе сочетание, скажем программу № 1 для Алисы (и поэтому всегда  $a = 0$ ) и программу № 3 для Боба (поэтому  $b = y$ ). Рассмотрим четыре пары возможных выборов, которые они могут сделать. При  $x = 0$  и  $y = 0$  значение результата будет  $(0, 0)$ , и Алиса и Боб выигрывают — в смысле зарабатывают очко. При  $x = 0$  и  $y = 1$  участники проигрывают, так как результат будет  $(0, 1)$ . При  $x = 1$  и  $y = 0$  результатом является  $(0, 0)$ , значит, Алиса и Боб выигрывают. И наконец, при  $x = 1$  и  $y = 1$  значение результата будет  $(0, 1)$ , что снова означает выигрыш, ведь при  $x = y = 1$  цель состоит в том,

чтобы получить разные результаты. Суммируем и получаем, что Алиса и Боб снова заработают 3 очка.

Теперь вы можете самостоятельно завершить доказательство для оставшихся 14 комбинаций вариантов программ. Или просмотреть готовые результаты, представленные в таблице 2.1.

Подведем итог. Какова бы ни была локальная стратегия создателя ящиков и какова бы ни была вследствие этого комбинация программ, Алиса и Боб никогда не смогут выиграть игру Белла более трех раз из четырех возможных. Физики предпочитают выражать это в виде неравенства. Оно называется неравенством Белла<sup>1</sup>. Учитывая, что это неравенство самым прямым образом относится к теме книги, я выпишу его здесь. Если даже вы не сможете полностью уяснить его значение, попытайтесь оценить его восхитительное изящество, в чем-то похожее на красоту музыкальной партитуры:

$$P(a = b|0, 0) + P(a = b|0, 1) + P(a = b|1, 0) + P(a \neq b|1, 1) \leq 3.$$

Выражение  $P(a = b|x, y)$  читается следующим образом: вероятность того, что  $a$  равно  $b$ , при условии, что сделан определенный выбор  $x$  и  $y$ . Выражение  $P(a \neq b|1, 1)$  читается так: вероятность того, что  $a$  отличается от  $b$ , при сделанном выборе  $x = y = 1$ . Неравенство Белла утверждает как раз то, что мы только что обнаружили, а именно что сумма всех четырех вероятностей в игре Белла, которая дает счет

---

<sup>1</sup> Точнее, это самое простое из семейства неравенств Белла, эквивалентное неравенству CHSH, которое было названо по первым буквам фамилий его первооткрывателей: J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, R. A. Holt: *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969). Другие неравенства описывают случаи с большим количеством вариантов выбора, возможных результатов или большим количеством игроков.

игры, не может быть больше 3. Для локальных корреляций неравенство Белла всегда удовлетворяется.

**СПРАВКА 3.** Неравенство Белла. В общем смысле вероятность  $P(a, b|x, y)$  возникает из статистической смеси различных возможных ситуаций. К примеру, первая возможная ситуация, традиционно обозначаемая  $\lambda_1$ , может произойти с вероятностью  $p(\lambda_1)$ , вторая возможная ситуация  $\lambda_2$  — с вероятностью  $p(\lambda_2)$  и так далее. Эти вероятности  $p(\lambda)$  также могут использоваться для анализа в случаях, когда мы не знаем точно реальную ситуацию. На самом деле нам даже не нужно знать вероятность наступления конкретной ситуации. Достаточно знать, что разные ситуации возникают с разной вероятностью.

Эти ситуации  $\lambda$  могут включать квантово-механическое состояние системы, обычно обозначаемое как  $\psi$ . То есть они могут включать всю прошлую жизнь Алисы и Боба или даже состояние всей вселенной, кроме одного — выбор  $x$  и  $y$  должен быть независим от  $\lambda$ . С другой стороны,  $\lambda$  может быть очень и очень ограничено, подобно выбору стратегий Алисы и Боба в игре Белла. Когда-то  $\lambda$  называли локальными скрытыми переменными, но лучше рассматривать их как физическое состояние систем (к примеру, ящиков Алисы и Боба), описываемое любой современной или будущей теорией. Итак, неравенства Белла что-то сообщают нам о структуре любой будущей физической теории, совместимой с сегодняшними экспериментами. При этом единственное допущение относительно  $\lambda$  состоит в том, что они не содержат информации о выборе  $x$  и  $y$ .

Для каждой ситуации  $\lambda$  условная вероятность всегда может быть выражена как

$$P(a, b|x, y, \lambda) = P(a|x, y, \lambda) \cdot P(b|x, a, \lambda).$$

Предположение о локальности позволяет утверждать, что для любой  $\lambda$  происходящее в приборе Алисы не зависит от происходящего в приборе Боба, что выражается как  $P(a|x, y, \lambda) = P(a|x, \lambda)$  и наоборот:  $P(b|x, y, a, \lambda) = P(b|y, \lambda)$ .

В итоге допущение, лежащее в основе всех неравенств Белла, может быть найдено путем усреднения по всем возможным ситуациям  $\lambda$ :

$$P(a, b|x, y) = \sum_{\lambda} \rho(\lambda) \cdot P(a|x, \lambda) \cdot P(b|y, \lambda),$$

где  $\rho(\lambda)$  означает вероятность наступления ситуации  $\lambda$ .

До сих пор мы считали, что ящики Алисы и Боба содержат предустановленные программы, которые определяют результаты как следствие выбора  $x$  и  $y$ . (В информатике  $x$  и  $y$  называются входными данными). Но что будет, если эти программы не полностью определяют результат, но оставляют некоторое место случаю? Представим себе, например, что время от времени прибор Алисы случайно выбирает, исполнять ли ему программу № 1 или программу № 3, или же он время от времени просто выдает случайный результат. Можно ли это помочь им выиграть в игру Белла?

Нужно отметить, что выдать случайный результат — это, в сущности, то же самое, что осуществить случайный выбор между программой № 1 (которая выдает  $a = 0$ ) и программой № 2 (которая выдает  $a = 1$ ). Оказывается, эта стратегия бесполезна. Игра Белла подразумевает большое количество повторений и расчетов средних значений. Если в данную минуту прибор Алисы случайно выбирает одну программу из некоторого набора программ, то счет игры не будет отличаться от того, что мы получили бы, если бы ящик в каждую минуту использовал одну конкретную программу, выбранную случайным образом из этого набора. Учитывая, что в каждую минуту ящики используют одну специфическую

программу, это не является ограничением. Введение случайных стратегий никак не поможет Алисе и Бобу выиграть игру Белла; на самом деле наоборот. Как мы уже видели, если приборы Алисы и Боба независимо производят случайные результаты, они получают только 2 очка.

Подводя итог, скажем, что никакая локальная стратегия не поможет выиграть в игру Белла более чем три раза из четырех. Как сказал бы физик, никакая локальная корреляция не может нарушить неравенство Белла. Другими словами, если бы Алиса и Боб все же сумели выиграть более часто, чем три раза из четырех, этому явлению не было бы локального объяснения.

Как мы уже знаем, существует только два типа локальных объяснений: первый основан на непрерывном распространении воздействия от одной точки к другой через пространство, а второй основан на существовании общей причины, что также подразумевает непрерывное распространение воздействия в пространстве из некоего общего момента в прошлом. В нашем случае объяснения первого типа исключаются огромным расстоянием между Алисой и Бобом и, как мы только что видели, объяснение второго типа не позволяет выиграть в игру Белла более чем три раза из четырех.

## **ПОБЕДИТЬ В ИГРЕ БЕЛЛА: НЕЛОКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ**

Теперь представим, что Алиса и Боб играют очень давно и выигрывают в среднем гораздо чаще, чем три раза из четырех. Как раз это и становится возможным благодаря явлению запутанности в квантовой физике. Но пока мы отложим этот поразительный раздел физики в сторону и просто рассмотрим гипотезу о том, что Алиса и Боб выигрывают очень часто.

Мы уже исключили возможность их влияния друг на друга или какой-либо связи между их приборами даже посредством каких-либо еще не открытых волн (к этой важной гипотезе мы вернемся позже). Мы только что видели, что если приборы производят результат локально в зависимости от времени и положения джойстика, а значит, в зависимости от выбора оператора, то выиграть более, чем три раза из четырех невозможно. Другими словами, невозможно выиграть более, чем три раза из четырех, если пользоваться локальными стратегиями, что означает использование механизма последовательного распространения от точки к точке сквозь пространство.

Именно поэтому корреляции, которые позволяют выигрывать в игру Белла чаще, чем три раза из четырех, называют нелокальными. Но как Алиса и Боб могут сделать это со своими ящиками?

Если бы мы спросили об этом физика до открытия квантового мира, скажем до 1925 года, ответ был бы очень прост. Он сказал бы, что это совершенно невозможно. Чтобы выигрывать чаще, чем три раза из четырех, Алиса и Боб, или по крайней мере их приборы, должны были бы каким-то образом хитрить. Либо иметь возможность обмениваться информацией, либо оказывать влияние друг на друга, пусть даже неосознанно, как, зевнув сам, заставляешь зевать окружающих. Но если исключить всякую связь, для физика до квантовой эпохи такой результат был бы невозможен.

А вы? Вы понимаете, как выиграть больше, чем три раза из четырех? Вы верите, что это возможно? Сожалею, что приходится терзать ваше серое вещество этой игрой, но она действительно выражает суть нелокальности. Сейчас мы похожи на средневековых людей, которым сказали, что Земля круглая, как шар, и где-то на противоположной его стороне тоже живут люди. Как же они тогда с нее не падают? Сегодня

каждый знает, что все предметы, включая людей, падают к центру Земли, а не просто сверху вниз. И люди на другой стороне планеты притягиваются к ней так же, как магниты к дверце холодильника. Благодаря магнитам мы можем себе представить, как Земля притягивает нас, так что ни австралийцы, ни европейцы не сорвутся.

Но как быть с игрой Белла? Где для нее аналог магнитов на холодильнике? Какая история могла бы объяснить это? К сожалению, я не могу дать вам интуитивно понятное объяснение того, как именно квантовая запутанность позволяет выигрывать чаще, чем три раза из четырех. Но я могу пригласить вас продолжить путешествие в мир атомов и фотонов, поиграть в эту странную игру и посмотреть, что интересного или даже полезного может из этого получиться. Давайте посмотрим, что это значит для нашей картины мироздания. Давайте разберем эти корреляции, так же как ребенок разбирает игрушку, чтобы посмотреть что у нее внутри.

**СПРАВКА 4. Джон Белл: «Я квантовый инженер, но по воскресеньям у меня есть принципы».** По счастью, я довольно часто встречал Джона Белла. Вот история одной из наших первых встреч.

«Я квантовый инженер, но по воскресеньям у меня есть принципы», — так начал разговор Белл во время нашей довольно необычной встречи в марте 1983 года. Я никогда не забуду эти слова! Джон Белл, знаменитый Джон Белл, представился инженером, то есть одним из тех практиков, которые знают, как заставить вещи работать. А для меня, недавно получившего докторскую степень в области теоретической физики, Джон Белл был гигантом среди теоретиков.

В 1983 году общество физических исследований кантона Во организовало ежегодную тренинг-сессию. На неделю в Монтане собрались преподаватели и физики-исследователи,

посвящавшие половину времени катанию на лыжах, а вторую половину — лекциям известных ученых. В том году главной темой были основы квантовой физики, и это означало возможность встретиться с Аленом Аспе, первым человеком<sup>1</sup>, который одержал победу в игре Белла, и несколько вечеров кататься с ним на лыжах. Джон Белл был в числе приглашенных, потому что не сделать этого было невозможно, но он не был заявлен в программе лекций, по особым для этой части научного сообщества причинам, что, очевидно, было страшной глупостью. Мы с другом попросили Белла устроить для нас импровизированное выступление. Сначала он отказывался, ссылаясь на то, что он не привез свои слайды, но в конце концов однажды вечером после ужина этот нелегальный экспромт состоялся — в подвале, на скорую руку оборудованном под лекционный зал, где слушатели разместились на полу. Инженер с принципами рассказывал нам о практическом применении физики в разработке приложений, в сложных или занятых экспериментах, а также для того, чтобы выявить эмпирические правила, которые прекрасно работают на практике. И еще рассказал о том, что нельзя упускать из вида главную цель научного познания: дать систематическое объяснение природы. С тех пор эта мысль всегда со мной.

## **ВЫИГРЫШ В ИГРЕ БЕЛЛА НЕ ПРЕДПОЛАГАЕТ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ**

Предположим, что Алиса и Боб выигрывают чаще, чем 3 раза из 4, а возможно, даже каждый раз. Могут ли они

---

<sup>1</sup> Американский физик Джон Клаузер (John Clauser) получил подобный результат несколькими годами ранее, но его ящики не исключали возможности обмена информацией. Более того, они выдавали только один результат, к примеру 0, а другой результат — 1 — получался посредством косвенных измерений.

использовать это для обмена информацией<sup>1</sup>? Мы помним, что они разделены огромным расстоянием, и такая коммуникация подразумевает передачу информации со сколь угодно высокой скоростью.

Как Алиса могла бы передать некую порцию информации Бобу? Единственным средством является отклонение джойстика. К примеру, «налево» может означать «да», а «направо» — «нет». Но, с точки зрения Боба, его ящик, его прибор производит результаты лишь случайно. Каким бы ни было положение его джойстика, два возможных результата  $b = 0$  и  $b = 1$  возникают одинаково часто, и это остается справедливым при любом положении джойстика Алисы. Таким образом, не существует способа использовать корреляции в игре Белла для передачи послания от Алисы Бобу (или наоборот). Мы можем заметить корреляцию, только сравнив показания двух приборов. Вспомните наш странный «телефон» из главы 1.

Таким образом, Алиса и Боб не могут использовать свои приборы для общения<sup>2</sup>. Только сравнив свои результаты, то есть тогда лишь, когда они прекратили игру и встретились в конце дня, они могут установить, выиграли они или проиграли.

---

<sup>1</sup> Не нужно путать гипотезу о какой-то «невной» связи между двумя приборами с целью выиграть в игре Белла с возможностью Алисы и Боба использовать корреляции, которые возникают в их приборах, чтобы общаться друг с другом. Первая предполагает скрытую коммуникацию, которую можно назвать «влиянием». Во втором случае Алиса и Боб получают возможность общаться без необходимости понимать или управлять внутренними процессами в своих ящиках.

<sup>2</sup> С формальной точки зрения корреляция  $P(a, b|x, y)$  не может быть использована для коммуникации, если маргинальные распределения не зависят от входных данных с другой стороны, т. е. если  $\sum_b P(a, b|x, y) = P(a|x)$  и  $\sum_a P(a, b|x, y) = P(b|y)$ .

Таким образом, между Алисой и Бобом нет соединения, по которому они могли бы связываться. Общение исключительно через игру Белла подразумевало бы связь без какой-либо физической сущности для передачи сообщения от передатчика к приемнику. Но тогда это была бы коммуникация без передачи, что невозможно (см. справку 5).

Но, может быть, существует какой-то неизвестный вид связи, какая-то «невидимая нить», которая соединяет два прибора и позволяет если не общаться, то хотя бы просто выигрывать в игру Белла? Если бы такая связь существовала, мы бы сразу разгадали этот «фокус». Было бы жаль узнать, что это лишь обычная ловкость рук.

**СПРАВКА 5. Коммуникации без передачи не бывает.** Когда

один человек, скажем Алиса, хочет передать сообщение другому, скажем Бобу, он должен сначала написать его на каком-то физическом носителе. Сообщение затем перемещается из точки в точку пространства посредством этого носителя, скажем письма, электронов или фотонов. Боб получает этот физический носитель и читает или расшифровывает сообщение. Иными словами, сообщение передается непрерывно из одной точки в другую через пространство от Алисы к Бобу. Любой другой способ передачи сообщения не считается физическим.

К примеру, если Алиса поместит сообщение на какой-то физический носитель, но ничто не уйдет от нее в том смысле, что ни одна физическая сущность не покинет точку пространства, в которой она находится, то у нее не будет способа передать сообщение. Иначе, как это понимал уже Ньютон (см. справку 1), состоится коммуникация без передачи, а невозможно общаться, если что-то физическое, такое как вещество, или волны, или энергия, не уйдет от Алисы, когда она выбрала послание для отправки партнеру.

Это, очевидно, вопрос здравого смысла. Если бы кто-то вдруг нарушил этот принцип, скажем используя телепатию, он мог бы передавать информацию с любой скоростью. Действительно, если нам не нужен носитель послания, то и расстояние между Алисой и Бобом не будет иметь значения, и произвольно увеличивая это расстояние, мы получим сколь угодно высокую скорость коммуникации, в том числе и выше скорости света. Но невозможность такого действия еще более фундаментальна, чем сама теория относительности, которая запрещает движение со сверхсветовой скоростью: нефизическая коммуникация невозможна.

Однако для физика это могло бы означать важное открытие. На чем основана эта связь? Как она работает? Как быстро она может передавать гипотетические скрытые воздействия между приборами? Пока запомним, что мы не видим и не ощущаем никакой связи, а два наших прибора расположены так далеко друг от друга, что никакое воздействие, распространяющееся со скоростью света, не успело бы достичь пункта назначения вовремя. Более того, друзьям не требуется знать о местоположении друг друга. Они могут взять свой прибор и переместиться в некую неизвестную точку пространства.

## **ПОД КРЫШКОЙ ПРИБОРА**

В 1964 году, когда Джон Белл впервые представил свою игру в виде неравенства, это был лишь мысленный эксперимент. Но с тех пор эта игра была воплощена в жизнь во многих исследовательских лабораториях. Итак, откроем же наши приборы — эти волшебные ящики, поскольку они позволяют победить в игре Белла.

Заглянув внутрь, мы увидим полный комплект физического оборудования, включая лазеры (красный, зеленый

и даже замечательно желтый), криостат (устройство, с помощью которого поддерживается температура близкая к абсолютному нулю, то есть около  $-270^{\circ}\text{C}$ ), оптоволоконные интерферометры (оптические контуры для фотонов), два детектора фотонов (способные фиксировать частицы света) и часы (см. рис. 2.2). Но все это не добавляет ясности.

Рассмотрев оборудование более пристально, мы замечаем, что в центре криостата, в месте пересечения всех лазерных лучей, есть маленький кристалл, несколько миллиметров в поперечнике, похожий на кусочек стекла. Этот внешне незначительный кристалл определенно находится в центре установки. В самом деле, перемещение джойстика вправо или влево вызывает серию лазерных импульсов, которые попадают на кристалл и активируют пьезоэлемент<sup>1</sup> в подключенном к нему интерферометре. Этот пьезоэлемент чуть-чуть сдвигается в ту же сторону, что и джойстик. Тогда срабатывает один из фотодетекторов, и наш ящик выдает 0 или 1. Очевидно, что джойстик как-то влияет на кристалл посредством лазерных импульсов, а затем определяет состояние интерферометра через пьезоэлемент. В итоге детектор выдает результат. Два прибора совершенно идентичны. Все-таки кажется, что секрет кроется в крошечном кристалле в сердце нашего прибора.

Но обследование приборов не дает нам ясности, и в этом основной посыл этой главы. Просто исследуя устройство приборов и то, как они работают, даже с максимальной детализацией, мы никогда не найдем удовлетворительного

---

<sup>1</sup> Когда на пьезоэлемент оказывается механическое давление, он генерирует электрическую разность потенциалов, и наоборот, когда мы прилагаем разность потенциалов, пьезоэлемент сжимается. Самый знакомый пример — это зажигалка для газовой плиты. От давления возникает электрическое напряжение, которое внезапно разряжается в форме искр. Другой пример — сапфировые иглы записывающих устройств.

объяснения. В любом случае мы уже знаем, что не существует локального объяснения для победы в игре Белла, поэтому мы никак не найдем его, заглядывая локально под крышку каждого из приборов! Вернемся немного назад. В конце концов, все это сложное оборудование служит лишь для того, чтобы выдать нам двоичный результат каждый раз, когда джойстик наклонен вправо или влево. Следовательно, даже если механизм очень сложен, все, на что устройство способно, это выводить результат одной из четырех программ, описанных выше (см. с. 46). А что еще оно может делать-то? Еще раз повторю, что есть только два возможных положения джойстика и только один двоичный результат. Использование нескольких лазеров, криостата и детекторов фотонов кажется избыточным для выполнения такой простой программы. Но эта установка делает больше, ведь она помогает нам выиграть!

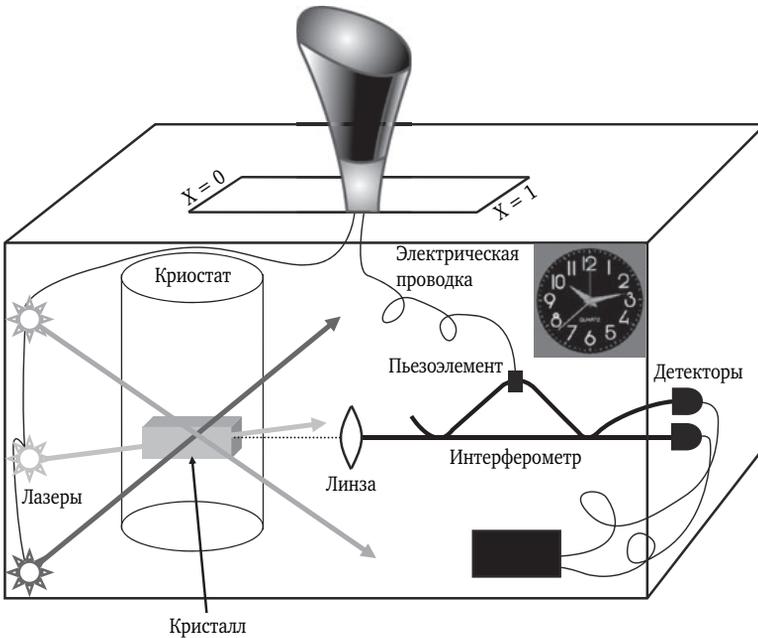
Физик доквантовой эпохи потратил бы много времени на изучение приборов и все равно ничего не понял бы, поэтому читатель не должен стыдиться, что тоже не понимает, что происходит внутри. Мы узнаем решение в главе 6, а пока отметим только, что главными элементами наших приборов являются кристаллы, и эти кристаллы запутаны<sup>1</sup>. Но что это значит? Пока «запутанность» — это лишь слово, которое мы используем как имя для концепции квантовой физики, которая позволяет нам победить в игре Белла. Будем же терпеливы!

---

<sup>1</sup> Для специалистов мы должны уточнить, что не весь кристалл Алисы запутан с кристаллом Боба. Каждый из кристаллов состоит из нескольких миллиардов ионов редкоземельных элементов. Несколько коллективных возбуждений этих ионов в кристалле Алисы запутано с аналогичным возбуждением ионов в кристалле Боба. (Christoph Clausen, Imam Usmani, Félix Bussi eres, Nicolas Sangouard, Mikael Afzelius, Hugues de Riedmatten, and Nicolas Gisin: Quantum storage of photonic entanglement in a crystal, Nature 469, 508–511, January 2011.)

В итоге нам не так важно, что именно находится в приборах. Важно лишь то, что физики знают — в принципе, как построить приборы, которые позволят Алисе и Бобу выиграть в более чем трех случаях из четырех, и что главный ингредиент проходит под именем «запутанность».

Сама возможность победы в игре Белла — это уже значительный вывод, такой же ослепительно ясный, как фотография Земли в пустоте космоса: Земля круглая, а квантовая физика предсказывает нелокальные корреляции.



**Рис. 2.2.** Внутри ящика Белла Алиса и Боб обнаруживают сложный набор физического оборудования. Однако, ограничиваясь лишь локальным наблюдением за содержимым двух ящиков, Алиса и Боб не могут понять, как работает игра Белла, потому что она способна производить корреляции, не имеющие локального объяснения



## Глава 3

# НЕЛОКАЛЬНОСТЬ И ИСТИННАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ

Мы уже знаем, что довольно просто получить в игре Белла счет 3. К примеру, достаточно заранее договориться каждый раз выдавать один и тот же результат. Но мы также видели, что нельзя указать никакую локальную стратегию, применяемую независимо друг от друга, Алиса и Боб могли бы выигрывать чаще, чем три раза из четырех. Это было основным выводом главы 2.

Но если два игрока действительно побеждают, то есть получают более 3 очков из четырех, какой вывод мы обязаны сделать? Первое и самое очевидное заключение сводится к двум вариантам: либо они воздействуют друг на друга каким-то неуловимым образом, либо каким-то образом жульничают. Но предположим, что в наших силах исключить эти две возможности. Тогда можно допустить, что мы ошиблись в умозаключениях, представленных в главе 2. Многие физики и философы потратили годы на изучение этого. Почему бы

и вам не потратить на это несколько минут? Помните, что никогда нельзя принимать доводы на веру. У каждого есть право и долг проверять научные рассуждения самому. Очень важно, что доказательство невозможности выиграть в игру Белла без коммуникации очень простое и ясное. Действительно, каждый из двух игроков может выбрать только одну из четырех возможных стратегий. Таким образом, есть всего лишь  $4 \times 4 = 16$  возможных комбинаций стратегий и ни одна из них не дает возможности выигрывать чаще, чем три раза из четырех (см. таблицу 2.1 в главе 2). Просмотрите доказательство еще раз и попробуйте объяснить его другу.

Есть все основания быть уверенным в беспорности этого доказательства. Оно совершенно надежно и проверено тысячами физиков, философов, математиков и специалистов по информатике и вычислительной технике. Но зачем тогда вообще обсуждать проблему выигрыша со счетом больше, чем три из четырех, если это считается невозможным? Это действительно жгучий вопрос. Доказательство настолько просто, что, если бы не квантовая физика, никому не было бы до него дела. Оно так и оставалось бы очевидным фактом среди кучи других неинтересных очевидных фактов, не применимых ни к чему стоящему. Есть единственная причина приглядеться к этому вопросу: дело в том, что современная физика может выиграть в эту игру, даже если игроки не обмениваются информацией и не жульничают.

## **НЕЛОКАЛЬНОЕ ЦЕЛОЕ**

Вернемся к нашему вопросу: какой вывод мы можем сделать из того, что кто-то систематически выигрывает в игру Белла более, чем 3 раза из 4? Единственная возможность такова: приборы Алисы и Боба, хотя они и разделены пространственно, не разделены логически. Несмотря на расстояние

между ними, мы не можем описать ящик Алисы на одной стороне и ящик Боба на другой как отдельные сущности. Другими словами, мы не можем просто сказать, что делает прибор Алисы с одной стороны и что делает прибор Боба с другой. Все происходит так, как будто, несмотря на расстояние между ними, приборы действуют как одна сущность, которую нельзя логически разделить на две части. Короче говоря, они составляют нелокальное целое.

Но что такое нелокальное целое? Теперь вам стало понятнее? Скорее всего нет, только если вы не гений! Здесь слово «нелокальное» означает нечто, которое не может быть описано как две независимых и хорошо локализованных части. Конечно, Алиса и Боб со своими ящиками хорошо локализованы, как любые нормальные люди или ящики. Мы можем окружить их железобетонными стенами и покрыть свинцовой оболочкой или принять другие подобные меры, но мы не сможем описать их поведение отдельно друг от друга: вот так себя ведет прибор Алисы, а вот этак — прибор Боба. В самом деле, если бы каждый из них имел собственное поведение и, следовательно, руководствовался бы своей стратегией, выиграть в игру Белла было бы невозможно. И это утверждение остается справедливым, даже если стратегии и поведение оговорены и скоординированы заранее, еще до того, как приборы разнесли в пространстве.

И здесь мы подходим к замечательному выводу, который не так просто переварить. Если Алиса и Боб завершают игру со счетом более чем 3 из 4, мы вынуждены признать, что, несмотря на расстояние между ними и возможность идентифицировать двух игроков, такой результат их игры не может быть получен локально, отдельно на приборе Алисы и отдельно на приборе Боба. *Эти результаты получаются нелокальным образом.* Все происходит так, как будто прибор Алисы «знает» что делает прибор Боба, и наоборот.

**СПРАВКА 6. Нелокальные расчеты.** Выигрыш в игре Белла означает, что результаты Алисы и Боба соотносятся друг с другом таким образом, что удовлетворяют уравнению  $a + b = x \times y$  чаще, чем 3 раза из 4. Иначе говоря, произведению  $x \times y$  дается правильная оценка чаще, чем это было бы возможно локально, невзирая на то, что входные переменные  $x$  и  $y$  нигде не существуют вместе, то есть  $x$  известен только Алисе с ее прибором, а  $y$  — только Бобу с его прибором. Здесь на поверхность выходит идея удивительного вычислительного устройства — квантового компьютера, хотя эта история очень длинная и выходит далеко за пределы этой книги (и фактически приходится говорить скорее о квантовом процессоре, чем о настоящем универсальном компьютере).

## ТЕЛЕПАТИЯ И ИСТИННЫЕ БЛИЗНЕЦЫ

В этом месте некоторые читатели могут подумать о телепатии или, быть может, о близнецах, которые, будучи разделены, принимают одинаковые решения и болеют одинаковыми болезнями. Но этот соблазнительный путь никуда не ведет.

Начнем с близнецов. Что характеризует близнецов, так это факт обладания ими одинаковым набором генов. Они несут в себе один и тот же генетический «чертеж» и потому имеют похожую внешность и довольно часто неотличимы друг от друга. Они похожи на локальных Алис и Бобов, которые руководствуются стратегиями, как близнецы — генетическими инструкциями. Но мы видели, что, какими бы ни были стратегии, избранные Алисой и Бобом или записанные в их приборах, друзья не могут выиграть. Точно так же два идентичных близнеца, даже если влияние среды на обоих в течение жизни было совершенно одинаковым, никогда не смогут победить в игре Белла. Таким образом,

аналогия с близнецами прекрасна для понимания локальных корреляций, но никак не помогает понять, как же выиграть. Напротив, даже идеальные близнецы не могут выиграть игру Белла<sup>1</sup>.

А что можно сказать про телепатию? Если бы это явление существовало, оно позволило бы двум людям мысленно общаться на расстоянии. Но для победы в игре Белла нам не нужно обмениваться информацией. Достаточно выдавать случайные результаты, но в организованном порядке. Каждый из приборов должен в некотором смысле «знать», что делает другой, но сами игроки не могут использовать это «знание» для передачи информации. Следовательно, чтобы выиграть, игроки не используют телепатию, даже если мы представим себе, что их приборы обладают этим даром.

Лично мне не нравится идея аппаратов, обладающих телепатией, потому что это ничего не добавляет к нашему пониманию. Мне представляется, что при этом одно слово («нелокальность») просто заменяют другим словом («телепатия»). Но если вам кажется, что подобная терминология поможет вам ухватить суть, то почему бы нет, но имейте в виду, что это не люди обладают телепатией, а приборы или встроенные в них кристаллы. Более того, эта терминология сбивает с толку, потому что само понятие телепатии подразумевает наличие передатчика и приемника. Позже мы увидим, что это вряд ли возможно. Ну и кроме того, в игре Белла и связанных с ней экспериментах симметрия между Алисой и Бобом идеальна, и нет возможности выделить потенциальный передатчик или приемник.

---

<sup>1</sup> В этом смысле образ пары фотонов-близнецов, который обычно используют, рассказывая о запутанных парах фотонов, которые действительно могут победить в игре Белла, очень сильно сбивает с толку.

## КООРДИНАЦИЯ — ЭТО НЕ КОММУНИКАЦИЯ

Говоря о нелокальном целом, мы невольно представляем мгновенный обмен информацией. Вспомните реакцию Ньютона на нелокальность в его всеобщей теории тяготения. В самом деле, если приборы Алисы и Боба выигрывают, то это происходит, потому что они координируют свои действия после того, как джойстики наклонены вправо или влево. Но так как они разделены большим расстоянием, эти приборы должны уметь координировать свои действия на расстоянии. Именно это Эйнштейн называл «призрачным действием на расстоянии» — выражение, которое отлично передает отношение мэтра к такого рода вещам! Проблема в том, что сегодня множество экспериментов противоречат интуиции Эйнштейна и подкрепляют квантовую теорию: природа действительно способна согласовывать два разнесенных в пространстве прибора.

Однако согласование, или координация, не означает коммуникацию. Но как же можно согласовать действия без обмена информацией? Мы, человеческие существа, конечно, не способны на такие трюки и с трудом можем вообразить, как это сделать. На самом деле, чтобы обеспечить координацию без коммуникации, приборы должны производить результаты случайно. Чтобы понять это, пойдем от обратного предположения, что приборы производят predetermined результаты. Можно показать, что это позволит Алисе и Бобу осуществлять коммуникацию без физической передачи. Но мы ведь знаем, что такая коммуникация невозможна (см. справку 5), а потому должны заключить, что любая пара приборов, которая способна победить в игре Белла, не может выдавать predetermined результаты.

Для лучшего понимания вопроса мы можем представить ситуацию, в которой прибор Алисы всегда выдает  $a = 0$ , а Боб выбирает  $y = 1$ . Если Боб получает результат  $b = 0$ ,

он знает, что  $a = b$ , и может сделать вывод, что Алиса, вероятно, выбрала  $x = 0$ . Напротив, если он получает  $b = 1$ , он знает, что  $a \neq b$ , и может заключить, что Алиса, вероятно, выбрала  $x = 1$ . Действительно, только таким способом они могут получить очко в нашей игре. Справка 7 показывает, что это важное заключение остается верным, каким бы ни было отношение, определяющее результат Алисы как следствие ее выбора.

Из вышесказанного становится понятно, что если прибор Алисы производит результат  $a$  заранее определенным образом (следуя одной из четырех программ, рассмотренных на с. 46) и Боб знает об этом, то Боб может сделать вывод, о том какой выбор сделала Алиса, исходя из результата, отображаемого на дисплее его прибора. Следовательно, согласно этой гипотезе, Боб может читать мысли Алисы на расстоянии. Ведь каждый раз, когда они получают очко, Боб может точно отгадать, каким был выбор Алисы. Если они выигрывают в игре Белла, то такой способ коммуникации должен быть вполне обычным.

Такая коммуникация будет практически мгновенной, так как время на передачу информации не зависит от расстояния между Алисой и Бобом. В частности, скорость передачи будет выше скорости света. Скорость света вообще не фигурирует в рассуждении, так как, увеличивая расстояние между Алисой и Бобом, можно превысить любую скорость. Что еще более важно, мы получаем нефизическую форму коммуникации, так как не будет нужно вообще передавать что-либо между приборами Алисы и Боба. А мы знаем, что коммуникация невозможна без передачи информации (см. справку 5 на с. 57).

В итоге если приборы Алисы и Боба могут координироваться на расстоянии, но таким способом, который Алиса и Боб не могут использовать для коммуникации, тогда

результат Алисы не может быть произведен детерминистически. Он обязательно рождается случайно, в некотором не локальном случайном процессе.

**СПРАВКА 7. Детерминизм предполагал бы коммуникацию без физического переноса.** Согласно гипотезе детерминизма, существует отношение, которое определяет результат, производимый каждым прибором, как следствие направления наклона джойстика. Но любое предопределенное отношение между направлением движения джойстика Алисы и ее результатом позволит Бобу узнавать выбор Алисы на расстоянии и, следовательно, получить коммуникацию без передачи информации. А поскольку такая коммуникация невозможна, детерминизм также невозможен. Чтобы убедиться в этом выводе, мы рассмотрим второй пример.

Представим, что, если Алиса наклоняет джойстик влево, ее прибор производит результат  $a = 0$ , а если вправо, то результат  $a = 1$ . Это соответствует стратегии №3 из главы 2, то есть  $a = x$  (см. с. 47). В этом случае если Боб двинет джойстик влево ( $y = 0$ ), то из показаний своего прибора он может сделать вывод о направлении, в котором двинула свой джойстик Алиса. Если, к примеру, его результат  $b = 0$ , Боб понимает, что Алиса, скорее всего, наклонила джойстик влево, потому что только в этом случае они получают очко в игре Белла. В самом деле, при  $y = 0$  мы должны иметь  $a = b$  для получения очка. Поэтому, если Боб видит  $b = 0$ , он делает вывод, что  $a = 0$ , но, так как этот результат возможен в нашем случае, только если  $x = 0$ , это значит, что Алиса двинула джойстик влево.

Чтобы убедиться, что это заключение остается верным при любом отношении, которое определяет результат  $a$  как следствие выбора  $x$ , достаточно заметить, что среди четырех

переменных в уравнении  $a + b = x \times y$  Бобу известны две: его выбор  $y$  и результат  $b$ . Если помимо этого он знает отношение  $a = f(x)$ , то Боб может вычислить, какой выбор  $x$  сделала Алиса. К примеру, если  $a = x$ , тогда отношение  $a + b = x \times y$  можно выразить так:  $x + b = x \times y$  — и тогда, если Боб выбирает  $y = 0$ , мы имеем  $x = b$ , то есть результат, произведенный прибором Боба, равен значению выбора Алисы  $x$ .

Отношение, которое определяет результат Алисы как следствие выбора направления движения джойстика, может меняться от минуты к минуте, но в каждую минуту это отношение будет фиксированным, а в действительности — заданным задолго до этого. Если бы это было так, ничто не мешало бы Бобу знать это отношение в каждую отдельную минуту. Но для каждого отношения Боб может с высокой вероятностью угадать направление движения джойстика Алисы, а это, в сущности, то же самое, что читать ее мысли на расстоянии. Это и была бы коммуникация без передачи информации.

## НЕЛОКАЛЬНАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ

Мы только что увидели, что результаты Алисы и Боба должны возникать случайно, но эта случайность не является независимой в приборах Алисы и Боба, потому что на самом деле *в двух приборах происходят одни и те же случайные события*. Но это же поразительно! Случайность сама по себе является удивительной концепцией, но здесь одно и то же случайное событие проявляет себя в двух точках, разделенных значительным расстоянием. Это объяснение полностью противоречит здравому смыслу, но оно неизбежно. Если у вас это просто не укладывается в голове, знайте, что множество физиков находилось в таком же положении, включая Альберта Эйнштейна, который никогда не верил в возможность победить в игре Белла.

Мы сосредоточим все внимание на «нелокальной случайности» в главе 5, а потом, в главе 6, попробуем объяснить эксперименты, которые дают нам возможность выиграть в игре Белла. В главе 9 мы подробно рассмотрим суть этих экспериментов и проверим, нет ли какой-нибудь лазейки, которая позволила бы нам сохранить понятие локальности.

Но, прежде чем закончить эту главу, вернемся обратно к нашему «объяснению». Я поставил это слово в кавычки, потому что сейчас мы подошли к моменту, когда нужно спросить себя: что мы подразумеваем под объяснением и чего мы требуем от него? Обычно объяснение — это история, которая что-то рассказывает о явлении, которое нужно объяснить. Читатель может возразить, и не без причины, что один лишь разговор о нелокальной случайности с трудом можно признать объяснением. Но вывод тем не менее неизбежен: мы не можем придумать такую историю, которая происходила бы локально в пространстве и непрерывно во времени и при этом объясняла бы, как победить в игре Белла.

Вспомните современников Ньютона, когда их просили принять «объяснение» о том, что все на свете падает к центру Земли. Это ведь объяснение? И да, и нет. Объяснение через гравитацию имеет то достоинство, что оно происходит в нашем времени (мы падаем) и в нашем пространстве (к Земле), но оно оставляет открытым вопрос о том, откуда наше тело «знает» где находится Земля, особенно если наши глаза закрыты.

Объяснение явлений нелокальной случайностью представляется даже менее убедительным, чем объяснение притяжения свободным падением. Но здесь основная мысль заключается в том, что нельзя сформулировать объяснение, которое основывалось бы исключительно на локальных сущностях. Победа в игре Белла как раз и показывает, что *природа нелокальна*.

Может быть, лучше оставить все попытки объяснения? Конечно же, нет! Нам просто нужно смириться с тем, что наше толкование включает нелокальные черты, такие как нелокальная случайность — неприводимая, или нередуцируемая, случайность, которая может проявлять себя в нескольких далеких друг от друга местах без переноса от точки к точке в пространстве<sup>1</sup>. Нелокальность заставляет нас расширить концептуальный инструментарий, который мы используем для описания механизмов природы.

Чтобы попытаться лучше понять это, представьте себе такую штуку, как нелокальные игральные кости, которые можно «бросить», наклонив любой из двух джойстиков. Этот «нелокальный кубик» производит результат  $a$  для Алисы, как только она сдвинула свой джойстик в направлении  $x$ , и результат  $b$  для Боба, когда он двигает свой джойстик в направлении  $y$ . Оба результата  $a$  и  $b$  случайны, но при этом с гарантией «притягиваются» друг к другу таким образом, что очень часто удовлетворяют цели игры Белла, то есть часто выполняется уравнение  $a + b = x \times y$ .

Как только мы осознаем, что мир не является детерминистическим и, следовательно, нередуцируемая случайность действительно существует, мы также должны будем принять, что, с одной стороны, эта случайность совсем не обязательно подчиняется тем же законам, что и классические

---

<sup>1</sup> Я не собираюсь утверждать, что объяснение через нелокальную случайность является полным и окончательным. Однако я сказал бы, что ученые всегда стараются найти объяснения и что любое объяснение этого явления с необходимостью будет нелокальным. Объяснение, которое в конце концов будет принято и войдет в историю, обязательно позволит нам выйти за пределы современной физики и откроет совершенно новую физическую реальность, в которую квантовая физика войдет как приближение. Эта новая физика по-прежнему будет позволять нам побеждать в игре Белла, иначе она противоречила бы полученным экспериментальным результатам. Именно поэтому она тоже будет нелокальной.

вероятности<sup>1</sup>, и, с другой стороны, ничто не запрещает ей одновременно проявляться в нескольких местах в одно и то же время, при условии, что этот эффект нельзя использовать для коммуникации.

## ИСТИННАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ

Мы только что узнали, что есть лишь один способ избежать ситуации, когда победа в игре Белла приводит к возможности коммуникации на запредельных скоростях: прибор Алисы не должен производить результаты каждую минуту как следствие предопределенных отношений, но должен генерировать их истинно случайным образом. Только гипотеза об нередуцируемой случайности может помешать Бобу узнать отношение между выбором Алисы и ее результатом.

---

<sup>1</sup> В классической физике результат любого измерения предопределен. В определенном смысле он записан в физическом состоянии системы, которую мы измеряем. Вероятности вступают в игру только из-за того, что точное физическое состояние нам неизвестно. Это незнание приводит ученых к необходимости использовать статистические методы и вероятностный расчет в соответствии с аксиомами Колмогорова. В квантовой физике результат измерения не предопределен, даже если состояние системы нам хорошо известно. В физическом состоянии системы, которую мы измеряем, записана лишь ее склонность к проявлению того или иного результата. Эта предрасположенность не подчиняется тем же самым правилам и не удовлетворяет аксиомам Колмогорова. Тем не менее следует заметить, что некоторые результаты в квантовой физике предопределены. Структура математической теории квантовой физики (гильбертово пространство) такова, что так называемых чистых состояний, в которых нет места незнанию, набор всех предопределенных результатов однозначным образом характеризует предрасположенность ко всем остальным возможным результатам. В этом смысле предрасположенности квантовой физики являются логическим обобщением классического детерминизма. (N. Gisin: *Propensities in a non-deterministic physics*, *Synthese* **89**, 287–297, 1991; см. также arXiv: 1401.0419.)

Если бы не истинная случайность, Боб и все физики мира обнаружили бы это отношение.

Поэтому отбросим идею, что прибор Алисы производит результат локально. Два прибора вместе производят пару результатов глобально, даже если с точки зрения каждого из партнеров их собственный результат кажется случайным.

Понятие истинной случайности заслуживает отдельного внимания. Типичный пример случайного события — это игра «орел или решка» с монеткой или бросание игральных костей. В обоих случаях сложность микроявлений, например удары молекул воздуха по монете или неровность поверхности, на которую бросают кость, не дает возможности предсказать результат на практике. Но эта невозможность не заложена в природе вещей: по сути она является следствием множества незначительных во всех остальных отношениях причин, сочетание которых и формирует конечный результат. Если бы мы смогли отследить детали движения игральной кости с надлежащей точностью и с адекватными средствами расчета, то, имея начальные условия броска, состояние молекул воздуха и поверхности, на которую кость падает, отскакивает и в конце концов останавливается, мы могли бы точно предсказать, какой стороной она упадет. Поэтому это не истинная случайность.

Другой пример покажет это различие еще лучше. Чтобы провести числовое моделирование, инженеры часто используют так называемые псевдослучайные числа. Используя этот метод, можно проанализировать многие проблемы. Возьмем, к примеру, разработку проекта самолета. Вместо того чтобы строить десятки прототипов и испытывать их один за другим, инженеры могут имитировать их поведение на больших компьютерах. Чтобы промоделировать условия полета, которые все время меняются из-за ветра и других непредсказуемых воздействий, инженеры используют

псевдослучайные числа. Эти числа генерируются компьютерами, которые сами по себе являются детерминистическими машинами, так что случайностью там и не пахнет. Эти числа на самом деле не производятся случайно, но получаются такими, как если бы мы бросали кость, поэтому их и называют «псевдослучайными». Отношение между одним псевдослучайным числом и следующим predeterminedено, но оно достаточно сложно для того, чтобы его можно было предугадать.

На первый взгляд кажется, что этого достаточно и что нет реальной разницы между псевдослучайными числами, которые сгенерировал компьютер, и числами, произведенными истинной случайностью. Но это неверно! Есть прототипы самолетов, которые прекрасно ведут себя при моделировании на базе псевдослучайных чисел, но в реальности летают довольно плохо<sup>1</sup>. Такие случаи редки, но они существуют, и неважно, насколько умна и сложна программа, которая генерирует псевдослучайные числа. С другой стороны, такие патологические случаи не возникают, если числа произведены истинно случайным образом. Таким образом, существует вполне реальная разница между событиями, которые представляются случайными, вроде броска кубика, и истинно случайными, которые понадобятся нам для победы в игре Белла при запрете коммуникации. Мы также видим, что существование истинной случайности — это полезный ресурс для общества. Мы вернемся к этому в главе 7.

---

<sup>1</sup> Ferrenberg A. M., Landau D. P., Wong Y. J.: *Monte Carlo simulations: Hidden errors from 'good' random number generators*, Phys. Rev. Lett. **69**, 3382 (1992); Ossola G., Sokal A. D.: *Systematic errors due to linear congruential random-number generators with the Swendsen — Wang algorithm: A warning*, Phys. Rev. E **70**, 027701 (2004).

## **ИСТИННАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ РАЗРЕШАЕТ СУЩЕСТВОВАНИЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ БЕЗ КОММУНИКАЦИИ**

Победа в игре Белла без коммуникации с необходимостью предполагает, что приборы Алисы и Боба производят результаты истинно случайным способом. Эта случайность фундаментальна и не может быть сведена к сложному детерминистическому механизму. Это означает, что природа способна на чистый акт творения!

Вместо того чтобы утверждать, как это делал Эйнштейн, что Бог не играет в кости, давайте лучше зададимся вопросом: зачем он играет в кости<sup>1</sup>? Ответ: таким образом природа может быть нелокальной, и это не приводит к возможности коммуникации без передачи информации. В самом деле, как только мы примем факт, что природа может производить истинно случайные события, у нас не будет причин ограничивать проявление этой случайности каким-то одним хорошо локализованным местом. Истинная случайность может проявлять себя в нескольких местах сразу. Поскольку мы не можем использовать такую нелокальную случайность для коммуникации, нет причин ограничивать природу в ее проявлениях.

Мы пришли к тому, что две несопоставимые на первый взгляд концепции — случайность и локальность — в действительности тесно связаны. Если бы не было истинной случайности, локальность была бы необходима, чтобы избежать возможности коммуникации без физической передачи информации. Поэтому мы запомним, что истинная случайность существует и может проявлять себя нелокальным образом. Нужно просто привыкнуть к идее случайности,

---

<sup>1</sup> Popescu S., Rohrlich D.: *Nonlocality as an axiom*, Found. Phys. **24**, 379 (1994).

которая может проявляться в нескольких местах, то есть нелокальной случайности, которая согласовывает результаты, которые получаются в двух удаленных друг от друга местах. Необходимо встроить в наше интуитивное восприятие мира идею, что нелокальная случайность не может быть использована для коммуникации. Примерно так Алиса и Боб могут «слышать» шум, производимый странным «телефоном», — шум, который совершенно невозможно использовать для коммуникации, но который тем не менее дает нам возможность выиграть в игру Белла.

## Глава 4

# НЕВОЗМОЖНОСТЬ КВАНТОВОГО КЛОНИРОВАНИЯ

Нелокальность без коммуникации имеет и другие удивительные последствия. Один из примеров — это вопрос о квантовом клонировании. В нашем случае это подобно попытке создать копию прибора Боба. Этот относительно простой пример лежит в основе квантовой криптографии и телепортации, как мы увидим в главах 7 и 8. Следовательно, на это стоит посмотреть.

Клонирование животных стало обычным делом. Без сомнения, клонирование человека не за горами и будет осуществлено до конца этого века. Оставив за скобками вполне понятную эмоциональную реакцию и скандал, который наверняка поднимется, давайте посмотрим, возможно ли клонирование в квантовом мире. Другими словами, можем ли мы скопировать физическую систему, принадлежащую к миру атомов и фотонов? Смогут ли физики создать клон, то есть идеальную копию прибора Алисы или прибора Боба?

Но давайте будем точными. Было бы довольно глупо копировать электрон, ведь все электроны строго одинаковы. Когда мы говорим о копировании книги, мы не пытаемся изготовить еще одну книгу того же формата и с тем же количеством страниц. Копия должна содержать в точности ту же информацию, то есть тот же текст и те же иллюстрации. Клон электрона, таким образом, должен нести ту же «информацию», что и оригинал, то есть иметь ту же среднюю скорость и ту же неопределимость<sup>1</sup> этой скорости, и так же для всех остальных характеристик. Только среднее положение в пространстве будет отличаться, потому что оригинал останется здесь, а клон появится там.

В этой главе мы ответим на вопрос: можно ли действительно клонировать прибор Боба? Мы уже ознакомились с содержимым приборов и знаем, что главным элементом являются кристаллы, обладающие квантовой характеристикой, которую мы назвали «запутанностью». Поэтому клонирование прибора в итоге означает клонирование этих квантовых сущностей вместе с их квантовыми свойствами.

### **СПРАВКА 8. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.**

Вернер Гейзенберг был одним из отцов квантовой теории. В частности, он известен формулировкой принципа неопределенности, согласно которому, если мы измеряем положение частицы с определенной точностью, мы с необходимостью оказываем влияние на ее скорость (импульс), и наоборот, если мы точно измеряем скорость частицы, мы с необходимостью вносим возмущение в ее положение.

---

<sup>1</sup> В силу исторических причин физики часто называют это явление квантовой неопределенностью (uncertainty). Но так как «неопределенность» относится скорее к наблюдателю, чем к физической системе, мы предпочитаем говорить о квантовой неопределимости (см. справку 8). — *Прим. авт.*

Поэтому мы не можем знать и положение, и скорость частицы в одно и то же время и с высокой точностью. Современная квантовая физика включила этот принцип в тот факт, что частица просто никогда не имеет точно определенного положения и точно определенной скорости. Поэтому мы предпочитаем говорить не о неопределенности, но о неопределимости<sup>1</sup>. Мы можем сохранить слово «неопределенность» в названии принципа Гейзенберга, но должны избегать описания физических сущностей как неопределенных. Мы скажем, что они неопределимы, и неопределенность становится неопределимостью.

## **КВАНТОВОЕ КЛОНИРОВАНИЕ РАЗРЕШИЛО БЫ НЕВОЗМОЖНУЮ КОММУНИКАЦИЮ**

Невозможность клонирования квантовой системы — ключевое утверждение для прикладных областей, таких как квантовая криптография и квантовая телепортация (мы поговорим об этом позже). Чтобы доказать невозможность клонирования, мы будем использовать логический прием *reductio ad absurdum* — доказательство от противного. Мы начнем с допущения, что квантовое состояние клонировать можно, но это повлечет за собой абсурдный вывод — в данном случае о возможности коммуникации без передачи информации. Отсюда мы сможем заключить, что поскольку такая коммуникация невозможна, то и квантовое клонирование исключено.

---

<sup>1</sup> В оригинальной работе 1927 года, написанной на немецком, Гейзенберг использовал слово *Unge nauigkeit*, что соответствует английскому *indeterminacy* и русскому «неопределимость». Только в заключении он использовал слово *Unsicherheit* (*uncertainty*, неопределенность). В англоязычной литературе устойчиво используется слово *uncertainty*, в русскоязычной — «неопределенность». — *Прим. перев.*

Представим, что Боб смог клонировать свой прибор. Точнее, представьте себе, что Боб смог клонировать кристалл, который обнаружил в сердце своего прибора, учитывая, что все остальное содержимое — просто сложный механизм, который нетрудно воспроизвести. И вот перед ним два прибора, обозначим их как «левый» и «правый». У каждого прибора есть джойстик, его можно отклонять влево и вправо, и через секунду каждый из приборов выдаст результат на дисплей. Если эти два прибора действительно идеальные копии, то для каждого из них результат будет скоррелирован с результатом на приборе Алисы, причем так, что каждый из приборов выиграет вместе с Алисой игру Белла. Однако если Боб решит не выбирать одну сторону, а попробовать разные одновременно? Левый джойстик — влево, а правый — вправо. А теперь мы объясним, как Боб может вывести из своих двух результатов тот выбор, который сделала Алиса на огромном расстоянии от него.

Начнем со случая, когда показания на приборах Боба идентичны, то есть либо дважды 0, либо дважды 1. В этом случае Алиса, вероятно, выбрала  $x = 0$ . Если бы Алиса выбрала  $x = 1$ , то результат на правом приборе Боба должен был бы отличаться от результата Алисы (так как  $(x, y) = (1, 1) \Rightarrow a \neq b$ ), тогда как результат на левом приборе должен был бы совпасть с показаниями прибора Алисы ( $(x, y) = (1, 0) \Rightarrow a = b$ ). С другой стороны, если показания на приборах Боба разные, тогда Алиса, вероятно, выбрала  $x = 1$ . В справке 9 это рассуждение проводится при помощи простой двоичной арифметики.

**СПРАВКА 9. Теорема о невозможности клонирования.** Пусть

$b_{\text{left}}$  и  $b_{\text{right}}$  обозначают показания с приборов Боба, левого и правого соответственно.

#### Глава 4. Невозможность квантового клонирования

Выигрыш в игре Белла означает, что часто удовлетворяются следующие два равенства:  $a + b_{\text{left}} = x \times y_{\text{left}}$  и  $a + b_{\text{right}} = x \times y_{\text{right}}$ . Сложив их, мы получим:

$$a + b_{\text{left}} + a + b_{\text{right}} = x \times y_{\text{left}} + x \times y_{\text{right}}.$$

Теперь вспомним, что все эти символы представляют собой биты (0 или 1) и что суммирование выполняется по модулю 2, поэтому результат также является битом. Следовательно,  $a + a = 0$ . Мы также помним, что Боб передвигает джойстик на левом приборе влево, то есть  $y_{\text{left}} = 0$ , а джойстик правого прибора — вправо, то есть  $y_{\text{right}} = 1$ . В итоге мы получаем  $b_{\text{left}} + b_{\text{right}} = x$ . Так Боб может определить выбор Алисы  $x$  с высокой вероятностью, просто сложив два результата на своих приборах.

Следовательно, если бы Боб сумел клонировать свой прибор, он мог бы угадать выбор Алисы с высокой вероятностью, и это несмотря на то расстояние, которое их разделяет. То есть мы стали бы очевидцами коммуникации без передачи информации, причем на произвольной скорости. Некоторые могут заметить, что Боб может и ошибиться, когда угадывает выбор Алисы, ведь Алиса и Боб получают общий счет не 4, а лишь значительно больше 3. Конечно, Боб может иногда ошибаться. Однако того факта, что он угадывает правильно гораздо чаще, чем 1 раз из 2, достаточно, чтобы сделать коммуникацию возможной<sup>1</sup>. Линия связи будет довольно шумной, и им придется много раз повторять посылку (при этом Алиса должна каждый раз делать один и тот же выбор), но в конце концов Боб сможет угадать выбор Алисы с почти полной уверенностью. На самом деле как раз это

---

<sup>1</sup> Можно доказать, что Боб правильно угадывает выбор Алисы чаще, чем 1 раз из 2, если Алиса и Боб побеждают в игре Белла чаще, чем 3 раза из 4.

и происходит уже сейчас во всей цифровой коммуникации. Интернет и другие протоколы связи режут наши сообщения на маленькие кусочки, которые отсылают затем приемнику, и так как всегда есть маленькая возможность ошибки, сообщение отсылается несколько раз, пока вероятность любой ошибки не станет пренебрежимо малой.

Итак, возможность победы в игре Белла влечет невозможность клонирования квантовых систем. Физики называют это теоремой о запрете клонирования. Это исключительно важный результат квантовой физики. Ее очень просто доказать математически, но уже мы видели, что эта теорема также прямо следует из существования нелокальности без коммуникации, что еще раз подчеркивает важность этой идеи.

## **ПОЧЕМУ ЖЕ МОЖНО КЛОНИРОВАТЬ ДНК?**

Можно задать вопрос, почему мы можем клонировать животных, если мы не можем клонировать квантовые системы. Ведь очевидно, что биологическая макромолекула, известная как ДНК, сама по себе является квантовой системой! Интересно, что именно этот вопрос привел нобелевского лауреата, физика Юджина Вигнера к вопросу о квантовом клонировании<sup>1</sup>. И он-то как раз сделал вывод о невозможности клонирования в биологии, но это была ошибка. ДНК — это действительно квантовая система (по крайней мере, на это очень похоже, и хотя это никогда не демонстрировалось

---

<sup>1</sup> Wigner E. P.: The probability of the existence of a self-reproducing unit. In: *The Logic of Personal Knowledge: Essays Presented to Michael Polanyi on his Seventieth Birthday*, Routledge and Kegan Paul (1961). Reprinted in Wigner E. P.: *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press (1967) and in *The Collected Works of Eugene Paul Wigner*, Springer-Verlag (1997), Part A, Vol. III.

в эксперименте, вряд ли хоть один физик подвергнет это сомнению). Однако генетическая информация закодирована в ДНК с использованием лишь очень малой части возможностей, разрешенных в квантовой физике, и фундаментальных препятствий к клонированию такого небольшого объема информации не существует<sup>1</sup>. Очень интересно ставить вопросы относительно роли квантовой физики в биологии, и это очень популярная тема для исследований.

## **ОТСТУПЛЕНИЕ ОТ ТЕМЫ: НЕТОЧНОЕ КЛОНИРОВАНИЕ**

Чтобы закончить эту главу, позвольте мне сделать несколько замечаний, которые не так важны для главной темы, но могут быть интересны любопытному читателю.

Отметим (но в этот раз без доказательства), что квантовая теория разрешает неточное клонирование, что-то вроде создания плохой копии, и что самое лучшее возможное клонирование ограничено таким условием: оно должно быть достаточно плохим, чтобы гарантировать отсутствие коммуникации без физической передачи<sup>2</sup>.

Теорема о запрете клонирования тесно связана со многими аспектами квантовой теории. В частности, как мы писали выше, она является существенной для таких прикладных областей, как квантовая криптография (глава 7) и квантовая телепортация (глава 8). Она также необходима, чтобы

---

<sup>1</sup> Это как если бы информация была закодирована в положении электрона, без учета его скорости. В этом случае его положение может быть скопировано, и хотя данная операция внесет возмущение в его скорость, это не будет иметь значения, так как скорость не несет информации.

<sup>2</sup> Gisin N.: *Quantum cloning without signalling*, Physics Letters A **242**, 1–3 (1998).

знаменитые соотношения неопределенностей Гейзенберга имели какой-то смысл (справка 8). В самом деле, если бы мы смогли идеально клонировать квантовую систему, мы могли бы измерить положение, к примеру, оригинала и скорость копии. Тем самым мы получили бы и положение, и скорость частицы одновременно, что не запрещено принципом неопределенности<sup>1</sup>.

Другое важное следствие теоремы о запрете клонирования состоит в том, что вынужденное испускание частицы, которое лежит в основе луча лазера, невозможно без спонтанного испускания частицы. Если бы это было не так, кто-то мог бы использовать вынужденное испускание фотона для того, чтобы идеально скопировать его состояние (к примеру, поляризацию). И вновь соотношение между вынужденным и спонтанным излучением находится в точности на границе оптимального клонирования, совместимого с нелокальностью без коммуникации<sup>2</sup>. Все складывается очень аккуратно, и квантовая теория удивительно согласованна и элегантна.

Кстати, Эйнштейн был первым, кто описал соотношение между вынужденным (индуцированным) и спонтанным излучением. Он был бы поражен, если бы узнал, что эта формула прекрасно выводится из понятия нелокальности, которой он так противился.

---

<sup>1</sup> В этом рассуждении допущено некоторое упрощение: ведь возможно, что статистика измерений положения в оригинальной системе и статистика измерения скоростей в клоне все же удовлетворяют соотношению неопределенностей Гейзенберга. Правда состоит в том, что соотношение неопределенности в исторической формулировке Гейзенберга весьма неточно, если не ошибочно вообще, см., например, M. Ozawa: *Phys. Rev. A* **67**, 042105 (2003). Один из способов сформулировать его точно — это как раз теорема о запрете клонирования и оптимальное квантовое приближение, см., например, C. Branciard: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110**, 6742–6747 (2013).

<sup>2</sup> Simon C., Weihs G., Zeilinger A.: *Quantum cloning and signaling*, *Acta Phys. Slov.* **49**, 755–760 (1999).

И последнее замечание относительно отношений между клонированием и нелокальностью. Мы видели, что невозможность коммуникации без физической передачи накладывает ограничение на качество клонирования прибора Боба. Что произойдет, когда мы заменим игру Белла игрой (или неравенством), в которой Боб имеет больше возможностей? Представим, например, что джойстик можно двигать в  $n$  направлениях. В этом случае невозможность коммуникации без передачи накладывает предел на клонирование прибора Боба в  $n$  копиях, и мы снова приходим к пределу оптимального квантового клонирования. Из этого следует, что для демонстрации нелокальности и Бобу, и Алисе нужно иметь большее число возможных выборов, чем приборов, чтобы выбор был настоящим. Они не могут просто сделать все выборы параллельно<sup>1</sup>. Здесь мы впервые видим важность свободной воли, или, выражаясь прозаичнее, важность того, что Алиса и Боб могут делать выбор независимо друг от друга. Без независимого выбора не существовало бы нелокальности.

---

<sup>1</sup> Terhal B. M., Doherty A. C., Schwab D.: *Local hidden variable theories for quantum states*, Phys. Rev. Lett. **90**, 157903 (2003).



## Глава 5

# КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ

В квантовой физике объяснением возможности победы в игре Белла в смысле получения счета больше 3 является запутанность. Эрвин Шрёдингер, один из отцов-основателей квантовой физики, был первым, кто заметил, что запутанность — это не просто одна из черт квантовой физики среди прочих, а ее основная характеристика<sup>1</sup>:

Запутанность — это не просто одна из особенностей, а скорее определяющая характеристика квантовой механики, та, что заставляет нас полностью отойти от классического способа мыслить.

В этой главе мы рассмотрим это замечательное свойство мира атомов и фотонов<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Schrödinger E.: *Discussion of probability relations between separated systems*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **31**, 55 (1935).

<sup>2</sup> Более детальное обсуждение см. в: Scarani V. “Quantum Physics, A First Encounter”, Oxford Univ. Press 2006.

## КВАНТОВЫЙ ХОЛИЗМ

Грубо говоря, странная теория квантовой физики говорит нам, что вполне возможно и даже обычно для двух разделенных пространством объектов образовывать в действительности единое целое! Это и называется запутанностью. Если мы потревожим одну из двух частей, среагируют обе. Но заметьте прежде всего, что, когда мы «стимулируем» квантовую сущность, то есть проводим измерение, она выдает ответ — реакцию — совершенно случайным образом, один результат из определенного диапазона возможностей, с хорошо определенной вероятностью, которую квантовая теория предсказывает с великолепной точностью. Так как это случайное событие, никто не может использовать то, что связанная сущность реагирует как целое, для передачи информации. Приемник будет получать лишь шум, чисто случайное трепетание. Мы снова убеждаемся в важности истинной случайности. Вы можете возразить, что если мы не трогаем первый объект, то второй так и останется в покое. Раз так, можно посылать информацию, просто делая выбор — воздействовать на первый объект или нет. Но есть проблема: откуда мы узнаем, что второй объект отреагировал? Мы можем узнать об этом лишь проведя измерение, а это само по себе заставит его «дернуться». Короче говоря, не важно, насколько противоестественно это звучит, но мы не можем запросто опровергнуть идею, что два запутанных объекта по сути составляют единое целое.

Теоретически запутанным может быть любой объект, но на практике физики продемонстрировали запутанность атомов, фотонов и некоторых элементарных частиц. Самые большие объекты, которые удалось связать, — это кристаллы, вроде тех, из приборов для игры Белла. Этот

феномен проявляет себя примерно одинаково вне зависимости от того, какие объекты оказались запутанными. Мы будем иллюстрировать это почти волшебное свойство квантового мира на примере электронов — крошечных частиц, которые переносят электрический ток.

## **КВАНТОВАЯ НЕОПРЕДЕЛИМОСТЬ**

Я начну с примера. Электрон может оказаться в состоянии, в котором его положение невозможно определить. То есть у него просто нет точного местонахождения, как у облака. Естественно, у облака есть среднее положение (положение центра массы, как сказали бы физики). У электрона тоже есть некая средняя позиция. Но, и в этом значительное отличие от облака, электрон не сделан из множества микроскопических капелек воды, и вообще из какого-либо рода капелек. Электрон неделим. А еще, помимо того что он неделим, у него нет определенного положения, а только облако возможных положений. Если, несмотря на это, мы решим измерить его положение, электрон тут же ответит: «Я здесь!» Но это будет ответ, созданный в момент измерения и совершенно случайный. У электрона не было определенного положения, но во время измерения мы заставили его ответить на вопрос, который до тех пор не имел ответа: квантовая случайность это истинная, нередуцируемая случайность.

Формально говоря, неопределимость выражается посредством того, что известно как принцип суперпозиции. Если электрон может быть здесь или в метре отсюда, тогда этот электрон может быть в состоянии суперпозиции «здесь» и «на метр правее», то есть и «здесь», и «на метр правее». В этом примере он делокализован и находится в двух местах одновременно. Он может ощущать, что происходит здесь

(например, в одной из щелей Янга<sup>1</sup>), и ощущать, что происходит на метре правее, во второй щели Янга. Таким образом, он действительно находится и здесь, и в метре справа. Однако, если мы измерим его положение, мы обнаружим его только в одном из этих мест, причем совершенно случайным образом.

## **КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ**

Мы только что увидели, что у отдельного электрона может не быть положения. Точно так же определенного положения может не быть и у каждого из двух квантово запутанных электронов. Однако благодаря запутанности расстояние между двумя электронами все же может быть точно определенным. Можно сказать, что, когда бы мы ни измерили положения двух электронов, мы получаем два результата, каждый из которых совершенно случаен, но их разность все время будет одна и та же! Иначе говоря, относительно своих средних положений два электрона всегда дадут один и тот же результат, хотя этот результат и является истинно случайным. Если один электрон обнаружен чуть правее от среднего положения, второй также будет найден чуть правее и на точно таком же малом расстоянии, как и первый, то есть на том же самом расстоянии от его центра массы. И этот порядок не будет нарушен, даже если два электрона удалены очень далеко друг от друга.

Таким образом, положение одного электрона относительно второго хорошо определено, хотя мы и не знаем точно позиции каждого из них. В общем случае запутанные квантовые системы могут находиться в точно определенном

---

<sup>1</sup> Имя Томаса Янга (1773–1829) связано со знаменитым экспериментом, в котором частица проходит через две соседствующие щели одновременно.

состоянии, даже если состояние каждой в отдельности неопределимо. Когда измерения производятся на двух запутанных системах, результаты определяются случаем — но одним и тем же случаем! Квантовая случайность нелокальна.

Запутанность также можно определить как способность квантовых систем выдавать один и тот же результат, если мы измеряем одну и ту же физическую характеристику каждой из них. Мы говорим здесь о применении принципа суперпозиции одновременно к нескольким системам. Например, пара электронов может находиться в состоянии «один здесь, другой там», а может находиться в состоянии «один на метр вправо отсюда, а другой на метр вправо оттуда». Согласно принципу суперпозиции, эти два электрона могут также находиться в суперпозиции состояний «один здесь, а другой там» и «один на метр вправо отсюда, а другой на метр вправо оттуда». Это — запутанное состояние. Но запутанность включает в себя намного больше, чем принцип суперпозиции, ведь именно запутанность вводит в физику нелокальные корреляции. В упомянутом примере ни один из электронов не имеет predeterminedного положения, но если измерение положения первого электрона дает результат «здесь», то положение другого немедленно определяется как «там», и нам даже не нужно измерять положение второго электрона.

## **КАК ЖЕ ЭТО ВОЗМОЖНО?**

Как могут два электрона иметь хорошо определенное относительное положение, если ни один из них в отдельности определенного положения не имеет? В мире, к которому мы привыкли, это невозможно. Можно подумать, что квантовая физика просто не способна дать нам полное описание координат электронов и что более полная теория сможет описать

электроны как объекты, всегда имеющие хорошо определенное, но скрытое положение. Это интуитивное желание лежит в основе теории о скрытых локальных переменных. Их называют локальными, потому что каждый электрон занимает свое положение независимо от других электронов.

Тем не менее в гипотезе о скрытых положениях полно своих проблем. Ведь положение электрона — не единственная измеримая переменная. Мы можем измерить его скорость, которая тоже неопределима. Конечно же, у электрона есть средняя скорость, но скорость, которую мы получим в результате измерения, зависит от случая и может принимать любое значение из широкого спектра возможных, точно так же, как и позиция в пространстве, которое мы фиксируем в момент измерения положения. И снова запутанность позволяет двум электронам в отдельности не иметь определенной скорости, но при этом оба они могут иметь в точности одну и ту же скорость, и это остается справедливым, даже если электроны разнесены на очень большое расстояние друг от друга.

Но запутанность предлагает и более сильную возможность. Два электрона по отдельности могут не иметь ни определенного положения, ни определенной скорости, но они могут быть запутаны так, что разности между их положениями и между их скоростями будут точно определены. Если есть скрытые положения, то должны быть и скрытые скорости, не правда ли? Но это противоречит принципу неопределенности Гейзенберга — основополагающей части математического описания квантовой теории (справка 8). Вернер Гейзенберг, его учитель Нильс Бор и их друзья выступили категорически против предположения о существовании скрытых положений и скоростей, которые предлагались в качестве скрытых локальных переменных. С другой стороны, Эрвин Шрёдингер, Луи де Бройль и Альберт Эйнштейн поддержали

гипотезу о скрытых переменных, ведь она казалась более естественной, чем гипотеза о запутанности, подразумевающей чистую случайность, которая проявляется одновременно в нескольких местах.

В то время и в последующие 30 лет, с 1935 до 1964 года, никто не смог придумать ничего похожего на аргумент Джона Белла, который мы обсудили в главе 2. Как следствие, никакой физический эксперимент не мог разрешить этот спор экспериментальной проверкой, к примеру ответом на вопрос: возможно ли выиграть в игру Белла чаще, чем три раза из четырех? Если бы скрытые локальные переменные существовали, то квантовые системы никогда не смогли бы выиграть. Скрытые локальные переменные (как гены близнецов) сыграли бы роль программ, которые определяли бы локально показания на приборах наших друзей. Но мы уже знаем, что если результаты определяются локально, то Алиса и Боб не могут выиграть чаще, чем три раза из четырех.

В то время как экспериментальная проверка была невозможна, этот вопрос стал предметом жаркого спора. Шрёдингер писал, что если идея запутанности верна, то он сожалеет, что когда-то приложил к ней руку. А чтобы понять как был обеспокоен Бор, достаточно прочесть его ответ на опубликованную в 1935 году работу Эйнштейна, Подольского и Розена (где был сформулирован парадокс ЭПР<sup>1</sup>) и увидеть, что он воспринял спор очень близко к сердцу и готов был защищать причинно-следственную связь до последней капли крови.

---

<sup>1</sup> Rae A.: *Quantum Physics. Illusion or Reality?*, Cambridge University Press (1986); Ortolì S., Pharabod J. P.: *Le cantique des quantiques*, La Découverte (1985); Gilder L.: *The Age of Entanglement*, Alfred A. Knopf (2008).

Эйнштейн является величайшим из великих ученых потому, что он смог создать локальную теорию гравитации спустя столетия после того, как Ньютон озвучил эту проблему. До открытия общей теории относительности в 1915 году физики описывали гравитацию нелокально, подразумевая, что если кто-то сдвинет с места камень на Луне, то это моментально повлияет на наш вес<sup>1</sup> на Земле. В принципе таким способом мы могли бы мгновенно передавать информацию на любые расстояния во Вселенной. Но, по теории Эйнштейна, гравитация, как и другие физические явления, известные в 1915 году, распространяется с конечной скоростью от одной точки пространства к другой. То есть, по Эйнштейну, Земля и остальная Вселенная будут проинформированы о том, что мы подвинули на Луне камень, гравитационной волной, которая распространяется со скоростью света. Поэтому вес землянина изменится не сразу, а более чем через секунду, ведь Луна находится приблизительно в 380 000 км от Земли.

Но всего через десять лет после своего выдающегося открытия Эйнштейн — человек, который вернул локальность в физику, — опять наткнулся на нелокальность. И, несмотря на то что квантовая нелокальность очень сильно отличается от нелокальности ньютоновской гравитации, он дрогнул перед новой угрозой той теоретической конструкции, которую он создал. Можно понять его реакцию, и в тех обстоятельствах она была вполне логичной: почему нужно доверять соотношению неопределенностей Гейзенберга, а не привычным детерминизму и локальности?

---

<sup>1</sup> На домашних весах. Изменится только сила притяжения, с которой Земля и Луна действуют на нас, а масса останется прежней. Следует заметить, что камень нужно забрать с Луны на ракете, чтобы слегка сместить центр массы нашего спутника.

## КАК ЗАПУТАННОСТЬ СПОСОБСТВУЕТ УСПЕХУ В ИГРЕ БЕЛЛА

Слово «квант», которым мы называем новую физику 1920-х годов, появилось потому, что возможные значения энергии атома квантуемы. Энергия не может принимать любое значение — оно должно быть выбрано из определенного набора значений. Помимо энергии, существует и множество других физических величин, которые могут принимать только конечное множество определенных значений, и о них тоже говорят, что они квантуются. Обычная и простая ситуация, в которой существует только два возможных значения, — ситуация, которая порождает квантовый бит, на физическом жаргоне — кубит.

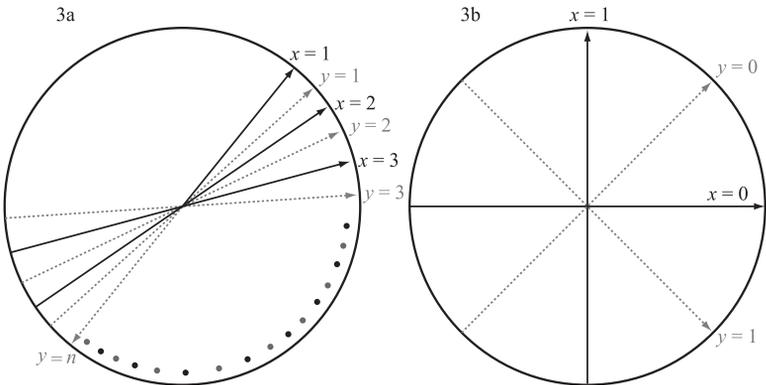
Различные измерения, которые можно выполнить над кубитом, могут быть представлены «направлением». Например, в случае поляризации фотонов это направление прямо зависит от ориентации поляризатора<sup>1</sup>. Мы можем представить эти направления в виде углов на окружности, как показано на рис. 5.1.а. Каждый раз, когда мы измеряем кубит в одном из этих направлений, мы получаем либо результат 0, который означает, что кубит «параллелен» интересующему нас вектору, либо результат 1, который означает, что кубит «антипараллелен» этому направлению, то есть направлен в противоположную сторону. Если мы изменим направление измерения на противоположное, то 0 и 1 просто поменяются местами, так как результат 0 в одном направлении — это

---

<sup>1</sup> Поляризация определяется направлением электрического поля, связанного с фотоном. Если фотон поляризован определенным образом, то его «вибрация» будет приурочена к некоторой точной ориентации в пространстве, и эта ориентация и определяет поляризационное состояние фотона. Оно связано с возможными направлениями измерения множителем 2, что заслуживает отдельного рассказа.

то же самое, что результат 1 в противоположном. Нужно отметить, что мы вольны выбирать направление, в котором будем проводить измерение, для каждого кубита в отдельности. Так как измерение возмущает кубит, мы не сможем измерить тот же самый кубит снова в каком-то другом направлении. Но мы можем создать множество кубитов, причем все — одним и тем же образом; физик сказал бы, что они находятся в одном и том же состоянии. Проверяя разные направления измерения на отдельных кубитах этого множества, мы можем собрать статистику для заданного состояния.

Вероятность того, что кубит даст результат 0, зависит от исходного состояния кубита. Но каким бы ни было это



**Рис. 5.1.** Квантовый бит, или кубит, может быть измерен в различных направлениях. Если два кубита запутаны и мы измеряем их в близких направлениях, то результаты часто будут одинаковыми — они сильно коррелированы. Например, в случае (а) выборы  $x = 1$  и  $y = 1$  дают сильно коррелированные результаты, точно так же, как дали бы  $y = 1$  и  $x = 2$  или же  $x = 2$  и  $y = 2$  и т.д. В то же время выборы направлений  $x = 1$  и  $y = n$  дают разные результаты. Для игры Белла приборы Алисы и Боба используют направления измерений, показанные на (b)

состояние, вероятности, что кубит выдаст результат 0 в двух близких направлениях, также близки. Другими словами, вероятность результата характеризуется непрерывностью, будучи функцией от направления измерения.

Если мы возьмем два запутанных кубита<sup>1</sup> и будем измерять их в одном направлении, результат всегда будет одинаковым: либо 0 для обоих, либо 1. Почему? В этом и заключается «магия» запутанности. В разделе «Квантовая запутанность» я рассказывал, что каждый кубит связан с облаком потенциальных результатов, но разность между результатами для двух запутанных кубитов всегда равна нулю. Следовательно, если Алиса и Боб поделили между собой пару запутанных кубитов и если Алиса измеряет свой кубит в некотором направлении А, а Боб измеряет свой в некотором направлении В, близком к А, то вероятность, что оба результата будут равны, близка к 1. Предположим, что направление, в котором измеряет свой кубит Боб, находится немного правее, чем направление, в котором измеряет свой кубит Алиса, как показано на рис. 5.1.а. Теперь представим, что Алиса использует второе направление  $\hat{A}$ , которое также близко к направлению Боба, но находится с другой стороны от него. Эти два направления опять достаточно близки друг к другу, и вероятность получения одинаковых результатов снова близка к 1.

Мы можем продолжать двигаться по кругу от точки к точке, пока последнее направление Боба не окажется строго напротив первого направления для Алисы. Но поскольку эти направления противоположны, результаты с необходимостью также будут противоположны! Вот здесь мы и находим идею, лежащую в основе игры Белла. Результаты почти всегда одинаковы, кроме ситуации, в которой они

---

<sup>1</sup> Существует бесконечное количество возможных запутанных состояний. Здесь я рассматриваю состояние, известное в физике как  $\Phi^+$  и измерения в плоскости  $xz$ .

различаются. В игре Белла этот особенный случай, когда результаты должны быть противоположны, соответствует ситуации, когда и Алиса, и Боб двигают джойстики вправо. В примере же с двумя запутанными кубитами он соответствует тому, что Алиса использует свое первое направление, а Боб — последнее. В зависимости от количества рассматриваемых направлений измерения мы получаем разные неравенства Белла. Для игры Белла Алиса и Боб используют только два направления, как показано на рис. 5.1b, и эта стратегия позволяет им получить счет 3.41.

## КВАНТОВАЯ НЕЛОКАЛЬНОСТЬ

Подведем итог. Квантовая теория предсказывает, и многие эксперименты это подтверждают, что в природе возможны корреляции между двумя удаленными событиями, которые нельзя объяснить ни влиянием одного события на другое, ни общей локальной причиной. Здесь надо уточнить, что при этом исключается любое воздействие, которое распространяется последовательно и непрерывно из точки в точку пространства с любой скоростью, не превышающей скорость света (в главах 9 и 10 мы увидим, что этот результат распространяется и на любые конечные скорости, даже сверхсветовые, если только они конечны). Сходным образом мы должны исключить и общие причины, следствия которых также могли бы последовательно передаваться в пространстве от точки к точке. Говорят, что эти два типа объяснения базируются на локальных переменных, потому что все происходит локально и развивается от точки к точке. Отсюда и возникли стандартные термины «локальное объяснение» и «локальные переменные»<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Некоторые предпочитают называть их локальными скрытыми переменными, но скрыты они или не скрыты, ничего в наших рассуждениях не меняет.

Действительно замечательная штука состоит в том, что, как только мы исключаем объяснения каким-либо воздействием или общей причиной с указанными свойствами, больше никаких локальных объяснений не остается. Это означает, что нельзя объяснить это явление, рассказав историю, которая разворачивалась бы во времени и пространстве и могла бы описать, как могут быть созданы эти знаменитые корреляции. Грубо говоря, эти нелокальные корреляции в некотором смысле прорываются в наше пространство-время извне!

Но не делаем ли мы поспешного вывода? И что же такое эти нелокальные корреляции? Начнем с последнего вопроса, менее сложного. Так как эти корреляции не имеют локального объяснения, их называют нелокальными. Более строго, нелокальный означает «не описываемый через локальные переменные». Определение «нелокальный», таким образом, является негативным: оно не говорит, чем эти корреляции являются на самом деле, но сообщает лишь, чем они быть не могут. Представьте себе, что нам сказали, что некий предмет не красный. Это ничего не говорит о цвете предмета, кроме того, что он не является красным.

Еще один важный аспект негативности данного определения заключается в том, что оно вовсе не значит, что нелокальные корреляции могут использоваться для коммуникации и обмена информацией, ни мгновенной, ни на скорости выше скорости света или же ниже ее. Нелокальные квантовые корреляции вообще ни в коем случае не являются средством коммуникации. Ничто из того, чем мы можем управлять в экспериментах с нелокальными корреляциями, не движется быстрее света. Если нет передачи, то нет и коммуникации. Но результаты, которые мы получаем в эксперименте, невозможно объяснить локальными моделями, то есть их нельзя описать историей, развивающейся в пространстве и времени.

Факт отсутствия коммуникации спасает квантовую физику от прямого конфликта с теорией относительности. Некоторые даже говорят, что они мирно сосуществуют<sup>1</sup> — весьма удивительный способ говорить о двух краеугольных камнях современной физики. Тем не менее эти краеугольные камни покоятся на основаниях, которые полностью противоречат друг другу. Квантовая физика случайна по своей сути, в то время как теория относительности совершенно детерминистична. Квантовая физика предсказывает существование корреляций, которые просто невозможно объяснить при помощи локальных переменных, а в теории относительности все локально самым фундаментальным образом.

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ КВАНТОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

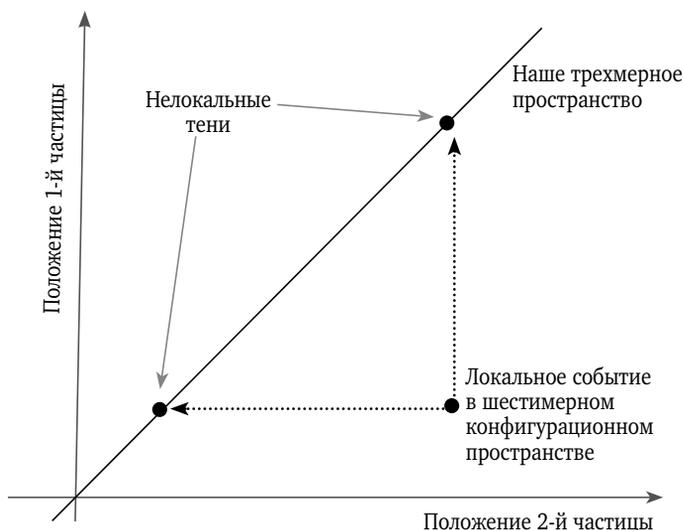
Чтобы закончить эту главу, давайте ответим на вопрос, как в математическом представлении квантовой физики описываются нелокальные корреляции. Уравнения-то работают очень хорошо, пусть и не объясняют, откуда появились эти нелокальные корреляции.

Согласно формально-математическому описанию, эти особенные корреляции возникают благодаря запутанности, а она, в свою очередь, описывается особым типом волны, которая распространяется в пространстве гораздо большей размерности, чем наше трехмерное. Пространство, в котором распространяются такие «волны», известно в физике как конфигурационное пространство, имеет количество измерений, зависящее от количества запутанных частиц, а конкретно — в три раза больше, чем это количество. В конфигурационном пространстве каждая точка представляет

---

<sup>1</sup> Shimony A.: In *Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology*, ed. by S. Kamefuchi et al., Physical Society of Japan, Tokyo (1983).

положения всех частиц, даже если они находятся на значительном удалении друг от друга. Таким образом, локальное событие в конфигурационном пространстве может задействовать очень далекие друг от друга частицы. Но мы, простые человеческие существа, не можем воспринять конфигурационное пространство, мы видим только тени происходящего в нем. Каждая частица отбрасывает на наш трехмерный мир тень, соответствующую ее положению в нашем пространстве. Тени одной точки могут находиться далеко друг от друга в нашем пространстве, хотя их порождает



**Рис. 5.2.** Квантовая теория использует пространство с большим количеством измерений для описания частиц. Поскольку две частицы могут распространяться только вдоль *прямой линии*, для них это пространство двумерно, как лист бумаги. Следовательно, каждая точка на рисунке представляет позиции двух частиц. Диагональ представляет наше обычное пространство. Событие в этом пространстве отбрасывает две тени в наше пространство, и эти тени могут оказаться на большом расстоянии друг от друга

одна конкретная точка в конфигурационном пространстве (см. рис 5.2) Конечно, это достаточно странное объяснение, если его вообще можно назвать объяснением. Если так, то в определенном смысле реальность — это то, что происходит в другом, отличном от нашего мире, а то, что мы воспринимаем, — лишь смутные тени, как в аллегории Платона о пещере, которую он использовал много столетий назад для объяснения сложности познания «истинной реальности».

Это «объяснение» происхождения нелокальных квантовых корреляций кажется более математическим, нежели физическим. Действительно, трудно поверить, что истинная реальность происходит в пространстве, количество измерений в котором зависит от количества частиц, особенно если вспомнить, что это количество изменяется с течением времени. Короче говоря, математическая форма квантовой теории ничего не объясняет, а просто предоставляет собой способ вычисления. Некоторые физики вообще считают, что объяснять ничего не нужно: «Замолчите и считайте», — скажи бы они нам.

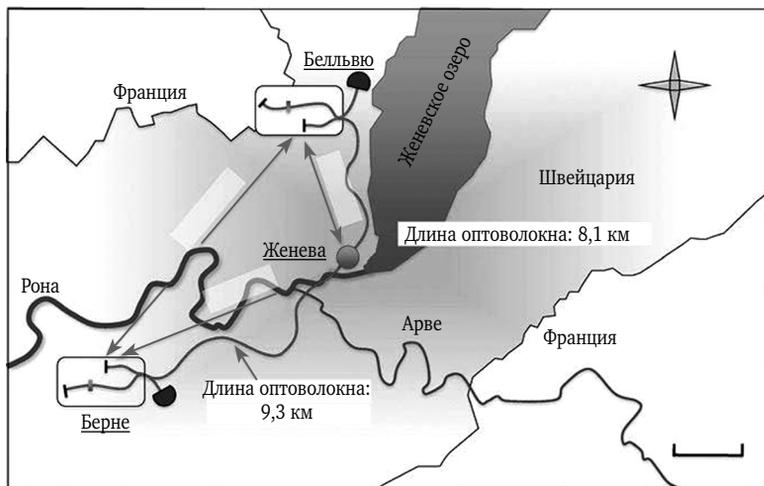
## Глава 6

# ЭКСПЕРИМЕНТ

В этой главе я познакомлю вас с экспериментом Белла — с тем, который мы провели в 1997 году в Женеве, или, если быть точнее, между деревнями Берне и Белльвю, которые находятся в десяти километрах друг от друга по прямой. В эксперименте использовалась оптоволоконная сеть швейцарского телекоммуникационного оператора Swisscom. Рис. 6.1 показывает схему этого эксперимента — первого эксперимента Белла, проведенного вне лаборатории.

### РОЖДЕНИЕ ПАР ФОТОНОВ

Начнем с главной части эксперимента, то есть с генерации запутанных фотонов. Атомы кристалла выстроены в исключительно равномерном порядке (имейте в виду, что кристалл, который мы использовали как источник для запутывания, не имеет никакого отношения к приборам Алисы и Боба). Каждый атом окружен облаком электронов. Если возбуждать атомы, воздействуя на них светом, электронные облака осциллируют вокруг ядер атомов. Если эти колебания



**Рис. 6.1.** Эксперимент по нелокальной корреляции между деревнями Берне и Бельвю примерно в 10 км друг от друга по прямой. Когда мы провели этот эксперимент, это был первый случай, когда кто-то сыграл в игру Белла за пределами одной лаборатории. Оптоволоконные линии, использованные для распространения запутанных состояний, принадлежали коммерческой телекоммуникационной сети Swisscom

несимметричны, то есть если электронные облака отклоняются от ядра в одном направлении легче, чем в другом, то мы имеем дело с нелинейным кристаллом. Причина такого названия вот в чем. Взаимодействие фотона с атомом переводит электронное облако в возбужденное состояние, и облако начинает осциллировать. Если оно колеблется симметрично, оно избавляется от возбуждения, испуская фотон той же энергии, что и изначальный, в совершенно произвольном направлении. Это явление называется флуоресценцией. Если же вибрация асимметрична, то релаксация облака происходит с испусканием фотона другого цвета.

Но цвет фотона определяет его энергию, а один из основных физических законов гласит, что энергия сохраняется. А значит, приведенное выше описание с неизбежностью неполно. Тем не менее существуют нелинейные кристаллы, которые, когда их освещают инфракрасным светом, излучают красивый зеленый свет. Этот физический механизм используется в зеленых лазерных указках, которые вы наверняка видели на презентациях в последние годы. Объясняется это так: нужно два низкоэнергетичных фотона из инфракрасной части спектра, чтобы создать один высокоэнергетичный фотон из зеленой области. Интенсивность этого зеленого света равна квадрату интенсивности инфракрасного<sup>1</sup>, отсюда слово «нелинейный» в названии. Таким образом, нелинейный кристалл может изменять цвет светового луча. На уровне фотонов в этом процессе обязательно участвуют несколько фотонов низких энергий.

Законы физики работают и в обратном направлении. Это означает, что если некий элементарный процесс может идти в одном направлении, то должен быть возможен и обратный процесс. Следовательно, должна существовать возможность послать зеленый фотон в нелинейный кристалл и получить два инфракрасных фотона. И это будет процесс образования фотонных пар<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Для того чтобы получился зеленый фотон, два инфракрасных фотона должны одновременно случайно оказаться в одной точке кристалла. Вероятность этого события изменяется с квадратом интенсивности инфракрасного излучения.

<sup>2</sup> В зависимости от того, какой тип нелинейного кристалла мы используем, эти два фотона не обязательно будут иметь тот же самый средний цвет. К примеру, один из них может быть слабым инфракрасным, то есть содержащим немного красного, а другой — сильным инфракрасным и, соответственно, совершенно невидимым для человеческого глаза. Эта разница в цвете и, следовательно, в энергии может быть значительной, в частности больше, чем неопределенность в энергиях каждого из фотонов, хотя мы продолжаем назы-

## СОЗДАНИЕ ЗАПУТАННОСТИ

Осталось понять, почему эти фотоны запутаны. Чтобы это понять, вспомним, что квантовые частицы вроде фотонов обычно имеют неопределимые физические характеристики (положение в пространстве, скорость, энергия и т. д.). К примеру, фотон обладает некоторой энергией, но эта энергия неопределима. В среднем энергия фотона может принимать то или иное значение, но с неопределимостью, которая может быть очень существенной. Дело не в том, что мы не можем точно определить энергию фотона, а в том, что эта неопределимость является неотъемлемым свойством фотона, который сам «не знает», какую энергию несет. Короче говоря, фотон не обладает неким точным значением энергии, а имеет целый спектр потенциально возможных значений (так же как позиция электрона в главе 5). Если мы очень точно измеряем энергию фотона, мы получаем случайный результат из целого спектра возможностей — истинно случайный, как мы говорили выше, результат. Следует понимать, что для воспроизведения истинной случайности, которая, как мы видели, необходима для победы в игре Белла, определенные физические величины не должны иметь точно определенных значений. Они должны быть неопределимыми и принимать точное значение лишь тогда, когда делается точное измерение. Какое точное значение? А вот это — уже квантовая случайность.

---

вать их инфракрасными. Благодаря этой разнице два фотона могут быть разделены, и мы можем послать слабый инфракрасный фотон Алисе, а сильный инфракрасный — Бобу. Для этого мы направляем фотоны в оптоволоконные кабели, такие же, которые вы используете каждый день, когда сидите в Интернете, смотрите телевизор или звоните приятелю. В реальном эксперименте инфракрасные фотоны подгонялись под характеристики оптоволоконных кабелей, так что их называли телекоммуникационными фотонами. Их цвет должен быть таким, чтобы оптоволоконно телекоммуникационной сети оказалось максимально прозрачным.

Как энергия, так и возраст фотона, а именно время, прошедшее с момента, когда он был испущен источником света, также может быть неопределим. Потенциальный возраст фотона может варьировать от нескольких миллиардных долей секунды вплоть до нескольких секунд, в зависимости от того, каким образом этот фотон был излучен. Знаменитое соотношение неопределенности Гейзенберга (см. справку 8) для фотонов гласит, что чем точнее определен возраст фотона, тем выше неопределимость его энергии. И наоборот, чем точнее мы знаем его энергию, тем выше неопределимость его возраста.

Но вернемся к нелинейным кристаллам и парам фотонов, которые они производят. Представьте, что нелинейный кристалл возбуждается зеленым фотоном с очень точно определенным значением энергии, то есть с очень низкой неопределимостью энергии. Этот фотон превращается в два инфракрасных фотона, каждый из которых обладает неопределимой энергией, но при этом сумма этих энергий в точности равна энергии первоначального зеленого фотона. Мы получаем два инфракрасных фотона, каждый с неопределимой энергией, но сумма этих двух энергий определена очень точно.

Таким образом, энергии двух фотонов коррелируют. Если мы измерим эти энергии и обнаружим, что у одного из них значение энергии выше среднего, то значение энергии у другого обязательно будет ниже среднего. Удивительное свойство нелокальности: энергия одного фотона, изначально неопределимая, может быть определена в результате измерения энергии другого фотона.

Но этого все еще недостаточно. Чтобы играть в игру Белла, мы должны иметь возможность выбора по меньшей мере из двух типов измерений — они будут соответствовать двум положениям джойстика. Так как мы очень точно знаем энергию исходного зеленого фотона, то, в соответствии

с принципом неопределенности Гейзенберга, его возраст соответственно неопределим. А что мы можем сказать о паре инфракрасных фотонов? Поскольку их энергии неопределимы, их возраст мы можем определить довольно точно — в действительности даже более точно, чем возраст зеленого фотона.

Но может ли один из инфракрасных фотонов быть старше другого? Ответ: не может, ведь так могло получиться лишь в том случае, если бы этот фотон возник в кристалле раньше другого. Но если бы один из инфракрасных фотонов появился раньше другого, то это означало бы, что в короткий интервал времени между их появлениями не действовал закон сохранения энергии, а это невозможно. Два инфракрасных фотона должны появиться одновременно, ровно в тот момент, когда распался зеленый фотон. Так в какой именно момент появляются инфракрасные фотоны? Ответ таков: момент появления двух инфракрасных фотонов неопределим, так же как и возраст зеленого фотона.

Итак, два инфракрасных фотона имеют одинаковый возраст, но этот возраст неопределим. Если мы измерим возраст одного из них, мы получим истинно случайный результат. Но с этого момента возраст второго фотона становится определенным. Это и есть вторая квантовая корреляция, которая необходима, чтобы играть и выиграть<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Если мы принимаем соотношение неопределенности Гейзенберга, а следовательно, то, что квантовая физика по природе своей рождает случайные результаты, тогда нам не понадобятся две физические величины, такие как энергия и возраст фотона. Для демонстрации нелокальности квантовой физики будет достаточно одной. Но если бы у нас не было двух значений, никто не поверил бы в истинную случайность, потому что нам могли возразить, например, что значение энергии каждого фотона было вполне определимо, просто нам оно не известно. Только благодаря игре Белла, в которой Алиса и Боб обязательно должны выбирать по крайней мере из двух вариантов, мы можем убедиться в существовании истинной

Как только наши фотоны прибыли в места назначения — один в прибор Алисы, другой в прибор Боба, в идеальной ситуации их нужно сохранить в памяти. Разработки такой памяти, называемой квантовой, все еще ведутся в исследовательских лабораториях. В настоящее время эта технология не очень эффективна, и фотон хранится лишь крошечную долю секунды. Поэтому мы попросим Алису и Боба сделать выбор чуть раньше, чем придут фотоны. Таким образом, измерение произойдет мгновенно в момент прибытия. Положение джойстика определяет, что будет измерено — энергия или возраст (энергия или время, сказали бы ученые). В итоге каждый прибор покажет результат измерения. В принципе в приборах друзей могло бы храниться достаточное количество фотонов для игры, как она описана в главе 2 (и технология очень скоро даст такую возможность). Кристаллы в центре двух приборов — это и есть квантовые запоминающие устройства, которые способны хранить несколько сотен запутанных фотонов, как квантовые кристаллы памяти, которые мы сейчас разрабатываем в Женеве (однако продолжительность хранения и эффективность необходимо будет значительно увеличить).

## **ЗАПУТАННОСТЬ КВАНТОВЫХ БИТОВ**

Мы только что узнали, как «изготовить» два инфракрасных фотона, которые запутаны по энергии и по возрасту. Изменяя энергию или возраст этих двух фотонов, мы получаем идеально коррелирующие результаты. С помощью джойстиков Алиса и Боб выбирают, какое измерение выполняет прибор — энергии или возраста фотонов, но и этого пока

---

случайности и в справедливости соотношения неопределенности Гейзенберга.

недостаточно, чтобы начать играть. Причина в том, что в игре Белла результаты должны быть представлены в двоичном виде, а измерение энергии и возраста дает числовые результаты из широкого диапазона возможных значений (теоретически их бесконечно много). Поэтому нам придется, если можно так сказать, дискретизировать запутанность.

Начнем с того, что заменим лазер, который непрерывно светит на нелинейный кристалл, другим лазером, который выдает короткие импульсы света. Затем, используя полупрозрачные зеркала (физики называют такое устройство светоделителем), мы можем разделить этот импульс на два, задержать один из двух полуимпульсов и вновь свести их, как показано на рис. 6.2. Таким образом, на кристалл направляется серия из двух полуимпульсов. Это все тот же нелинейный кристалл, который используется для производства пар фотонов. В какой же момент будут образовываться эти фотонные пары? Каждый зеленый фотон, испущенный лазером, разделяется надвое, одна половина искусственно задерживается, и результат отправляется в кристалл. Таким образом, в нелинейном кристалле каждый зеленый фотон может быть превращен в два инфракрасных фотона в два разных момента времени. Если мы детектируем один инфракрасный фотон, то мы можем обнаружить его в два разных момента времени — вовремя *или* с задержкой. Тогда другой инфракрасный фотон обязательно будет обнаружен в это же время, другими словами, у него будет тот же самый возраст. Вот так мы получаем двоичный результат для измерения возраста инфракрасных фотонов. (Важно понимать, что это не означает, что зеленый фотон иногда приходит вовремя, а иногда запаздывает. Он всегда приходит *и* вовремя, *и* с опозданием, в суперпозиции этих состояний, говоря физическим языком. Его облако потенциальных возрастов имеет два пика, один соответствует варианту «вовремя»,

а другой — «с задержкой». Каждая пара инфракрасных фотонов, порожденных зеленым фотоном, также одновременно находится в двух состояниях — «вовремя» и «с задержкой», но эти два фотона всегда имеют один и тот же возраст.)

Для второго необходимого для игры измерения — измерения энергии фотона — потребуется интерферометр. Здесь важно понять, что мы можем дискретизировать и измерение энергии<sup>1</sup>, а значит, играть и выиграть в игру Белла.

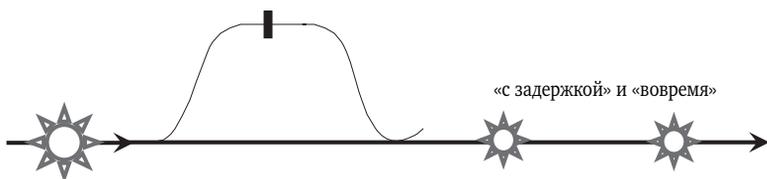
---

<sup>1</sup> Интерферометр используется для того, чтобы задержать ту часть фотона, которая «вовремя», и добиться ее совпадения с задержанной частью того же самого фотона. Две части инфракрасного фотона, которые приходят к Бобу, попадают на соединитель — эквивалент полупрозрачного зеркала. Фотон имеет на выбор два выхода из интерферометра, на каждом из которых имеется фотонный детектор. Таким образом, мы вновь получаем двоичный результат. Каждый из двух интерферометров оснащен фазомодулятором. На практике это компонент, который немного удлиняет оптический кабель и тем самым задерживает ту часть инфракрасных фотонов, которые «вовремя». Удлинение получается совсем небольшое, меньше длины волны фотона, поэтому оно не влияет на тот факт, что две части каждого фотона встречаются на последнем соединителе каждого интерферометра в одно и то же время. Чтобы достичь этого, можно, например, использовать пьезоэлектрический элемент, который будет чуть-чуть растягивать оптоволокно. Важно, чтобы два фотона всегда имели один шанс из двух быть обнаруженным каждым из двух детекторов. С другой стороны, вероятность того, что оба инфракрасных фотона одной пары будут обнаружены верхним детектором, и следовательно, что  $a = 0 = b$ , зависит от способа, которым мы удлиняем оптические пути в местах нахождения Алисы и Боба, или как, сказали бы физики, она зависит от суммы фаз. Таким образом, корреляция между результатами Алисы и Боба зависит от этих небольших удлинений у Алисы и у Боба. С формальной точки зрения эта форма запутанности, известная как запутанность временных интервалов, эквивалентна поляризационной запутанности (W. Tittel, G. Weihs: Quantum Information and Computation 1, 3–56 (2001)). Преимущество ее — в лучшей приспособленности к оптическим волокнам, а кроме того, легко также увеличить количество временных интервалов и тем самым изучить случаи с более чем двумя возможными результатами.

## ЭКСПЕРИМЕНТ БЕРНЕ–БЕЛЛЬВЮ

Мы провели вышеописанный эксперимент в Женеве в 1997 г. Это был первый случай, когда игру Белла устроили за пределами одной физической лаборатории. У меня был солидный опыт в области телекоммуникации, и в частности в оптоволоконных технологиях — в начале 1980-х я поучаствовал в их внедрении в Швейцарии. Главная техническая трудность заключалась в последовательном обнаружении фотонов с длиной волны, совместимой с характеристиками оптоволоконного кабеля. В то время таких детекторов просто не существовало. Во время первых прогонов эксперимента нам приходилось погружать некоторые диоды в жидкий азот, чтобы они сохраняли низкую температуру. И совсем другого характера проблемой был доступ к оптоволоконной сети национального оператора Swisscom. К счастью, благодаря моей прежней работе в этой области у меня сохранились прекрасные связи.

Кристалл, являвшийся источником запутанности, и все сопутствующее оборудование мы привезли и смонтировали в телекоммуникационном центре возле железнодорожной



**Рис. 6.2.** Иллюстрация кубита с кодированием во временных интервалах. Слева мы видим приходящий фотон. Он может проследовать по нижнему, короткому пути, или по верхнему, длинному. Затем эти пути рекомбинируют, и фотон может прийти «вовремя», если он прошел по короткому пути, или «с задержкой», если выбрал длинный. Квантовая физика утверждает, что в действительности фотон может пройти по обоим путям, короткому и длинному, и потому придет и вовремя, и с задержкой, то есть в суперпозиции, как сказали бы физики

станции в Корнавене. Отсюда один непрерывный оптоволоконный кабель шел в деревню Белльвию к северу от Женевы, а второй — в деревню Берне к югу от Женевы, более чем в 10 км по прямой от Белльвию. В каждой деревне в их маленьких телекоммуникационных центрах мы сумели установить наши интерферометры и фотонные детекторы (вместе с жидким азотом!). Попасты в эти помещения было непросто, даже имея ключ. В течение одной минуты после открытия двери необходимо было позвонить на пульт охранной сигнализации по специальному интерфону и сказать пароль. Потом нужно было спуститься на четыре этажа вниз в подвал, куда сходились все оптоволоконные кабели из окружающих районов. Учитывая, что воспользоваться там мобильным телефоном было невозможно, предлагаю читателю подумать над этой логистической задачей!

Итак, эксперимент начался. Мы были совершенно уверены, что выиграем в игру Белла, но нас ждало три сюрприза. Первый состоял в том, что, когда солнце поднималось над горизонтом, кабель, уходящий на юг, становился значительно длиннее, чем второй, хотя они оставались почти одинаковой длины. Была такая версия, что этот кабель проходил через мост, а значит, был зарыт на меньшей глубине и подвергался большим вариациям температуры. Так возникла сложная проблема синхронизации, но через несколько бессонных ночей мы нашли решение. Второй сюрприз был приятным. Миссис Мэри Белл, вдова Джона Белла, приехала посмотреть на наши старания. Наконец, уже после публикации результатов эксперимента<sup>1</sup> нам был преподнесен третий сюрприз в виде разворота в *New York Times*, визита группы BBC для съемки происходящего и признание его одним из экспериментальных прорывов 1990-х по версии Американского физического общества.

---

<sup>1</sup> Tittel W, Brendel J., Zbinden H., Gisin N.: *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, Phys. Rev. Lett. **81**, 3563 (1998).



## Глава 7

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Жизнеспособная физическая концепция всегда приводит к изменениям в повседневной жизни. Уравнения электродинамики, открытые Максвеллом в XIX веке, легли в основу развития электроники в XX веке. Точно так же мы можем ожидать, что квантовая физика, открытая в XX веке, станет двигателем технологического развития в XXI веке. Благодаря квантовой физике мы уже получили лазеры, которые используются в считывателях DVD-дисков, к примеру, или полупроводники, столь важные для наших компьютеров. Но эти первые приложения основываются лишь на свойствах ансамблей квантовых частиц, то есть ансамблей фотонов в лазерах и электронов в полупроводниках. А что можно сказать об использовании нелокальных квантовых корреляций? В них участвуют пары квантовых частиц — одна для Алисы, другая для Боба. Эти частицы нужно обрабатывать по одной, а это сложная задача. Но физики — это не те люди, которые будут стоять на месте и ждать. В этой главе я расскажу о двух

областях использования нелокальных корреляций, которые уже нашли коммерческое применение, но я почти уверен, что совсем скоро нас ждут новые чудесные приложения.

## **ГЕНЕРАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТИННОЙ КВАНТОВОЙ СЛУЧАЙНОСТИ**

Первый способ применения очень прост. Мы видели, что нелокальные корреляции возможны только в том случае, если результаты, получаемые Алисой, истинно случайны. Но как мы можем использовать случайность? Нет ничего полезней для информационного общества! Мы все владельцы банковских карт и бесчисленных паролей. Каждой банковской карте присвоен пин-код, который должен оставаться в секрете, а значит, должен быть выбран случайно. Но не так просто создать случайность. Ранее мы обсуждали важность случайных чисел для численного моделирования. Другой пример, получивший сегодня быстрое развитие, — это онлайн-казино. Вытягивая карту или номер, нужно быть уверенным, что это действительно результат случайного выбора. Иначе либо электронное казино жульничает, либо оно использует псевдослучайные числа — и рискует разориться, если какой-нибудь умник определит их последовательность. Таким образом, большие надежды внушает такое прикладное направление, как создание генератора случайных чисел, работающего на истинной квантовой случайности — единственной истинной случайности, известной физике.

Суть прикладной физики в том, чтобы достичь такой степени понимания какого-то аспекта, чтобы можно было упростить схему и сделать ее экономически жизнеспособной. Алиса и Боб с их компьютерами, разделенными достаточным пространственно-подобным интервалом, чтобы исключить

их влияние друг на друга даже со скоростью света, но при этом выигрывающие в игру Белла, — это слишком сложный сценарий для коммерческого применения. Если рассматривать Алису отдельно, то мы увидим, что она получает поток фотонов, проходящий через полупрозрачное зеркало, прежде чем попасть на два детектора фотонов. Того факта, что фотоны запутаны и что Боб на своем конце провода нацелен на победу и действует таким же образом, достаточно, чтобы гарантировать истинную случайность в основе результата Алисы, и в итоге нам понадобится только этот результат. Таким образом, достаточно лишь, чтобы Боб был возможен в виртуальном смысле, а для прикладного использования мы можем про него забыть. Как только мы сделали этот шаг, запутанность перестает быть необходимой. Достаточно знать, что фотон Алисы принципиально может быть запутан, но на практике в этом нет надобности. Наконец, вместо одного фотона Алиса может использовать лазер с очень низкой интенсивностью излучения — так, что почти никогда не существует более одного фотона. Такова основа для большинства коммерчески доступных квантовых генераторов случайных чисел.

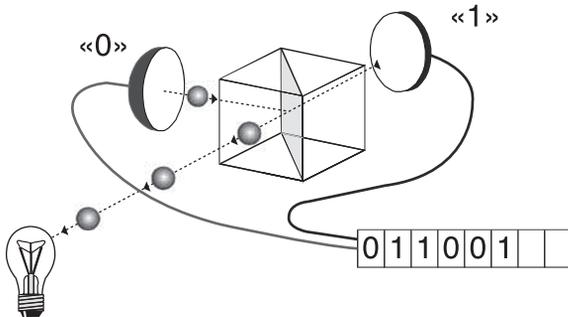
Рис. 7.1 показывает квантовый генератор случайных чисел, предлагаемый женеvской компанией ID Quantique SA<sup>1</sup>. Кто-то может подумать, что он устроен слишком просто. Куда делись нелокальные корреляции? Этот генератор не использует их впрямую, но одна лишь возможность использовать фотоны того же типа, светоделители и детекторы для производства нелокальных корреляций гарантирует, что полученные результаты истинно случайны.

Кто-то может недоверчиво спросить, а откуда уверенность, что мы располагаем тем же типом светоделителей

---

<sup>1</sup> [www.idquantique.com](http://www.idquantique.com).

и детекторов, — и он будет совершенно прав. Для того чтобы сделать генератор случайных чисел коммерчески жизнеспособным, нам пришлось принять гипотезу о том, что все устройства надежны. Такое допущение является очень



**Рис. 7.1.** Квантовый генератор случайных чисел. Идея проиллюстрирована диаграммой. Фотон проходит через полупрозрачное зеркало и попадает на один из двух детекторов. Каждый детектор ассоциирован с двоичным числом, с битом. Вверху мы видим первый коммерческий генератор размером 3x4 см, созданный женеvской компанией ID Quantique

частым, и оно тщательно проверено. Существует элегантный способ обойти эту проблему, но тогда нам придется вернуться к схеме игры Белла и отказаться от всех упрощений, перечисленных выше. Такие эксперименты проводились, но исключительно в лаборатории<sup>1</sup>.

## КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ: ИДЕЯ

Вторая область применения — это квантовая криптография. Мы уже знаем, что если два объекта запутаны, то одно и то же измерение в отношении их обоих всегда дает одинаковый результат. На первый взгляд непонятно, как это может пригодиться, особенно если эти идентичные результаты произведены совершенно случайно. Однако для криптографа это явление представляет глубокий интерес. Люди информационного века постоянно обмениваются огромным количеством информации, большая часть которой должна оставаться конфиденциальной. Для этого перед отправкой получателю информация шифруется. Это означает, что в глазах третьего лица закодированная информация выглядит как длинный бессмысленный набор символов без определенной структуры и значения. В долгосрочной перспективе, однако, необходимо периодически менять код, и в идеале — делать это для каждого нового сообщения, что создает проблему обмена ключами кодирования. Эти ключи должны быть известны и отправителю, и получателю, и никому кроме них. Можно, конечно, представить себе флотилии бронированных такси,

---

<sup>1</sup> Pironio S., et al.: *Random numbers certified by Bell's theorem*, Nature **464**, 1021–1024 (2010); B. G. Christensen, K. T. McCusker, J. B. Altepeter, B. Calkins, T. Gerrits, A. E. Lita, A. Miller, L. K. Shalm, Y. Zhang, S. W. Nam, N. Brunner, C. C. W. Lim, N. Gisin, P. G. Kwiat: *Detection-loophole-free test of quantum nonlocality, and applications*, Phys. Rev. Lett. **111**, 130406 (2013).

колящих по миру, чтобы доставить эти ключи пользователям, но, может быть, есть способ попроще?

Сегодня некоторые правительства и крупные компании действительно отправляют человека с кейсом, пристегнутым к запястью, к своим партнерам, с которыми они считают совершенно необходимым вести переписку в чрезвычайно конфиденциальном режиме. Однако нас, простых смертных, вполне устраивает более практичная система, к примеру для покупок в Интернете, где защита основана на математической теории сложности. Эта система шифрования называется криптографией с открытым ключом. Идея заключается в том, что некоторые математические операции, в частности перемножение двух простых чисел, очень просто выполнить на компьютере, но крайне непросто выполнить обратную операцию. В данном случае необходимо разложить результат на множители, то есть найти по произведению два исходных простых числа. Это достаточно долгий процесс даже для мощного компьютера.

Детали здесь не важны, но необходимо понять, что значит «сложное». Школьник назовет задачу сложной, если даже лучшие ученики не могут ее решить. В криптографии с открытым ключом все обстоит примерно так же, только вместо одноклассников нужно взять лучших математиков со всего света, собрать их вместе в удобном месте и пообещать им золотые горы за найденное решение. Если никто из них не преуспеет, то задача поистине сложна. Но «сложная» не значит «невозможная». История математики полна примеров задач, которые не сдавались лучшим умам на протяжении лет, а иногда и столетий, пока в какую-нибудь светлую голову не приходило решение.

Математика устроена так, что, как только вы нашли решение, вы всегда можете его воспроизвести и использовать. Поэтому если когда-нибудь (быть может, завтра) какой-нибудь

гениальный человек откроет быстрый способ найти два простых сомножителя по их произведению, все электронные деньги мира мгновенно потеряют ценность. Больше не будет пластиковых карт, онлайн-торговли, межбанковских займов. Это будет катастрофа. Вдобавок, если какая-то компания хранит архив переписки, зашифрованной с открытым ключом, то всю ее можно будет расшифровать и прочесть конфиденциальные сообщения, отправленные несколькими годами, а то и десятилетиями раньше. Поэтому, если вы хотите, чтобы ваши данные оставались конфиденциальными в грядущие десятилетия, вам лучше прямо сейчас прекратить использовать криптографию с открытым ключом.

Вот почему так важно найти результаты, которые возникают истинно случайно и при этом всегда идентичны у Алисы и Боба. Если Алиса и Боб делят запутанную пару фотонов, то они могут в любой момент выдать последовательность результатов, которую тут же можно использовать как шифровальный ключ. А благодаря теореме о невозможности клонирования они могут быть уверены, что никто не сможет получить копию их ключа. Вот так просто — по крайней мере на бумаге.

## **КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ НА ПРАКТИКЕ**

Как упростить схему игры Белла для практического применения изложенной выше идеи? Мы опять же увидим, как важно понимать фундаментальные физические принципы, чтобы разработать простой, но не слишком упрощенный способ реализации квантовой криптографии.

**Первое упрощение.** Каждый экспериментальный прогон игры Белла включает три части — это Алиса, Боб и кристалл, который производит запутанные фотоны. Исходя

из соображений симметрии, последний обычно помещается посередине. Однако это не очень удобно, поэтому давайте поместим его рядом с Алисой. Таким образом, мы получим уже только две сущности, и теперь мы не обязаны соблюдать запрет на обмен информацией между Алисой и Бобом, обусловленный теорией относительности. В то же время в криптографии мы должны быть уверены, что информация не утекает против нашей воли, так как это уже будет нарушением конфиденциальности.

**Второе упрощение.** Теперь, когда источник запутанных пар фотонов находится у Алисы, она измеряет кубит, переносимый ее фотоном, задолго до Боба. Фактически она измеряет его еще до того, как второй фотон отправится от нее к Бобу. Поэтому, вместо того чтобы использовать источник фотонных пар и измерять один из них, безвозвратно разрушая его, Алисе проще использовать источник, который будет генерировать фотоны один за другим.

**Третье упрощение.** Источник единичных фотонов — это все еще очень сложная установка. Проще использовать источник, который генерирует очень слабые лазерные импульсы — такие, что в одном импульсе нечасто бывает по несколько фотонов. И это уже будет надежный, хорошо отработанный и недорогой источник. Осталось только решить, что делать с происходящими время от времени многофотонными вспышками. На практике, однако, достаточно лишь точно оценить частоту таких вспышек. Сделаем консервативное предположение о том, что любой шпион может узнать об этих многофотонных импульсах всё. После обмена множеством импульсов (обычно — миллионами фотонных посылок) Алиса и Боб могут оценить, как много их враг может знать об их результатах в наихудшем случае. Затем

они могут применить стандартный алгоритм усиления безопасности<sup>1</sup>. Он позволяет выделять из полного ключа укороченный и гарантирует, что противник получит доступ лишь к ничтожно малому количеству информации. Несмотря на то что новый ключ короче, можно быть уверенным в абсолютной защите<sup>2</sup>.

В итоге у нас остается только два прибора. Один посылает лазерные пучки малой интенсивности с закодированной (в поляризации или во временных интервалах) квантовой информацией, как описано в главе 6, а другой измеряет поляризацию или возраст этих фотонов. Конечно, на практике есть и другие технические тонкости, но если вы осилили книгу до этого места, то вы поймете большую часть прикладной физики<sup>3</sup>.

Сегодня некоторые организации Женевы, имеющие системы резервного хранения данных в 70 км от нее, вблизи

---

<sup>1</sup> На уровне интуиции его можно описать следующим образом. Представьте два бита  $b_1$  и  $b_2$  и противника, который угадывает значения каждого из них с вероятностью  $3/4$ . Заменяем эти два бита их суммой  $b: b_1 + b_2$  (по модулю 2, то есть значение суммы по-прежнему является битом). Противник узнает значение  $b$  только в том случае, если угадает оба бита или не угадает ни одного. Это означает, что он угадывает  $b$  с вероятностью  $(0.75)^2 + (0.25)^2 = 0.625$ , что меньше, чем  $3/4$ . Таким образом, Алиса и Боб повысили конфиденциальность своего шифра, отдав за это половину ключа. Более изощренные алгоритмы работают лучше и с меньшими потерями оригинального ключа.

<sup>2</sup> Изначальная ненадежность передачи не должна быть слишком велика. Поэтому импульсы, которые Алиса отправляет Бобу, должны быть достаточно слабыми, чтобы ограничить частоту многофотонных импульсов.

<sup>3</sup> Дополнительные детали см. в: N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden: *Quantum cryptography*, Rev. Mod. Phys. **74**, 145–195 (2002); V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Cerf, M. Dusek, N. Lukenhaus, M. Peev: *The security of practical quantum key distribution*, Rev. Mod. Phys. **81**, 1301 (2009).

Лозанны, с успехом используют оптоволоконный кабель, проходящий под Женевским озером, чтобы получить доступ к криптографическим системам, коммерциализованным компанией IDQ при Женевском университете.

С точки зрения истории интересно отметить, что вышеупомянутая упрощенная версия была изобретена гораздо раньше той, что основана на нелокальности. Это одна из странностей истории, очень человеческая и не поддающаяся логике. Когда Беннетт и Brassar изобрели квантовую криптографию в ее упрощенной версии, ни один физический журнал не взялся опубликовать их работу. Слишком непривычно! Слишком оригинально! Или просто непонятно тем физикам, которых попросили прорецензировать представленную работу? В итоге Беннетт и Brassar опубликовали результаты своих исследований в сборнике трудов компьютерной конференции в Индии. Естественно, эта публикация 1984 года оставалась незамеченной до 1991 года, когда Артур Экерт независимо переоткрыл квантовую криптографию — на этот раз уже основанную на нелокальности — и опубликовал работу в престижном физическом журнале.

## Глава 8

# КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ

Что может быть чудеснее телепортации? Объект исчезает отсюда, чтобы мгновенно появиться где-то там, не проходя каких-либо промежуточных положений! Современные технологии коммуникации иногда наводят на такие рассуждения, особенно когда электронное письмо покидает мой компьютер и через несколько секунд появляется на экране компьютера друга на другой стороне света. Но в случае с электронным письмом мы хорошо знаем, что целая сеть сигналов Wi-Fi, электроны в медных проводах и фотоны в оптоволокне перемещали мое послание непрерывно из точки в точку через пространство, пока оно не достигло места назначения. Телепортация — это явление совсем другого рода, ведь объект «прыгает» прямо отсюда туда, не проходя ни через одну промежуточную точку. От нее веет волшебством или научной фантастикой. Если, конечно, не существует некий способ воспользоваться квантовой нелокальностью, этим сверхъестественным мостиком между удаленными друг от друга местами.

В течение всего повествования я говорил, что нелокальность не может быть использована для коммуникации. Но научно-фантастическая версия телепортации позволяет коммуникацию на произвольной скорости. Более того, любой объект с необходимостью состоит из материи (или из энергии, как фотон), и материя не может переместиться из точки в точку пространства, не пройдя через некоторые промежуточные точки. Поэтому научно-фантастический вариант телепортации невозможен. И все же в 1993 году несколько физиков устроили для развлечения мозговой штурм и, играя с идеей нелокальности, изобрели то, что сегодня известно как квантовая телепортация<sup>1</sup>. У публикации было шесть авторов, то есть никто не изобрел квантовую телепортацию в одиночку. В действительности она стала результатом интеллектуального пинг-понга в группе людей, что совсем не похоже на типичный образ блестящего саванта-отшельника<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Я расскажу небольшую историю, чтобы вы поняли, насколько мы продвинулись с начала второй квантовой революции в 1990-х годах. В 1983 году я был молодым постдоком в Соединенных Штатах. Однажды ко мне подошел уважаемый профессор, с сияющей улыбкой на лице, и сообщил мне, что только что спас мне жизнь. Он был рецензентом одной из моих ранних научных публикаций, в которой я совершил страшное богохульство, написав, что в квантовой физике представляется возможным, что «система может исчезнуть здесь и появиться вновь где-то еще». Сегодня это напоминает телепортацию, но тогда я вовсе не думал в таком ключе. Это была интуиция. Мой «спаситель» принял мою работу к публикации при обязательном условии, что вышеупомянутое богохульство будет исключено. В те времена такое заявление могло навлечь на меня всеобщее порицание! Интересно, сколько возможностей было упущено благодаря уважаемым профессорам, утверждающим раз за разом, что Бор уже все объяснил? Сколько талантливых молодых умов в результате ушло из физики? И сколько уважаемых профессоров до сих пор утверждают, что Бор действительно все объяснил?

<sup>2</sup> Bennett C. H., Brassard G., Crepeau C., Jozsa R., Peres A. and Wootters W. K.: *Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels*, Phys. Rev. Lett. **70**, 1895–1899 (1993).

## СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА

Так как же происходит телепортация? Сначала мы должны спросить себя, что понимать под объектом. Аристотель говорил о двух существенных ингредиентах — о содержании и о форме<sup>1</sup>. Сегодня физики говорят о веществе и о физическом состоянии. К примеру, письмо сделано из бумаги и чернил, что являет собой вещество, и содержит текст, то есть информацию, или физическое состояние бумаги и чернил. Для электрона вещественное — это его масса и электрический заряд (наряду с другими постоянными характеристиками), в то время как облака потенциальных координат и скоростей формируют его физическое состояние. Для фотона — безмассовой частицы света — вещественной является его энергия, а физическое состояние включает поляризацию и облака потенциальных позиций и частот колебаний (т. е. энергии).

В квантовой телепортации мы не телепортируем объект в целом, а только его квантовое состояние, или, как говорил Аристотель, его форму. Вы разочарованы? Не стоит! Ведь мы уже знаем, что никогда не сможем мгновенно переместить массу или энергию объекта. Это бы стало серьезным нарушением принципа невозможности коммуникации без передачи информации (см. справку 5). Более того, тот факт, что возможно телепортировать квантовое состояние объекта,

---

<sup>1</sup> Именно так мы начали нашу статью о первом большом эксперименте по телепортации. Однако редакторы знаменитого журнала *Nature* отказались печатать цитаты Аристотеля по причине их древности! Я настойчиво убеждал моих студентов забыть об идее опубликоваться в *Nature*, но давление было слишком велико, и в итоге мы сдались требованиям редакторов. См.: I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, N. Gisin: *Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths I*, *Nature* **421**, 509–513 (2003) (представленный вариант: arXiv: quant-ph/0301178).

сам по себе достаточно сверхъестественен. Действительно, квантовое состояние формирует структуру материи на самом глубинном уровне. Мы, следовательно, телепортируем не просто приблизительное описание, но *всё*, что вообще может быть телепортировано. И нельзя забывать теорему о запрете клонирования из главы 4. Когда мы телепортируем квантовое состояние объекта, оригинал обязательно должен исчезнуть, иначе мы получили бы две копии, что противоречит теореме о запрете клонирования. Таким образом, нам гарантировано исчезновение оригинала здесь и появление телепортированного состояния там.

Подведем итог. В квантовой телепортации вещество (масса, энергия) исходного объекта остается в точке отправления, скажем с Алисой, но вся его структура (физическое состояние) просто исчезает, испаряется. К примеру, если Алиса телепортирует пластилиновую утку, пластилин останется на месте, но не перестанет иметь формы утки. По сути, это будет бесформенный кусок пластилина. А в пункте назначения, скажем у Боба, на каком-то произвольном расстоянии (и в каком-то месте, которое может быть неизвестно Алисе), мы начнем с бесформенной кучи пластилина (или вещества). Но в конце процесса телепортации пластилин Боба приобретет точную форму исходной утки, вплоть до отдельного атома. Естественно, этот пример все еще остается научной фантастикой. Сейчас и в обозримой перспективе мы не сможем телепортировать пластилиновую утку. Для современной технологии это слишком сложная задача. Быть может, квантовая физика и вовсе не работает на масштабах таких повседневных объектов? Поэтому давайте рассмотрим второй пример, который одновременно более реалистичен и более абстрактен. Речь пойдет о поляризации фотона.

Фотон — это крошечный пакет энергии света (физики говорят об электромагнитной энергии). Помимо прочего,

эта энергия включает слабое колеблющееся электрическое поле. Если фотон имеет четкую поляризацию, электрическое поле регулярно колеблется в точном направлении. Однако если такой же фотон не имеет четкой поляризации (физики скажут, что он не поляризован<sup>1</sup>), то это электрическое поле вибрирует во всех направлениях в совершенном беспорядке.

В начале фотон Алисы имеет четкую поляризацию, то есть вибрирует в хорошо определенном направлении. Это направление мы можем не знать, но оно существует. После телепортации энергия фотона Алисы остается на месте, но он больше не поляризован. Боб начинает эксперимент с фотоном (и, следовательно, энергией<sup>2</sup>), который не поляризован, но после телепортации последний приобретает четкую поляризацию телепортированного фотона. Таким образом, фотон Боба становится во всем идентичен исходному фотону Алисы, а фотон Алисы — исходному фотону Боба<sup>3</sup>.

Это и означает, что произошла телепортация. Мы рассматриваем фотон как совокупность энергии и поляризации, то есть как объект, определяемый вещественным

---

<sup>1</sup> Фотон с определенной поляризацией всегда будет проходить через соответствующий поляризатор. С другой стороны, совершенно неполяризованный фотон всегда будет иметь один шанс из двух пройти через любой поляризатор, вне зависимости от направления последнего. В первом случае фотон несет в себе структуру, которую поляризатор может подтвердить, а во втором вероятности получения ответов «прошел» или «не прошел» будут равны 50%, какой бы поляризатор ни использовался, ведь этот фотон не несет в себе такой структуры.

<sup>2</sup> Как мы видели в главе 6, энергия фотона может быть неопределима. На самом деле это справедливо и для массы, к примеру конденсата Бозе — Эйнштейна. Важно, чтобы вещество, масса или энергия уже присутствовали в пункте назначения, хотя бы потенциально.

<sup>3</sup> Для читателей-физиков: это так, если мы телепортируем все характеристики фотона. Если мы телепортируем только поляризацию, фотоны будут неразличимы лишь в том случае, если их остальные характеристики, такие как спектр, были неразличимы изначально.

компонентом и физическим состоянием. Этот объект действительно перемещается от Алисы к Бобу, не проходя никаких промежуточных точек в пространстве. Мы не сможем отличить ситуацию после квантовой телепортации от результата выполнения сценария, в котором фотон Алисы был физически передан Бобу, а фотон Боба — Алисе.

Но сказанное не объясняет, как на самом деле работает квантовая телепортация. Мы понимаем, что мы должны использовать квантовую нелокальность, но этого недостаточно. Нам нужно познакомиться еще с одной концепцией, известной как связанные измерения.

## **СВЯЗАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Для осуществления телепортации в реальной жизни нам нужна пара запутанных между собой квантовых объектов, конкретно — пара фотонов, запутанных по поляризации. Еще нам понадобится исходный объект телепортации — допустим, фотон, чью поляризацию мы хотим передать. Состояние поляризации, таким образом, является битом квантовой информации, или кубитом, который надо передать. У Алисы (отправителя) есть фотон для телепортации, а точнее, фотон, который несет кубит поляризации, подлежащий передаче. Также у Алисы есть еще один фотон, и она знает, что последний запутан с третьим фотоном у Боба на большом расстоянии от нее. При этом Алисе не нужно знать о местонахождении Боба. Что она может сделать? Если попытаться измерить отправляемый кубит измерением, то это нарушит его квантовое состояние, и телепортировать будет уже нечего. Если Алиса измерит поляризацию второго фотона, того, что запутан с фотоном Боба, она будет знать, что может обеспечить нелокальную корреляцию с Бобом, но как это может пригодиться? Алиса знает,

что, если Боб проведет то же измерение, что и она, они получат одинаковый результат, случайный, но одинаковый на обеих сторонах.

Процесс телепортации требует, чтобы Алиса использовала вторую сторону явления запутанности, о которой мы еще очень мало знаем. Пока мы говорили только о первом проявлении запутанности, при котором две удаленные друг от друга квантовые частицы, к примеру два фотона, могут быть описаны неким запутанным состоянием. А у Алисы — два фотона, описываемых двумя состояниями. Первый — в неизвестном Алисе, но четко определенном состоянии поляризации, которого она может и не узнать, а второй — в некоем запутанном состоянии. Алисе нужно запутать два своих фотона. Чтобы сделать это, недостаточно измерить только один из них или другой. Она должна измерить их совместно. Это так же трудно понять, как и само явление запутанности, ведь мы не наблюдаем ничего похожего в привычном мире вокруг.

Представьте себе, что Алиса спрашивает у двух своих фотонов: «Вы похожи?» По-другому этот же вопрос звучит так: «Если бы я провела одно и то же измерение над каждым из вас, вы бы дали одинаковые ответы?» В привычном нам мире получить ответ на этот вопрос можно лишь единственным способом: действительно выполнив два измерения и сравнив результаты. Но в квантовой физике благодаря существованию запутанности мы можем пойти в обход. Мы можем «задать» двум фотонам этот вопрос, и они ответят, перейдя в запутанное состояние, и для этого не нужно проводить два отдельных измерения над каждым из них. Мы уже знаем такое свойство запутанного состояния, что если мы проведем одинаковое измерение, то есть проверим одно направление поляризации (как говорилось в главе 5), то они всегда будут выдавать один и тот же случайный результат,

характеризуемый, как всегда, истинной нелокальной случайностью. И совсем не важно, какое направление поляризации мы выберем для измерения.

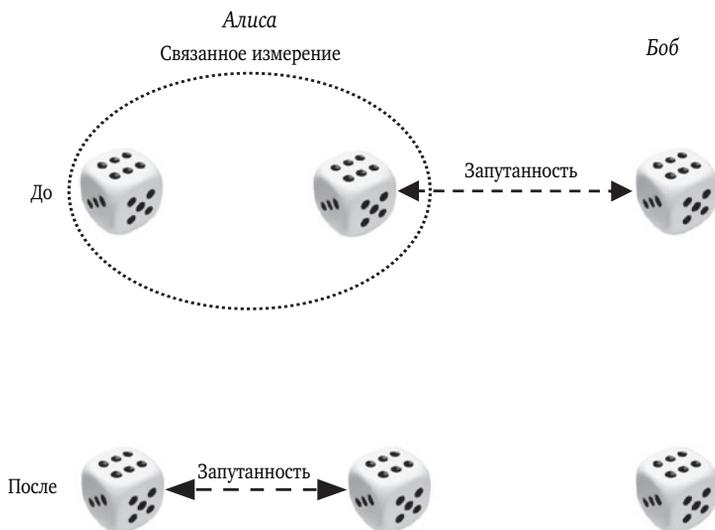
Если два фотона Алисы всегда дают тот же самый ответ на тот же самый вопрос и если фотон Боба, запутанный с фотоном Алисы, отвечает на этот вопрос так же, то из этого следует, что фотон Боба всегда будет давать тот же ответ, что и фотон, который мы хотим телепортировать. Вот так вот просто, ну или почти. Таким образом, мы должны применить эффект запутанности дважды: один раз как нелокальный канал квантовой телепортации (запутанное состояние фотонов Алисы и Боба) и второй раз, чтобы задать двум системам (двум фотонам Алисы) вопрос об их состоянии относительно друг друга, не получая при этом никакой информации о состоянии каждого из них (рис 8.1).

Но и это не конец истории. Как и всегда в квантовой физике, совместное измерение двух фотонов Алисы на предмет их относительного состояния дает истинно случайный результат, один из нескольких возможных. Если нам повезет, и мы получим результат «мы похожи» — дело в шляпе, хотя Боб об этом и не знает. Но что будет, если Алиса получит результат «мы не похожи», что означает «на один и тот же вопрос мы даем противоположные ответы»? В этом случае Боб должен «обратить» свой фотон, чтобы привести его в состояние, в котором его ответ совпал бы с ответом исходного фотона Алисы<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Здесь я должен признаться, что существует множество запутанных состояний. До сих пор, чтобы не усложнять, я всегда говорил о запутанности, при которой одни и те же измерения неизменно дают один и тот же результат. Однако существуют и другие запутанные состояния. К примеру, есть такие состояния, при которых одни и те же измерения всегда дают различные результаты. Есть и множество других, но для наших целей они не понадобятся. Для читателей-физиков скажу, что существует четыре ортогональных состо-

## Глава 8. Квантовая телепортация



**Рис. 8.1.** Квантовая телепортация. Первоначально у Алисы есть два фотона, которые здесь представлены двумя игральными *костями*. Тот, что *слева*, несет квантовый бит (кубит)  $\Psi$ , который надо телепортировать, а тот, что *справа*, запутан с фотоном Боба. Алиса выполняет связанное измерение над своими двумя фотонами. Эта операция запутывает два ее фотона и одновременно телепортирует *левый* кубит фотону Боба. Чтобы завершить процесс телепортации, Алиса сообщает Бобу результат ее связанного измерения, и Боб «разворачивает» свой фотон в соответствии с этим результатом

Но как задать вопрос фотонам? Это основная сложность эксперимента. Я не буду углубляться в этот вопрос, он лежит далеко за пределами нашего повествования.

---

ания максимальной запутанности для поляризации двух фотонов. Для каждого из них Боб может выполнить поворот (унитарное преобразование) поляризации своего фотона таким образом, чтобы он пришел точно в начальное состояние фотона Алисы, причем не зная, каким было это состояние.

## ПРОТОКОЛ КВАНТОВОЙ ТЕЛЕПОРТАЦИИ

Таким образом, совместное измерение Алисы дает случайный результат. В зависимости от этого результата либо фотон Боба всегда будет давать результат, который бы дал исходный фотон при измерении в том же направлении, либо он будет давать результат, противоположный потенциальному результату исходного фотона. Эти две ситуации равновероятны, и до этого момента Бобу не очень интересно участвовать в эксперименте. У него есть один шанс из двух получить такой же результат, который бы дал исходный фотон, и один шанс из двух на противоположный результат. Чтобы добиться этого, Бобу вообще ничего не надо делать: он же знает, что при всего двух возможных результатах вероятность правильного — 50%. Но в процессе квантовой телепортации Алиса уже знает результаты собственного совместного измерения, поэтому ей заранее известно, какой результат измерения получит Боб. Следовательно, чтобы закончить процесс квантовой телепортации, Алиса должна сообщить Бобу о положении его дел.

Теперь нам становится понятно, как квантовая телепортация уходит от передачи сигнала на произвольных скоростях: процесс закончится только тогда, когда Боб получит информацию о результате совместного измерения, запутывающего два фотона Алисы. Эта коммуникация между Алисой и Бобом необходима, потому что без нее результаты измерений Боба будут чисто случайными, и он не сумеет их истолковать. Алиса передает информацию о результатах своих измерений по классическому каналу со скоростью света или медленнее. Но передача результата Алисы с необходимостью идет со скоростью света или медленнее. Следовательно, квантовая телепортация — от начала до конца — не идет со скоростью выше скорости света. Да, когда Алиса выполняет свое совместное

измерение, что-то загадочное происходит на стороне Боба: его фотон переходит из неопределенного состояния в одно из двух возможных. Но Боб не может об этом узнать, ведь какое бы измерение он ни провел, его результат будет просто случайным. Но как только Алиса сообщает ему, в каком из двух состояний находится его фотон, Боб узнает, что он должен делать, чтобы систематически получать тот же результат, который получила бы Алиса, если бы выполнила измерение на своем исходном фотоне. Так фотон Боба оказывается в квантовом состоянии исходного фотона.

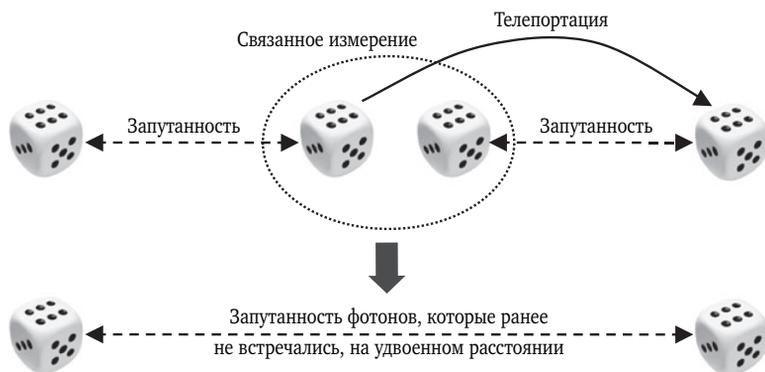
Заметьте, что Бобу совсем не обязательно измерять свой фотон. Он может сохранить его в целости на будущее и даже телепортировать куда-то еще. Можно вообразить целую телепортационную сеть с узлами, расположенными где-то в пятидесяти километрах друг от друга — на это расстояние эффект запутанности хорошо распространяется по оптоволокну. Если Боб узнает от Алисы, что его фотон всегда будет выдавать противоположный результат, Боб должен просто развернуть свой фотон<sup>1</sup>. Это можно сделать, не тревожа частицу, потому что Боб переориентирует поляризацию фотона, но не получает никакой информации о его состоянии. Заметим также, что Боб может телепортировать свой фотон дальше без «выпрямления». Необходимо лишь сообщить получателю, что тому нужно провести инверсию самому. В итоге конечный получатель рассчитает, сколько раз ему нужно развернуть фотон. Если это нечетное число, то нужно развернуть фотон один раз, а если четное, то не нужно и этого.

---

<sup>1</sup> Для этого он должен «развернуть» состояние фотона. К примеру, если кубит закодирован в поляризации, Боб должен обратить состояние поляризации при помощи кристалла с двойным лучепреломлением.

Важно еще вот что. Ни Алиса, ни Боб ничего не знают о телепортированном квантовом состоянии исходного фотона. Результат совместного измерения Алисы над двумя фотонами всегда совершенно случаен. Он не дает информации о квантовом состоянии, которое мы телепортируем, и это не должно нас удивлять. Мы видели, что если мы имеем дело с запутанным состоянием, то результат измерения в любом конкретном направлении всегда совершенно случаен — в том смысле, что он нередуцируемо случаен. И наоборот, если мы начинаем с поляризованного фотона, каким бы ни было направление поляризации, и спрашиваем: «Ты такой же?» — результат будет также совершенно случайным в указанном смысле. В некотором смысле это обратные по отношению друг к другу процессы. Рассуждая дальше, мы видим, что это абсолютно необходимо. Если бы Алиса и/или Боб могли узнать что-то о телепортируемом состоянии, они бы могли повторять процесс, телепортируя его взад и вперед, используя каждый раз новую пару запутанных фотонов, пока не накопили бы достаточно информации, чтобы воспроизвести точную копию этого состояния, а это противоречило бы теореме о невозможности клонирования (см. главу 4).

И наконец, Алиса и Боб могут телепортировать состояние фотона, который сам запутан с неким четвертым фотоном. Так как они ничего не узнают о телепортируемом состоянии, то не разрушают телепортируемую запутанность. Так мы используем оба аспекта запутанности: дважды для того, чтобы создать корреляцию разнесенных в пространстве фотонов, и один раз при совместном измерении. Мы можем запутать фотоны, которые никогда не встречались друг с другом и не имеют общего прошлого, как показано на рис. 8.2. В этом случае можно говорить о телепортации запутанности.



**Рис. 8.2.** Когда мы телепортируем кубит (фотон), который сам по себе запутан, как *второй* с *левой* стороны, который запутан с *первым*, в результате получается, что *первый* фотон запутан с *четвертым*. Мы можем описать этот процесс как телепортацию запутывания. Он особенно удивителен потому, что запутывает частицы, которые никогда до этого не встречались. Кроме того, он полезен, так как позволяет удвоить расстояние между запутанными объектами

## КВАНТОВЫЙ ФАКС И КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ

После всего сказанного можно сделать ошибочный вывод, что квантовая телепортация — это не более чем квантовый факс. Боб должен иметь кубит, подобный чистому листу бумаги, на котором будет напечатано состояние полученного «по факсу» кубита. Однако эта аналогия неверна по нескольким причинам.

Для начала заметим, что, когда мы используем телепортацию, мы не просто передаем по факсу некую небольшую порцию информации — мы передаем самую глубинную структуру материи в форме квантового состояния. Получившийся в итоге кубит не только содержит в себе состояние

исходного кубита, но и абсолютно идентичен ему во всех смыслах.

Во вторых, для описания состояния квантовой системы необходимо бесконечное количество информации, ведь квантовых состояний бесконечно много. К примеру, состояние поляризации фотона можно описать углом. Для того чтобы передать значение этого угла, необходимо бесконечное количество битов информации. В то же время при квантовой телепортации для передачи состояния поляризации фотона требуется только один бит. Это означает, что при квантовой телепортации происходит бесконечно малый объем коммуникации по сравнению с передачей информации о телепортируемом состоянии (если бы последнее было нам известно).

Третье отличие в том, что при квантовой телепортации ни Алиса, ни Боб ничего не знают о состоянии телепортируемого кубита. Этот замечательный факт крайне полезен в криптографии. Ведь если кто-то отправляет факс, любой злоумышленник может перехватить сообщение, подключившись к линии. А в квантовой телепортации такое невозможно. Как мы знаем, состояние телепортируемого кубита неизвестно никому, в том числе отправителю и получателю. Поэтому Алиса может спокойно телепортировать свое сообщение Виктору, который затем телепортирует его Бобу. Если Виктор четко следует протоколу квантовой телепортации, то он ничего не узнает про само сообщение. Более того, Алиса и Боб могут убедиться, что процесс прошел нормально и что Виктор действовал по правилам, применив необходимый протокол квантовой криптографии. Даже на уровне целой телепортационной сети Алиса и Боб могут гарантировать конфиденциальность их общения, даже если между ними есть промежуточные узлы (квантовые повторители, как называют их физики).

## **МОЖНО ЛИ ТЕЛЕПОРТИРОВАТЬ БОЛЬШИЕ ОБЪЕКТЫ?**

Вы бы вошли в квантовый телепорт? На вашем месте я был бы очень осторожен сразу по двум причинам. Начать нужно с того, что те немногие эксперименты по квантовой телепортации, которые уже проведены, продемонстрировали принцип, что само по себе чудесно, но для этого пришлось отбирать те редкие случаи, в которых исходный объект не был потерян. В большинстве из этих демонстраций использовались фотоны, и — как и при демонстрации игры Белла (см. подробности в разделе «Лазейка недостаточной выборки») — большая их часть была потеряна. Физики это хорошо знают и все же считают проведенные демонстрации убедительными. Однако если бы мне пришлось выбирать, я бы не рискнул занять место одного из таких фотонов в эксперименте по телепортации. Если говорить серьезно, в тех нескольких экспериментах, которые проводились на атомах, почти все кандидаты на телепортацию прибыли в место назначения. Однако необходимо уточнить, что в этих экспериментах получатель находился менее чем в одном миллиметре от отправителя.

Но есть и вторая причина для осторожности. Для телепортации объекта макромира понадобится запутать невообразимое количество пар. Но состояние запутанности очень хрупкое. Чтобы сохранить его, необходимо избегать любых источников возмущений, а это означает — любого взаимодействия с окружающей средой. Мы можем надежно изолировать фотоны оптоволокном, а атомы — специальными высоковакуумными ловушками. Но для такой гигантской запутанности, которая понадобится, чтобы телепортировать объект размером с кончик карандаша, сегодня невозможно даже пытаться искать способы избежать возмущений,

и это делает весь процесс телепортации попросту неосуществимым.

Сегодня, даже если бы можно было использовать неограниченные средства, никто не представляет, как преодолеть эту сложность. Она не является всего лишь технической проблемой. Сможем ли мы когда-нибудь передать квантовое состояние вируса? Пока до этого очень далеко. Начнем с того, что сначала нужно узнать, каким вообще может быть квантовое состояние вируса. Может быть, кто-то докажет, что это вообще нереально, или мы докопаемся до какого-нибудь нового принципа физики, который исключит телепортацию объектов привычных нам размеров. Не имею ни малейшего понятия. И в этом неопределенность и красота науки!

## Глава 9

# ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ПРИРОДА НЕЛОКАЛЬНА?

Судя по тому, что мы до сих пор видели, кажется, что природа действительно может рождать нелокальные корреляции. Но ученые не отказываются от своих теорий или концепций просто так. Когда эксперимент приводит к необычным результатам, они подвергают сомнению не только теорию, но и сам эксперимент. Можно ли его воспроизвести? Правильно ли интерпретированы результаты? В нашем случае эксперимент был повторен множество раз во всех вариациях на каждом из континентов. И все же мы увидим: очень трудно быть уверенным, что исключены действительно все возможные альтернативные интерпретации, притом что сегодня научное сообщество вполне убеждено, что фактически природа нелокальна.

В этой главе я расскажу обо всех научных спорах, которые вели ученые, чтобы в итоге прийти к убеждению, что нужно оставить все надежды описать природу через хорошо локализованные и взаимно независимые «элементы

реальности». Любая картина природы, построенная по принципу дома из конструктора Lego, несовместима с нелокальностью, которую мы обнаружили в игре Белла. Читатели, которые уже достаточно убеждены в этом и не хотят продирааться сквозь представленные далее научные споры, могут сразу перейти к главе 10.

## **НЕЛОКАЛЬНОСТЬ ВО ВРЕМЕНА НЬЮТОНА**

Начнем с другого примера. Как мы уже знаем, это не первая в истории встреча физиков с нелокальностью. Великая теория всеобщего тяготения Ньютона тоже была нелокальной. Согласно этой теории, если мы передвинем камень на Луне, это немедленно отразится на нашем весе на Земле. Этот мгновенный, невзирая на расстояние, эффект явно нелокален. Но, в отличие от квантовой нелокальности, этот нелокальный эффект может использоваться для коммуникации без передачи информации на произвольно высоких скоростях. Вы можете спросить: как же физики принимали эту теорию на протяжении веков? Правда в том, что они ее так никогда и не приняли. Собственная реакция Ньютона говорит обо всем (см. справку 1): «Предполагать, что тяготение [...] может действовать [...] на любом расстоянии [...] это, по-моему, такой абсурд, который немислим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах».

Только после появления работ Лапласа несколькими десятилетиями позже некоторые мыслители подняли теорию Ньютона до положения высшей истины и вывели из нее абсолютную форму детерминизма, практически отождествив с последним науку. Отношение Ньютона к своему детищу было в корне иным, чем у Нильса Бора, духовного отца квантовой механики, который своим настойчивым

утверждением о полноте квантовой теории подмял под себя целое поколение физиков. Доводы Эйнштейна, которые он выдвинул очень быстро, чтобы показать, что квантовая теория нелокальна, Бор пренебрежительно парировал. Кто знает, быть может, именно поэтому какой-нибудь молодой физик не пришел к доказательству Белла еще в 1930-е годы. Но оставим эти догадки и вернемся к делу.

Сегодня ньютоновская нелокальность исчезла из теоретической физики. Общая теория относительности Эйнштейна заменила ньютоновскую, и сегодня последнюю можно считать лишь очень хорошей аппроксимацией. Согласно современной теории, перемещение камня на Луне действительно повлияет на наш вес, но лишь через секунду с лишним — то есть через время, необходимое для прохождения сигнала со скоростью света от Луны к Земле.

Напоминание о ньютоновской нелокальности уместно здесь по двум очень разным причинам. С одной стороны, кто-то может задать вопрос, не является ли точно так же квантовая нелокальность лишь временной концепцией, так что в будущем ее заменит другая теория, которая докажет, что корреляции, благодаря которым мы выигрываем в игре Белла, могут иметь локальное в пространстве и времени объяснение и что квантовая теория — это просто хорошее приближение. На этот вопрос можно смело дать отрицательный ответ. Мы видели, что аргументация Белла не опирается на квантовую теорию и дает нам возможность проверить нелокальность непосредственно. И раз мы выигрываем в игру Белла, природу нельзя полностью описать локальной теорией, какой бы она ни была.

С другой стороны, удивительно осознавать, что физика почти всегда давала нам нелокальное описание мироздания. Мы жили с ньютоновской нелокальностью вплоть до 1915 года — и с квантовой нелокальностью начиная

с 1927 года. Следовательно, физика всегда была нелокальной, за исключением этого небольшого отрезка в двенадцать лет!

Удивительно, но даже сегодня многие физики неохотно принимают нелокальность. Эйнштейн ожидаемо был бы одним из самых ревностных ее критиков. Ведь именно он спустя несколько столетий сумел наконец дать ответ на вопрос Ньютона и вернул физику в русло локальности. И то, что уже через двенадцать лет другая теория опять впустила нелокальность в самую суть физики, было для него невыносимым ударом. Какая жалость, что в 1930–1940-е годы никому в голову не пришла блестящая идея, которая позже озарила Белла. Хотел бы я посмотреть на реакцию Эйнштейна!

## **ЛАЗЕЙКА НЕДОСТАТОЧНОЙ ВЫБОРКИ**

В игре Белла каждый раз, когда джойстик передвинут в положение «влево» или «вправо», прибор выдает результат. Но в реальном эксперименте такого рода фотон иногда теряется<sup>1</sup> или не попадает на детекторы, и в этом случае результат не фиксируется. Физики очень хорошо понимают, почему некоторые фотоны теряются и чем ограничена эффективность детекторов элементарных частиц. Тем не менее имеет место различие между теоретической игрой и исходом реального эксперимента.

На практике физики рассматривают только те случаи, когда оба прибора (Алисы и Боба) произвели некий результат, а остальные случаи просто игнорируют. Они полагают,

---

<sup>1</sup> В принципе факт потери фотона не особенно важен, если только мы знаем об этом до того, как задать ему вопрос, то есть до смещения джойстика влево или вправо. В противном случае фотон может решить как-нибудь потеряться всякий раз, когда он находит вопрос неудобным.

что та выборка, которую им таким способом удастся получить, с достаточной достоверностью представляют полную совокупность частиц, и подкрепляют это убеждение мыслью о том, что природа не жульничает, другими словами, не подсовывает нам смещенную выборку. Звучит убедительно, но так как это всего лишь допущение, мы должны учитывать, что здесь может прятаться какой-то способ уйти от нелокальности.

Представим, что приборы Алисы и Боба работают по следующей схеме. Ровно в девять утра каждый из них выдает результат только в том случае, если джойстик сдвинут влево (входной сигнал 0), и в этом случае оба результата равны 0. Если джойстик одного из приборов был смещен вправо, этот прибор просто не отвечает. В следующую минуту приборы выдают результат только в том случае, если джойстик наклонен вправо (входной сигнал 1), и в этом случае они дадут ответ 1 для Алисы и 0 для Боба. Так продолжается и дальше, и каждую минуту каждый из приборов отвечает на единственный вопрос и дает predetermined ответ.

Если мы имеем два сговорившихся прибора и если мы рассматриваем только те случаи, когда по счастливой случайности оба прибора сработали и выдали результат, то мы можем выиграть четыре раза из четырех! В самом деле, все происходит так, как будто приборы знают вопросы заранее, поскольку они отвечают только на те вопросы, на которые они готовы (запрограммированы) отвечать. Так как у нас всего два возможных вопроса, то вероятность получить правильный вопрос чисто случайно составляет 50% для каждого из приборов. Поэтому если в нашем эксперименте половина фотонов с каждой стороны потерялась или ускользнула от детекторов, то несложно осуществить стратегию, которая позволит «выигрывать» гораздо чаще, чем три раза из четырех. Можно даже «выиграть» с полной уверенностью. Здесь

я ставлю «выиграть» в кавычки, потому что мы все-таки жульничаем. Приборы отвечают не всегда.

Возможно ли, что какие-то дополнительные локальные переменные «программируют» фотоны так, что те игнорируют определенные вопросы, то есть не оставляют следов на детекторах? Большинство физиков смотрит на эту гипотезу с крайним скепсисом. Они считают, что очень хорошо понимают, как работают детекторы фотонов. Вдобавок эксперименты проводились с самыми разными типами детекторов: полупроводниковыми, тепловыми и прочими. Но если размышлять о гипотезе дополнительных переменных серьезно, то нет причин полагать, что эти переменные никак не могут влиять на вероятность фиксации частицы детектором. Здесь лучший ответ снова дает эксперимент, но ни в одном эксперименте нам не добиться стопроцентной эффективности детекторов. Одна из стратегий, позволяющая обойти эту трудность, — это принять за правило, что если физическое устройство не дает ответа, то мы считаем это ответом 0. Тогда мы будем получать ответ всякий раз, но нули будут составлять большинство.

Можно показать, что с такой стратегией в игре Белла достаточно обнаружить 82,8% фотонов, чтобы исключить любое объяснение, основанное на существовании дополнительных переменных (см. справку 10). Однако 82,8% — это слишком высокий показатель при существующих технологиях. К счастью, в игре Белла можно работать не только с фотонами. Две группы физиков из США использовали в экспериментах ионы (атомы, потерявшие один или несколько электронов) и победили в игре Белла с достаточным запасом, чтобы прикрыть эту лазейку<sup>1</sup>. Чтобы справиться с ней,

---

<sup>1</sup> M.A. Rowe, et al.: *Experimental violation of Bell's inequalities with efficient detection*, **149**, 791–794 (2001); D.N. Matsukevich, et al.: *Bell inequality violation with two remote atomic qubits*, *Phys. Rev. Lett.* **100**,

понадобилось более двадцати лет, что наглядно иллюстрирует технические трудности, с которыми нам пришлось столкнуться в этих экспериментах.

**СПРАВКА 10. Лазейка недостаточной выборки.** Пусть  $p$  — вероятность, что прибор Алисы даст результат. Предположим также, что прибор Боба дает результат с такой же вероятностью. Следовательно, оба прибора дают результат в некое заданное время с вероятностью  $p^2$ . В этом случае Алиса и Боб выигрывают  $2 + \sqrt{2} = 3,41$  раза из четырех. Вероятность того, что результат в заданное время не будет получен, равна  $(1 - p)^2$ . В этом случае Алиса и Боб считают это за результат 0 и, следовательно, выигрывают 3 раза из 4. Наконец, если только один из приборов выдает результат в заданное время, вероятность выражается как  $2p(1 - p)$ , а Алиса и Боб выигрывают в половине случаев, то есть 2 раза из 4. Следовательно, в среднем результат игры можно выразить так:

$$p^2(2 + \sqrt{2}) + 2p(1 - p) \times 2 + (1 - p)^2 \times 3,$$

что даст значение больше 3 в том и только том случае, если  $p$  больше, чем

$$\frac{2}{1 + \sqrt{2}} = 82,8\%.$$

---

150404 (2008). Недавно также проведены эксперименты с фотонами: M. Giustina, A. Mech, S. Ramelow, B. Wittmann, J. Kofler, J. Beyer, A. Lita, B. Calkins, T. Gerrits, S. W. Nam, R. Ursin, A. Zeilinger: *Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption*, Nature **497**, 227 (2013); B. G. Christensen, K. T. McCusker, J. B. Altepeter, B. Calkins, T. Gerrits, A. E. Lita, A. Miller, L. K. Shalm, Y. Zhang, S. W. Nam, N. Brunner, C. C. W. Lim, N. Gisin, P. G. Kwiat: *Detection-loophole-free test of quantum nonlocality, and applications*, Phys. Rev. Lett. **111**, 130406 (2013).

## ЛАЗЕЙКА НЕДОСТАТОЧНОГО РАССТОЯНИЯ

Другая серьезная проблема при любой демонстрации игры Белла — это необходимость строгой синхронизации. Прибор Алисы должен выдать свой результат  $a$  до того момента, когда информация о выборе Боба могла бы достичь его любым образом — преднамеренно или случайно, явно или скрытно. Теория относительности утверждает, что никакой сигнал не может распространяться быстрее скорости света. Поэтому время, прошедшее от момента, когда Боб сделал свой выбор  $u$ , до момента, когда прибор Алисы выдал результат  $a$ , не должно превышать время, которое нужно свету, чтобы покрыть расстояние между ними. И наоборот: нельзя, чтобы информация о выборе Алисы смогла достичь прибора Боба до того, как тот выдаст свой результат  $b$ . При невыполнении этого условия открывается лазейка недостаточного расстояния, то есть с точки зрения теории относительности Алиса и Боб становятся «локально связанными»<sup>1</sup>.

Для того чтобы закрыть эту лазейку, мы должны играть и выигрывать больше, чем три раза из четырех, гарантировав удаленность Алисы и Боба на достаточное расстояние друг от друга, и при этом точно синхронизировать их действия. Говоря научно, они должны быть разделены пространственноподобным интервалом. Заметим, что это расстояние должно учитывать весь интервал времени в месте нахождения Алисы от момента, когда сделан выбор  $x$ , до момента, когда зафиксирован результат  $a$  ( $x$  и  $a$  — это классические переменные, не подверженные квантовой неопределенности).

---

<sup>1</sup> Те, кого беспокоит теория относительности, могут найти полезным следующий довод: если световой сигнал не может связать два события в одной инерциальной системе отсчета, то он не сможет сделать это и ни в какой иной системе отсчета, а потому данная концепция от системы отсчета не зависит.

И весь этот интервал должен быть отделен в указанном смысле от соответствующего интервала для Боба.

Для иллюстрации технической сложности представим себе, что расстояние между Алисой и Бобом — около десяти метров, как в описанном ниже знаменитом эксперименте Алена Аспе. Свет преодолевает это расстояние примерно за 30 пикосекунд (миллиардных долей секунды). Очевидно, что за такое время очень трудно принять решение, выполнить измерение (в нашем примере — сдвинуть джойстик) и записать результат. Принятие решения, не говоря уже о манипуляции джойстиком, не составляет проблемы, но даже для современного оптоэлектронного оборудования расстояние в десять метров слишком мало. Необходимы сотни метров, а лучше несколько километров. Или нужно быть столь же сообразительным, каковы физики.

Прежде чем мы узнаем, как Алэн Аспе и его группа справились с этой сложностью, хочется обратить ваше внимание на то, что в значительном большинстве экспериментов Белла (физики не называют это игрой Белла, для них это звучит недостаточно серьезно) лазейке недостаточного расстояния уделяется мало внимания. Во-первых, с ней исключительно трудно справиться, а во-вторых, и это основная причина, ученым, которые проводят эти эксперименты, прекрасно известно, что совсем не обязательно рассказывать студентов на экзамене на значительное пространственноподобное расстояние, и это верно и для приборов Алисы и Боба в игре Белла. Достаточно исключить возможные способы их взаимного влияния.

Чтобы решить проблему ограниченного пространства в лаборатории длиной всего около 10 м, Алэн Аспе придумал следующий план. Как только фотоны покидают источник, они случайным образом направляются на одно или второе измерительное устройство при помощи своего рода

вибрирующего зеркала. Каждое устройство всегда выполняет одно и то же измерение (делает один и тот же выбор), но так как устройства два, то в тот момент, когда фотоны покидают источник и разлетаются в пространстве, они не могут знать, на какое устройство попадут, а поэтому не знают, на какой вопрос придется отвечать. Теперь осталось лишь гарантировать, что два зеркала — одно со стороны Алисы и другое со стороны Боба — действительно вибрируют независимо и с достаточно высокой частотой, чтобы информация о положении одного из них не могла повлиять на результат на другой стороне.

Благодаря этому фокусу Аспе с коллегами удалось закрыть лазейку недостаточного расстояния в 1982 году<sup>1</sup>. Этот опыт, проведенный в Орсе, к югу от Парижа, останется важной вехой в истории физики. С того времени было придумано еще несколько экспериментов, также закрывающих эту лазейку. В 1998 году Антон Цайлингер, работавший тогда в Университете Инсбрука в Австрии, провел весьма элегантный эксперимент с устройствами, удаленными друг от друга на несколько сотен метров<sup>2</sup>. В этом эксперименте использовались два квантовых генератора случайных чисел, чтобы производить выбор за Алису и Боба, а результаты сохранялись локально в двух компьютерах. Для каждого события компьютеры регистрировали время, выбор и результат. У экспериментаторов получилось выиграть 3,365 раза из 4.

В Женеве нам также удалось закрыть эту лазейку, используя оптоволоконную сеть национального оператора

---

<sup>1</sup> Aspect A., Dalibard J., Roger G.: *Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Phys. Rev. Lett. **49**, 91–94 (1982).

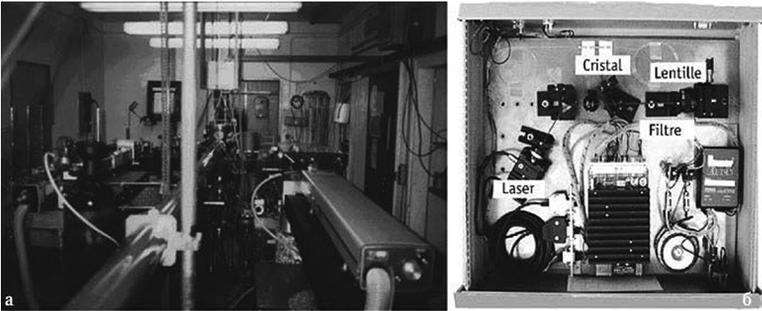
<sup>2</sup> Weihs G., Jenness T., Simon C., Weinfurter H., Zeilinger A.: *Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions*, Phys. Rev. Lett. **81**, 5039 (1998).

Swisscom, что дало нам возможность работать на расстоянии свыше 10 км. Эксперимент проводился между деревнями Белльвю к северу от Женевы и Берне к югу от нее<sup>1</sup>. Наш фокус немного отличался от того, что использовал Аспе<sup>2</sup>. Полупрозрачное зеркало на стороне Алисы в случайной очередности отправляло фотоны либо на одно измерительное устройство, соответствующее левому положению джойстика, либо на другое, соответствующее правому положению джойстика, причем в каждый момент времени были активны детекторы только одного из этих двух устройств. Таким образом, в каждый момент времени только одно устройство на стороне Алисы было готово измерить попадающий в него фотон. Совершенно понятно, что мы теряли половину фотонов, а значит, открывали лазейку недостаточной выборки, но она уже была широко открыта из-за потерь в оптоволокне и ограниченной чувствительности детекторов. Фактически наш опыт был эквивалентен проведенным в Париже и Инсбруке, только его было гораздо проще осуществить. На рис. 9.1б показан наш генератор запутанных пар фотонов. Обратите внимание, что этот маленький ящик, совместимый со стандартными оптоволоконными кабелями, содержит эквивалент всей лаборатории Аспе, фотографию которой вы видите на рис. 9.1а. Технический прогресс и изобретательность физиков привели за 15 лет к заметному прогрессу!

---

<sup>1</sup> Tittel W., Brendel J., Zbinden H., Gisin N.: *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, art. cit.; Tittel W., Brendel J., Gisin N., Zbinden H.: *Long-distance Bell-type tests using energy-time entangled photons*, Phys. Rev. A **59**, 4150 (1999).

<sup>2</sup> Gisin N., Zbinden H.: *Bell inequality and the locality loophole. Active versus passive switches*, Phys. Lett. A **264**, 103–107 (1999).



**Рис. 9.1.** Две части этого рисунка иллюстрируют невероятный прогресс квантовых технологий:

а) лаборатория Алена Аспе в 1982 году, когда он стал первым, кто победил в игре Белла. Большое помещение заполнено громоздким оборудованием для генерации запутанных фотонов, необходимых для этого исторического эксперимента;

б) источник, который мы использовали в 1997 году в Женеве для первого эксперимента со запутанностью за пределами лаборатории между деревнями Берне и Белльвю. Эта полупустая коробочка со стороной около тридцати сантиметров содержит более эффективный генератор запутанных фотонов, чем использовал Аспе. Эти эксперименты разделяет всего 15 лет

## СОЧЕТАНИЯ ЛАЗЕЕК

Эксперимент Аспе в 1982 году, за которым последовали эксперименты в Инсбруке и Женеве, закрыли лазейку локальности. Конечно же, лазейка недостаточной выборки в этих трех экспериментах была широко распахнута, а в тех экспериментах, которые прикрывали ее, оставалась открытой лазейка недостаточного расстояния. Логически возможно, что природа выбирает одну из двух лазеек в зависимости от обстоятельств, чтобы сбить нас со следа. Однако это звучит настолько неправдоподобно, что сегодня ни один ученый в это не верит. Скорее ученые воспринимают природу

как надежного и заслуживающего доверия партнера. Природа не жульничает. Как говорил Эйнштейн, «Бог изощрен, но не злонамерен». С другой стороны, ситуация становится не столь очевидной, когда мы сталкиваемся с выбором между нелокальным мирозданием и другим, подчиняющимся неким сложным законам, которые пока ускользают от нас, но разрешают природе использовать обе лазейки одновременно: и недостаточное расстояние, и недостаточную выборку. А так как речь идет об экспериментальной науке, то мы обязаны принять этот вызов и поставить эксперимент, в котором мы сможем проверить обе лазейки.

Такой эксперимент пока не проводился по причине исключительной сложности. Чтобы закрыть лазейку недостаточной выборки, больше подходят массивные частицы, ведь их легче поймать, чем фотоны, а для лазейки недостаточного расстояния предпочтительны фотоны, так как они лучше распространяются на большие расстояния. Видимо, нам нужно дождаться более совершенной технологии, при помощи которой мы сможем сначала использовать запутанные фотоны для переноса запутанности на большие расстояния, а затем телепортировать эту запутанность на атомы — в первую очередь, чтобы проверить, что фотоны действительно прибыли в место назначения, но для того, чтобы надежно их зафиксировать. Очень вероятно, что такая увлекательная возможность станет реальностью в ближайшие три года.

Но пока факты таковы, что логически возможная комбинация ловушек все еще остается, и ее нужно проверить.

## **СКРЫТАЯ СВЕРХСВЕТОВАЯ КОММУНИКАЦИЯ**

Есть ли другой выход? Вопрос сложный, потому что всегда есть риск продемонстрировать недостаток воображения. В то же время мы видим, что физики, философы, математики

и специалисты по теории информации пытались ответить на этот вопрос в течение десятилетий, но так и не нашли подходящую альтернативу. Тем не менее в оставшейся части этой главы мы рассмотрим некоторые возможности.

Первое, что приходит на ум, — это какое-то скрытое воздействие, скрытое от глаз физиков начала XXI века, которое распространяется от Алисы до Боба со скоростью выше световой. Удивительно, но именно так учебники по нерелятивистской физике объясняют эксперименты Белла: утверждается, что измерение, сделанное Алисой, должно повлечь нелокальный коллапс волновой функции на стороне Боба. Такое объяснение противоречит теории относительности, но пока не нашлось ничего лучше, именно так мы учим наших студентов!

Кстати сказать, Джон Белл допускал скрытое взаимодействие, говоря, что все происходит так, как будто «имеет место что-то вроде заговора — нечто тайное происходит за кулисами, но ему не позволено появиться на сцене»<sup>1</sup>.

Сверхсветовая скорость может быть определена только в том случае, если мы решим указывать ее относительно некоей особой, привилегированной инерциальной системы отсчета. Напомним, что инерциальная система отсчета — это выбор пространственных осей координат, движущихся с постоянной скоростью.

Предположение о том, что существует привилегированная система отсчета, идет вразрез с духом теории относительности, и поэтому большинство физиков считают ее богохульной. Однако гипотеза о привилегированной системе отсчета на самом деле не противоречит теории относительности. Вспомним, что современная космология

---

<sup>1</sup> P.C.W.Davies, J.R. Brown (Eds): *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press (1986), pp. 48–50.

оперирует именно с такой системой отсчета, определяя ее после Большого взрыва и связывая с центром массы Вселенной. Физики смогли измерить ее с исключительной точностью — это та система, в которой микроволновой фоновый шум (реликтовое излучение, рудимент Большого Взрыва, по сей день заполняющее Вселенную) изотропен. Относительно этой системы отсчета Земля движется<sup>1</sup> со скоростью около 369 км/с. Направление движения Земли также хорошо определено.

Поэтому не нужно сразу отбрасывать гипотезу об особой инерциальной системе отсчета, в которой «воздействие» может распространяться быстрее скорости света. Но смогла бы она дать некое объяснение нелокальным корреляциям? Если да, то эти корреляции сразу перестали бы быть нелокальными, ведь им было бы найдено локальное объяснение, а именно: механизм распространения последовательно из точки в точку пространства. Но как нам проверить эту гипотезу, если неизвестно, что это за гипотетическая особая система отсчета? Основная идея эксперимента будет такой же, как для лазерки недостаточного расстояния: Алиса и Боб должны принять решения и собрать результаты одновременно в такой степени, чтобы никакое гипотетическое влияние не могло успеть прибыть. Для этого нужно либо увеличить расстояние, либо улучшить синхронизацию. Сложность в том, что нужно указать систему отсчета, в которой действия Алисы и Боба должны быть синхронны, потому что, согласно теории относительности, если они синхронны в одной системе отсчета, существуют другие, в которых они совсем не синхронны. При скоростях меньших или равных скорости света эта проблема исчезает, так

---

<sup>1</sup> Lineweaver C., et al.: *The dipole observed in the COBE DMR 4 year data*, *Astrophys. J.* 38, 470 (1996), <http://pdg.lbl.gov>.

как если синхронизация такова, что свет не успевает дойти в одной системе отсчета, то он не успеет дойти ни в какой другой. Но для более высоких скоростей нам нужно определить систему отсчета, в которой нужно синхронизироваться Алисе и Бобу.

Швейцарский физик Филипп Эберхард, работающий в Национальной лаборатории имени Лоуренса вблизи Беркли, в Соединенных Штатах, придумал блестящий способ тестирования всех возможных гипотетических систем отсчета сразу. Его идея обескураживающе проста. Любопытный читатель найдет ее краткое изложение в справке 11. Скажем просто, что этот способ использует вращение Земли за 24 часа и требует, чтобы Алиса и Боб располагались вдоль оси восток — запад.

Такой эксперимент был проведен моей группой между двумя деревнями, лежащими в восемнадцати километрах друг от друга: Сатиньи к западу и Жюсси к востоку от Женевы. Эксперимент длился двенадцать часов, то есть то время, которое требуется Земле для полуоборота, и был повторен четыре раза<sup>1</sup>. Похожий эксперимент провела итальянская группа<sup>2</sup>. Интерпретация результатов этих экспериментов несколько осложнена, потому что она зависит от скорости Земли относительно гипотетической привилегированной системы отсчета, а эта скорость нам, конечно неизвестна. Если принять, что эта скорость ниже чем скорость Земли относительно центра масс Вселенной, то эксперимент исключает любое взаимодействие на скоростях вплоть до пятидесяти тысяч скоростей света. Это уже

---

<sup>1</sup> Salart Subils D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H.: *Testing the speed of “spooky action at a distance”*, Nature **454**, 861–864 (2008).

<sup>2</sup> Cocciaro B., Faetti S., Fronzoni L.: *A lower bound for the velocity of quantum communications in the preferred frame*, Phys. Lett. A **375**, 379–384 (2011).

совершенно колоссальная скорость, намного больше, чем большинство из нас может себе представить, и физики заключили, что такого взаимодействия не может быть. Поэтому представляется, что не существует никакого «призрачного действия на расстоянии», если цитировать знаменитый комментарий Эйнштейна. Повторюсь: кажется, что нелокальные корреляции проникают в наше пространство-время откуда-то извне.

Но скорости, в пятьдесят тысяч раз большей, чем скорость света, может быть не достаточно. Возможно, нам придется повторять эксперимент с большей точностью, чтобы исключить и скорости в миллион раз выше скорости света. Вспомним, что скорость света выше, чем скорость звука в воздухе, примерно в миллион раз (340 м/с против почти 300 000 км/с), так почему следующий рубеж скорости не может быть также в миллион раз выше?

**СПРАВКА 11. Эксперимент Сатиньи–Жюсси.** Представим себе, что Алиса и Боб расположились на оси «восток — запад» и что их измерения одновременны согласно их часам, то есть они одновременны относительно системы отсчета, двигающейся вместе с Женевой. Так как Земля вращается вокруг своей оси, женевская система отсчета все время изменяется, но эти изменения очень медленны и пренебрежимо малы за время, затраченное на измерение. Согласно теории относительности, в этом случае измерения Алисы и Боба также одновременны относительно любой инерциальной системы отсчета, двигающейся в направлении, перпендикулярном к оси Алиса — Боб. То есть относительно любой системы отсчета, которая движется в плоскости, проходящей через Северный и Южный полюса. За двенадцать часов, пока Земля делает половину оборота вокруг своей оси, эта плоскость также сделает полуоборот и покроет все

пространство. Поэтому если Алиса и Боб будут играть в игру Белла в течение двенадцати часов и если такая привилегированная система отсчета существует, то в какой-то момент времени их измерения окажутся в точности одновременны относительно этой особой системы отсчета. И если Алиса и Боб продолжат выигрывать более, чем три раза из четырех, то объяснение через сверхсветовую коммуникацию, отнесенную к особой системе отсчета, будет фальсифицировано. На практике нельзя добиться точной синхронизации, так как при проведении оси «восток — запад» будет допущена некоторая ошибка, да и временем, необходимым для проведения эксперимента Белла, нельзя совершенно пренебречь. Поэтому такие эксперименты могут лишь установить нижний предел скорости для гипотетического сверхсветового действия.

Мы можем также рассмотреть воздействие, способное распространяться на бесконечной скорости, опять же определенной относительно какой-то привилегированной системы отсчета. Математически это возможно, что и показал Дэвид Бом в 1952 году<sup>1</sup> (в год моего рождения). Однако эта гипотеза предполагает, что воздействия могут мгновенно соединять произвольные области пространства. Но тогда что такое пространство, если воздействия могут мгновенно соединять произвольные удаленные друг от друга области? В известном смысле принять такие воздействия как объяснение нелокальных корреляций — все равно что признать, что на самом деле они распространяются не в нашем пространстве, а следуют какому-то «черному ходу» нулевой длины вне его. Объяснительная сила такой гипотезы

---

<sup>1</sup> Bohm D.: A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, *Phys. Rev.* **85**, 2 (1952).

кажется мне слабой<sup>1</sup>. Немногие физики интересуются этой альтернативой, но нужно сказать, что ей сочувствуют многие философы.

Некоторые теоретики пытаются обойти сложность экспериментов, которые могут лишь установить нижнюю границу скорости этих гипотетических воздействий, показывая, что при определенных допущениях любое скрытое сверхсветовое воздействие должно с необходимостью приводить к возможности коммуникации со скоростью выше скорости света<sup>2</sup>. Так как это запрещено теорией относительности, мы можем сделать вывод, что скрытого воздействия не существует ни на каких скоростях. Нужна насыщенная программа исследований, чтобы раз и навсегда исключить любую гипотезу о скрытых воздействиях на сверхсветовых скоростях. По счастливому совпадению, во время написания этой книги группа теоретиков смогла исключить все объяснения нелокальности, которые ссылаются на воздействия, распространяющиеся на любой конечной скорости (см. главу 10).

---

<sup>1</sup> Чтобы избежать коммуникации без передачи, модель Бом предлагает, что определенные переменные всегда остаются недоступными нам. Но переменные, недоступные нам всегда в силу своей природы, не являются физическими. Интересно отметить, что сам Бом писал: «Вполне возможно, что эти квантовые нелокальные связи могут распространяться не на бесконечной скорости, но на скорости много большей, чем скорость света. В этом случае мы можем ожидать наблюдаемых отклонений от предсказаний современной квантовой теории (например, в расширенном варианте эксперимента Аспе)». См.: D. Bohm and B.J. Hiley, *The Undivided Universe*, Routledge, London and NY 1993 (с. 347 в дешевом издании).

<sup>2</sup> Scarani V., Gisin N.: *Superluminal hidden communication as the underlying mechanism for quantum correlations. Constraining models*, Brazilian Journal of Physics **35**, 328–332 (2005); Bancal J.D., Pironio S., Acin A., Liang Y.C., Scarani V., Gisin N.: *Quantum nonlocality based on finite-speed causal influences leads to superluminal signaling*, Nature Physics **8**, 867 (2012).

## **АЛИСА И БОБ ПРОВОДЯТ ИЗМЕРЕНИЯ РАНЬШЕ ДРУГ ДРУГА**

Я хотел бы вкратце обсудить другую идею, которая демонстрирует, как физики пытались придумать способы уйти от принятия нелокальности. Согласно этой гипотезе, выдвинутой Антуаном Суарезом и Валерио Скарани<sup>1</sup>, когда прибор Алисы выдает результат, он дает информацию об этом всей Вселенной, и в частности прибору Боба, на сверхсветовой скорости. И наоборот. То есть первый из них, который выдал результат, информирует второго, который затем учитывает это, чтобы выиграть игру Белла. Но, согласно этой гипотезе, сверхсветовая скорость определена не относительно какой-то универсальной привилегированной системы отсчета, а лишь относительно той системы, в которой генерирующий прибор находится в покое. В самом деле, каждый прибор, и в частности каждая часть измерительного аппарата, определяет некоторую инерционную систему таким образом, и было бы интересно изучить следствия той идеи, что эти системы могут определять скорость информации, которую они испускают.

На вид эту гипотезу проверить трудно, и в 1997 году, когда Суарес и Скарани выдвинули ее, она не противоречила ни одному из экспериментов, которые были проведены к тому времени. Но представьте себе такую ситуацию. Алиса и Боб со своими приборами удаляются друг от друга в разные стороны на очень высокой скорости, и поэтому система отсчета, в которой покоится прибор Алисы, отличается от системы, в которой неподвижен прибор Боба. Вспомним, что, согласно теории гравитации Эйнштейна, хронология, или порядок следования двух событий, наблюдаемых

---

<sup>1</sup> Suarez A., Scarani V.: Does entanglement depend on the timing of the impacts at the beam-splitters?, Phys. Lett. A **232**, 9 (1997).

из движущихся относительно друг друга систем отсчета, может быть разной. То есть мы можем построить эксперимент таким образом, что Алиса в своей системе отсчета делает выбор и фиксирует результат до Боба, и в том же самом эксперименте Боб в своей системе отсчета делает выбор и фиксирует результат до Алисы. Физики описывают этот эксперимент словами «до — до», так как каждый из двух игроков действует раньше другого! Так магия теории относительности может быть использована для проверки магии квантовой теории.

Основная сложность проведения эксперимента типа «до — до» — это добиться того, чтобы приборы Алисы и Боба двигались достаточно быстро и в самом деле обеспечили обращение хронологического порядка событий в обеих системах. Это действительно трудно, но не невозможно, по крайней мере если применить немного воображения. Конечно, не совсем реально поместить всю лабораторию Алисы в космический корабль. Однако должно быть достаточно привести в движение ее основной компонент, в котором происходит истинно случайное событие. В первом эксперименте в Женеве<sup>1</sup> мы установили детектор на особого рода диске, который вращался со скоростью 10000 оборотов в минуту, что соответствовало линейной скорости на краю диска в 380 км/ч или около 100 м/с<sup>2</sup>. Такая скорость не выглядит большой, ведь свет распространяется со скоростью почти 300000 км/с. Однако, если Алиса и Боб разделены

---

<sup>1</sup> Этот эксперимент был профинансирован Психофизическим фондом Марселя и Моник Одье. Марсель, хотя и имеет степень по физике и является доктором математики, одновременно представляет уже пятое поколение в частном банке своей семьи.

<sup>2</sup> Stefanov A., Zbinden H., Gisin N., Suarez A.: *Quantum correlation with moving beamsplitters in relativistic configuration*, Pramana (Journal of Physics) **53**, 1–8 (1999); Gisin N., Scarani V., Tittel W., Zbinden H.: *Quantum nonlocality: From EPR-Bell tests towards experiments with moving observers*, Annalen der Physik **9**, 831–842 (2000).

расстоянием свыше 10 км, при хорошей синхронизации уже можно добиться релятивистского эффекта «до — до». Этот эксперимент опроверг гипотезу Суареса и Скарани, хотя в нем и было слабое место: ведь на диске был установлен не настоящий детектор, а лишь поглотитель, в то время как информация о том, был поглощен фотон или нет, эквивалентная результату Алисы, считывалась другим детектором, расположенным на выходе другого интерферометра.

Антуан Суарес, который внимательно следил за нашим экспериментом, немедленно заметил, что в движении должен быть не детектор, а последний светоделитель интерферометра. Для Суареса именно это зеркало было тем местом, где делался окончательный выбор, то есть тем компонентом, в котором окончательно принимается решение, влекущее результат (истинно случайным образом, как вы теперь понимаете). Но как сделать, чтобы светоделитель двигался настолько быстро? Однако моему коллеге Гюго Збиндену не понадобилось много времени на ответ, и он предложил: «Давайте использовать акустическую волну, которая распространяется в кристалле». Поскольку такая волна распространяется со скоростью около 2,5 км/с, мы могли провести эксперимент в лаборатории. И квантовая теория была вновь подтверждена<sup>1</sup>: даже сдвигающимися зеркалами Алиса и Боб выигрывали чаще, чем 3 раза из 4. Через несколько трудных дней Антуан Суарес принял этот результат. Несмотря на то что их теория была опровергнута, они могли гордиться собой как авторами вполне разумной научной теории.

---

<sup>1</sup> Когда Суарес узнал о нашем результате, он немедленно примчался в Женеву и увидел, что студент организовал эксперимент «с точностью до наоборот»: зеркала двигались навстречу друг другу, а не удалялись друг от друга! И ведь никто из нас этого не заметил — какой позор! Мы исправили схему и повторили эксперимент, но результат остался тем же.

## СВЕРХДЕТЕРМИНИЗМ И СВОБОДНАЯ ВОЛЯ

Какие же еще пути остается открыть? Одна довольно отчаянная гипотеза отрицает, что Алиса и Боб могут свободного выбирать направление отклонения джойстика. По сути, это означает отрицание существования свободной воли. Если Алиса действительно не делает свободный выбор, а запрограммирована наклонять джойстик в некотором определенном направлении, то мы можем представить, что Боб или его прибор уже знает выбор Алисы. В этом случае мы также можем предположить, что результаты Алисы предопределены и Боб, который знает об этом, легко побеждает в игре Белла. Заметьте, что он может выиграть с полной гарантией — даже чаще, чем это позволила бы квантовая физика<sup>1</sup>.

Но что за странное предложение — отрицать существование свободной воли! Неужели идея нелокальности настолько шокирует нас, что мы станем отрицать одну из вещей, столь хорошо нам знакомых? Мы можем заниматься самообразованием, узнавая математику, химию, физику и множество других предметов, но мы никогда не будем знать ни одного уравнения, ни один исторический факт или даже простейшую химическую реакцию так же хорошо, как то, что говорит нам личный опыт. По моему мнению, это не что иное, как серьезная гносеологическая ошибка.

Если бы не было свободной воли, мы никогда не решились бы проверить научную теорию. Мы могли бы жить в мире, где объекты умеют летать, но были бы

---

<sup>1</sup> Более того, такой серьезный заговор потребовал бы исключительно тонкой настройки, чтобы свободные на вид решения Алисы и Боба коррелировали как раз таким правильным способом, чтобы «выиграть» игру Белла.

запрограммированы смотреть на них только тогда, когда они падают. Должен признаться, у меня нет доказательства, что у вас есть свобода воли, но я определенно наслаждаюсь ею, и у вас не получится меня переубедить. Такого рода дискуссии часто ходят по кругу. Это логически возможно, но совсем неинтересно, как солипсизм, который утверждает, что я единственный человек в мире, а все остальные — это лишь иллюзии, населяющие мое сознание.

Эта гипотеза сверхдетерминизма вряд ли достойна упоминания и приводится здесь лишь для того, чтобы показать степень отчаяния, до которой многие из физиков и даже из специалистов по квантовой механике доходят в попытках объяснить истинную случайность и нелокальность квантовой физики. Для меня ситуация проста: свободная воля не просто существует, но и является неизменным условием для науки, философии и самой возможности человека думать рационально и здраво. Без свободы воли не было бы рационального мышления. Как следствие, наука и философия просто не могут отрицать свободу воли. Некоторые физические теории детерминистичны, примерами чего являются механика Ньютона или некоторые интерпретации квантовой теории. Но возвышение этих теорий до статуса непререкаемой истины, почти религиозной догмы, по существу, является логической ошибкой, так как они противоречат нашему восприятию свободы воли. Заметим, что Ньютон никогда не заявлял, что его теория способна объяснить все на свете (и это вовсе не потому, что он не хотел славы!). Совсем наоборот. Он ясно утверждал, что его теория гравитации с допущением о нелокальном притяжении на расстоянии абсурдна, но за неимением лучшей, по крайней мере, может использоваться для расчетов. Теория Ньютона получила свой квазирелигиозный

статус благодаря Лапласу, когда он сделал свое знаменитое заявление<sup>1</sup>:

Разум, которому в каждый определённый момент времени были бы известны все силы, приводящие природу в движение, и положение всех тел, из которых она состоит, будь он также достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, смог бы объять единым законом движение величайших тел Вселенной и мельчайшего атома; для такого разума ничего не было бы неясного, и будущее существовало бы в его глазах точно так же, как прошлое.

История квантовой механики сложилась иначе. Ее основатель Нильс Бор всегда настаивал на полноте его теории, несмотря на то что никакая научная теория не может быть по-настоящему полной.

Отрицая возможность Алисы делать свободный выбор, мы тем самым отрицаем значение науки. Поэтому оставим эту отчаянную гипотезу на обочине. Это не должно мешать науке двигаться вперед и давать нам лучшее понимание свободной воли, но я остаюсь в убеждении, что наука никогда не исчерпает полностью эту особенную тему. Чтобы не завершать этот раздел на грустной ноте, я переиначу высказывание Ньютона: предполагать, что свободная воля является иллюзией и что человека можно убедить в существовании нелокальных корреляций на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо еще, что может передает действие и силу от одного к другому, — это, по-моему, такой абсурд, который немислим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах.

---

<sup>1</sup> Laplace, P.-S.: *Essai philosophique sur les probabilités*, Bachelier (1814).

## РЕАЛИЗМ

Прежде чем закончить эту главу, рассмотрим другую отчаянную гипотезу, а именно отрицание реализма<sup>1</sup>. Но что это может значить на самом деле и как может помочь нам в наших изысканиях?

До 1990 года было почти невозможно опубликовать работу, которая бы обращалась к нелокальности или даже неравенствам Белла, в каком-либо престижном журнале. Отцы-основатели квантовой физики долго боролись за место под солнцем для своего учения, а последователи ньютоновой физики много лет не давали им спуска. Следующее поколение продолжало борьбу, хотя оппонентов у них было уже очень мало. В итоге все пришли к идее, что дальнейший прогресс невозможен, да и не нужен. Так продолжалось до начала 1990-х, когда проявления запутанности и нелокальности заставили физическое сообщество заново и, главное, непредвзято оценить этот аспект квантовой физики<sup>2</sup>. Однако укоренилась одна особенная привычка, а именно практика систематически писать и говорить о «локальном реализме» вместо «локальных переменных». Я подозреваю, что

---

<sup>1</sup> Для некоторых физиков реализм подразумевает детерминизм. Однако мы видели, что нелокальность подразумевает нередуцируемую случайность. Поэтому нам придется найти какую-то концепцию реализма, которая уживается с истинной случайностью.

<sup>2</sup> Интересно отметить в этом контексте, что первую публикацию по квантовой криптографии отвергли все физические журналы! По этой причине она появилась лишь в трудах научной конференции, состоявшейся в Индии. Для стороннего наблюдателя это может показаться весьма удивительным, но все физики с большим научным опытом знают, что особенно оригинальную идею опубликовать трудно. Автору приходится преодолевать барьер скептицизма в научном сообществе, который в норме служит необходимым фильтром для идей, которые несовместимы с надежно установленными фактами.

это скорее был вопрос обдуманного выбора слов, чем результат глубокого осмысления.

В некоторых кругах и сегодня модно говорить, что мы стоим перед выбором между нелокальностью и нереализмом. Услышав это, мы первым делом должны определить, что имеется в виду под нереализмом (имея в виду, что нелокальность означает «то, что невозможно описать, используя лишь локальные сущности»)<sup>1</sup>. К несчастью, я не могу объяснить вам, что такое нереализм. По моему ощущению, это что-то вроде психологического выхода: те, кто не может принять нелокальность, прячутся в своего рода интеллектуальное убежище, как некоторые швейцарцы готовы исчезнуть в своих ядерных бункерах, как только зазвучат сирены. Это все очень здорово, но однажды им придется вернуться.

Но есть ли какой-то возможный вывод? Кажется, да. Вернемся ненадолго к игре Белла. Выбор Алисы и Боба должен быть реален, как и их результаты. Ученые в областях физики и информатики сказали бы, что на входе и выходе приборов Алисы и Боба — классические переменные, то есть числа (биты), которые можно прочесть, скопировать, запомнить, опубликовать; другими словами, это конкретные сущности, не подлежащие никакой квантовой неопределимости. В последнем разделе мы уже обсуждали гипотезу о том, что свободный выбор (входные данные) могут быть лишь иллюзией. А как насчет результатов, которые производят приборы (выходные данные)? Может ли быть так, что они нереальны? Если эти результаты есть лишь иллюзия ума, мы опять возвращаемся к бессмысленному спору о некой форме солипсизма. Сказав это, однако, мы можем серьезно задуматься о том, когда именно рождаются эти результаты. Чтобы приборы не могли

---

<sup>1</sup> Gisin, N.: Non-realism: *Deep thought or a soft option?*, *Foundations of Physics* 42, 80–85 (2012).

влиять друг на друга, они должны появляться прежде, чем любое возможное воздействие достигнет цели. В принципе, нам лишь нужно поместить два прибора достаточно далеко друг от друга, но на практике это не просто. Дело в том, что квантовая физика довольно смутно определяет конкретный момент, когда рождается результат измерения. Для большинства экспериментаторов результат уже определен в момент, когда фотон, попав на поверхность детектора, проник на глубину нескольких микрон и вызвал лавину электронов. Но как в этом убедиться? Возможно, нужно дождаться последнего усиления сигнала? Или даже настоять на записи результата в память компьютера? Или в человеческую память? От последнего предположения Джон Белл имел обыкновение смеяться в голос и спрашивать, должна ли эта человеческая память принадлежать физике с докторской степенью.

Хотя квантовая физика не говорит нам точно о моменте, когда мы можем быть уверены, что результат уже произведен, это должно происходить чуть позже момента, когда фотон встречает на пути детектор и чуть раньше момента, когда мы об этом узнаем. И вот она, еще одна лазейка, хоть и очень маленькая: возможно, что результат возникает гораздо позже, чем думает экспериментатор, и что, воспользовавшись этим, какая-то неуловимая форма коммуникации обеспечивает связь между приборами Алисы и Боба<sup>1</sup>.

Два физика, Лайош Диоши и Роджер Пенроуз, независимо друг от друга разработали теоретическую модель, которая соотносит продолжительность измерения с гравитационными эффектами<sup>2</sup>. Их модели дают почти один и тот же

---

<sup>1</sup> Franson J.D.: *Bell's theorem and delayed determinism*, Phys. Rev. D 31, 2529–2532 (1985).

<sup>2</sup> Penrose R.: *On gravity's role in quantum state reduction*, General Relativity and Gravitation 28, 581–600 (1996); Diosi L.: *A universal master equation for the gravitational violation of the quantum mechanics*, Phys. Lett. A 120,

прогноз. Чтобы проверить его, Боб должен очень быстро сдвинуть с места какой-нибудь массивный объект, как только его детектор фотонов щелкнул. Недавно мы с моей группой в Университете Женевы проверили эти модели и их применение для игры Белла. Полученные результаты идеально согласуются с квантовой теорией: ни модель Диоши, ни модель Пенроуза не освобождает нас от нелокальности<sup>1</sup>. Похоже, что квантовая нелокальность — это вполне надежная концепция.

## МУЛЬТИВСЕЛЕННАЯ

Последний путь к отступлению, который стал модным в некоторых кругах квантовой физики, объявляет, что никаких результатов измерения просто не существует. Согласно этой гипотезе, каждый раз, когда нам кажется, что мы провели измерение, с числом возможных результатов  $N$ , вселенная делится на  $N$  ветвей, каждая из которых одинаково реальна и содержит в себе один возможный результат из  $N$ . Экспериментатор также делится на  $N$  копий, каждая из которых наблюдает один из  $N$  возможных результатов. Эта интерпретация называется многомировой или мультиверсной, в отличие от той, которая постулирует лишь существование нашей простой вселенной. Сторонники этой интерпретации заявляют, что их «решение» является самым простым, так как в нем нет необходимости в истинной случайности. Они также говорят, что данную интерпретацию следует принять

---

377 (1987); Adler S.: *Comments on proposed gravitational modifications of Schrödinger dynamics and their experimental implications*, J. Phys. A 40, 755–763 (2007).

<sup>1</sup> Salart D., Baas A., Van Houwelingen J.A.W., Gisin N., Zbinden H.: *Spacelike separation in a Bell test assuming gravitationally induced collapses*, Phys. Rev. Lett. 100, 220404 (2008).

исходя из принципа «бритвы Оккама», который говорит, что нужно всегда выбирать самую простую гипотезу из всех возможных.

Пусть каждый сам решит, насколько она проста. Со своей стороны я сделаю две ремарки. Во-первых, всегда можно отрицать существование истинной случайности, какой бы ни была теория или экспериментальные результаты<sup>1</sup>. Нужно только принять, что каждый раз, когда эта случайность проявляет себя, вселенная раздваивается, и каждый из результатов действительно имеет место в одной из получившихся параллельных вселенных. Для меня это построение выглядит притянутым за уши<sup>2</sup>. Во-вторых, многомировая интерпретация предполагает тоталитарную форму детерминизма. В самом деле, согласно этой интерпретации, запутанность никогда не нарушается, а лишь распространяется дальше и дальше. Таким образом, всё запутано со всем и не оставляет места для проявления свободной воли. Это даже хуже чем детерминизм Ньютона, в котором все локализовано

---

<sup>1</sup> Конечно, здесь можно сжульничать. Всегда можно добавить нелокальные скрытые переменные к квантовой теории, которая определяет будущее. Эти параметры могут просто быть будущим! Они с необходимостью нелокальны и скрыты от того, что мы видим сегодня. Честно говоря, мне такой подход неинтересен и кажется больше похожим на игру словами, чем на что-либо еще.

<sup>2</sup> Последователи идеи мультиверса называют свою теорию локальной, но неясно, в каком смысле она была бы таковой. Когда Алиса наклоняет свой джойстик, ее прибор и все, что находится вокруг нее, должно разделиться на две суперпозиционные ветви, в равной степени реальные; аналогично и у Боба. Когда миры Алисы и Боба встречаются, они запутываются аккуратно таким способом, чтобы удовлетворить правилам игры Белла в каждой ветви. Утверждается, что так выглядит динамика, описанная уравнением Шрёдингера, но в действительности есть ли за этим что-либо большее, чем невнятный комментарий к прекрасному уравнению? Разве он является объяснением? Ну и наконец, действительно ли это объяснение является локальным?

и логически разделено. Теория Ньютона, таким образом, оставляла место для будущей теории, которая бы описала открытый мир — мир, в котором настоящее не в полной мере определяет будущее<sup>1</sup>. И в действительности эта надежда была реализована с открытием квантовой теории, пусть даже она далека от объяснения свободной воли. А мультивселенная, напротив, не оставляет надежды на открытый мир<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Для теории, в которой фигурируют как квантовые, так и классические переменные (например, результаты измерений), можно потребовать, чтобы эволюцию квантовых переменных могли направлять классические переменные (экспериментатор должен иметь возможность активировать или использовать иным образом некий потенциал как следствие предыдущих результатов измерений): L. Diósi: Classical-quantum coexistence. A 'free will' test, J.Phys.Conf.ser. 361, 012028 (2012); arXiv:1202.2472.

<sup>2</sup> Gisin N.: *L'épidémie du multivers*. In: *Le plus grand des hasards. Surprises quantiques*, ed. by Dars J.-F., Papillaut A., Belin (2010).



## Глава 10

# ТЕКУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

Так как же все-таки эти две области пространства-времени знают, что происходит друг у друга? Для меня это очень серьезный вопрос. Я бы назвал его ключевым вопросом происходящей сейчас концептуальной революции. Но почему же тогда так мало физиков озабочены им? И почему к этому вопросу не возвращались с публикации работы об ЭПР-парадоксе в 1935 году и до начала 1990-х, когда Артур Экерт показал, что эти корреляции можно использовать в криптографии<sup>1</sup>? Причины сложны. В 1935 году у физиков было много других дел в рамках новой физики квантового мира, которая внезапно предложила возможности объяснить множество новых явлений. Запутанность и нелокальность могли подождать. Потом Бор и его Копенгагенская школа подавляли любое проявление любопытства, громко и четко заявляя, что квантовая механика представляет собой полную теорию.

---

<sup>1</sup> Ekert A.: *Quantum cryptography based on Bell's theorem*, Phys. Rev. Lett. 67, 661–663 (1991).

Абсурдность таких заявлений вырисовывалась постепенно, ведь физики долгое время находились под впечатлением от успехов новой физики. В самом деле, как может любая научная теория быть полной? Это означало бы, что мы близко подошли к окончательной теории, после которой будет нечего искать, потому что ничего неизвестного больше не осталось. Какая пугающая идея! Но в разные времена в истории, и особенно в конце каждого из двух последних столетий, некоторые верили, что это возможно. Прекрасной иллюстрацией является название книги нобелевского лауреата по физике Стивена Вайнберга: «Мечты о последней теории»<sup>1</sup>. Даже сегодня некоторые серьезно говорят о теории всего, хотя даже сокращение ТОЕ от английского названия «Theory of Everything» звучит несколько самоиронично (англ. toe — палец ноги). Ясно, что эта теория пока не создана и мы имеем дело со значительной фантазией.

Все изменилось в начале 1990-х благодаря усилиям нового поколения физиков и помощи со стороны теории информации и компьютерных вычислений, что послужило созданию любопытной и удивительной истории<sup>2</sup>.

## КАК НАМ «ВЗВЕСИТЬ» НЕЛОКАЛЬНОСТЬ?

Сейчас, когда существование квантовой нелокальности твердо установлено, физики начинают с ней заигрывать. Они любят играть, и это может здорово раздражать людей, которые воспринимают себя слишком серьезно. Однако,

---

<sup>1</sup> Weinberg S.: *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*, Vintage (1994).

<sup>2</sup> Rothen F.: *Le monde quantique, si proche et si étrange*, Presses polytechniques and universitaires romandes (2012); Gilder, L.: *The age of entanglement*, Alfred A. Knopf (2008).

только играя с новым объектом, будь то детская игрушка или научная концепция, мы можем действительно познакомиться с ним. Поиграем! Вы конечно заметили, что вся книга вертится вокруг игры — игры Белла. Благодаря этой игре мы подобрались к самому сердцу квантовой физики и к ее самой замечательной черте — нелокальности.

Другая страсть физиков — это попытаться все измерить и взвесить. Естественно, нелокальность — это не то, что может иметь вес, но очень важно уметь ее измерять, уметь определить, которая, скажем, из двух форм нелокальности больше или глубже. Физики пока не нашли для нелокальности хорошей меры. Кажется, существуют разные способы измерения нелокальности в зависимости от того, какой ее аспект мы исследуем<sup>1</sup>. А это явный знак, что мы не до конца понимаем эту концепцию.

Естественно также задаваться вопросом о том, как мы можем измерить «количество» запутанности. С 1990 года мы здорово продвинулись в этом вопросе, хотя опять же многие вопросы остаются без ответа. Должно ли такое положение дел нас расстраивать? Конечно, нет. Это лишь знак того, что нам многое предстоит открыть.

## **ПОЧЕМУ МЫ НЕ МОЖЕМ ПОБЕЖДАТЬ В ИГРЕ БЕЛЛА КАЖДЫЙ РАЗ?**

Квантовая физика дает нам возможность выигрывать в среднем 341 раз из 400, то есть намного более часто, чем три раза из четырех, иначе говоря, гораздо чаще, чем если бы приборы Алисы и Боба производили результат локально. Физики были настолько потрясены этим результатом, что

---

<sup>1</sup> Méthot A., Scarani V.: *An anomaly of non-locality*, Quantum Information and Computation 7, 157–170 (2007).

на протяжении нескольких поколений просто забывали спросить, почему физика не дает нам выигрывать каждый раз, то есть 400 раз из 400. Если природа нелокальна, то почему она не полностью нелокальна? Что не дает физике предсказать, что мы сможем выигрывать каждый раз?

Интересно заметить, что этот «детский» вопрос был задан только в 1990-х и что его начали исследовать лишь в нашем столетии. До недавних пор вопрос стоял лишь так: как же может природа (или квантовая физика, если угодно) быть нелокальной? Сегодня множество научных публикаций описывает следствия нелокальности, которые по-прежнему гораздо шире, чем квантовая нелокальность. Идея в том, чтобы спросить, что ограничивает квантовую физику, и попробовать рассмотреть ее извне, в более широком контексте, чем предлагаемый ее математическим аппаратом.

Первая теоретическая игрушка, которую физики изобрели для исследования, — это пара PR-приборов, названных так по именам изобретателей Санду Попеску и Дэниела Рорлиха<sup>1</sup>. Для нас это звучит знакомо, ведь очень они похожи на приборы, которые использовали для своей игры Алиса и Боб. Разница в том, что в игре с PR-приборами Алиса и Боб выигрывают каждый раз, то есть 4 раза из 4. Никто не знает, как изготовить такие приборы, поэтому вряд ли вы купите их в магазине (в отличие от квантовых приборов, позволяющих выигрывать чаще, чем три раза из четырех)<sup>2</sup>. Однако это не мешает физикам играть с ними. PR-приборы, таким образом, являются концептуальными игрушками, или инструментами.

---

<sup>1</sup> Popescu S., Rohrlich D.: *Nonlocality as an axiom*, Found. Phys. **24**, 379 (1994). Юмор этого названия в том, что PR одновременно является стандартным сокращением для public relations – связи с общественностью.

<sup>2</sup> [www.qutools.com](http://www.qutools.com).

Я приведу лишь два примера использования PR-приборов. Первый — имитация квантовых корреляций. Мы видели, что квантовая физика позволяет нам делать намного больше, чем два измерения некоторой системы (см. рис. 5.1). Двух достаточно для игры Белла, но физики могут выбирать между бесконечно многими возможными измерениями. Должно ли быть намного больше нелокальности, чтобы понять это бесконечное количество возможностей? Не вдаваясь в детали, большинство которых мы все равно не знаем, скажем лишь, что с парой PR-приборов мы можем имитировать все квантовые корреляции, относящиеся к двум запутанным квантовым битам<sup>1</sup>. И это удивительно. Можем ли мы тогда имитировать все квантовые корреляции на PR-приборах или на каких-то других приборах, которые могут генерировать простые корреляции, и при этом не позволять коммуникацию без передачи информации? Эта тайна пока не разгадана.

Второй пример использования PR-приборов находится в области теории сложности вычислений<sup>2</sup>. Цель такова: ограничить количество битов, которые нужно передать для выполнения определенных задач. Можно показать, что квантовая запутанность не дает возможности уменьшить число битов, которые нужно передавать. Однако, если бы PR-приборы существовали, для широкого спектра задач это количество уменьшилось бы до единственного бита! А это значит, что сложность коммуникации удалось бы свести к тривиальной. Это звучит довольно абстрактно, но в действительности это было бы экстраординарным результатом.

---

<sup>1</sup> Cerf N.J., Gisin N., Massar S., Popescu S.: *Simulating maximal quantum entanglement without communication*, Phys. Rev. Lett. 94, 220403 (2005).

<sup>2</sup> Brassard G.: *Quantum communication complexity*, Foundations of Physics 33, 1593–1616 (2003).

Единственный бит вместо миллионов битов! К несчастью, PR-приборов не существует. Может быть, как раз во избежание такого упрощения сложности коммуникации? Это точка зрения большинства теоретиков в области информатики, для которых упрощение сложности коммуникации так же невероятно, как сверхсветовые скорости для физиков. Итак, может это стать объяснением того факта, что квантовая физика не позволяет нам побеждать в игре Белла каждый раз? Возможно, но эта задача пока не решена полностью. Можно представить себе PR-приборы, которые производят достаточно шума, чтобы не сделать коммуникацию тривиальной, и тем не менее позволяют нам выигрывать в игру Белла чаще, чем это разрешено квантовой физикой<sup>1</sup>.

Вот так. Рискую потерять читателя в сложности моих объяснений, я по крайней мере надеюсь, что поделился с вами частью моего восхищения теми исследованиями, что проводятся в настоящее время. Продолжая тему, я представлю вашему вниманию три наиболее популярные темы исследований. Если вы не поймете всё, не волнуйтесь. Ведь наша цель — понимать завтра чуть больше, чем мы понимали вчера.

## **НЕЛОКАЛЬНОСТЬ БОЛЕЕ ЧЕМ В ДВУХ МЕСТАХ**

Истинная случайность может проявлять себя в двух местах. А может ли она проявляться в трех местах или в тысяче мест? Ответ неочевиден: быть может, все трехсторонние квантовые корреляции можно объяснить как комбинации двусторонних нелокальных случайностей. Сегодня мы знаем, что

---

<sup>1</sup> Brassard G., Buhrman H., et al.: *Limit on nonlocality in any world in which communication complexity is not trivial*, Phys. Rev. Lett. **96**, 250401 (2006).

это не так и что существуют такие квантовые корреляции, которые требуют случайности, которая может проявляться во многих разных местах одновременно. Тем не менее нам еще предстоит много работы по исследованию многосторонней нелокальности<sup>1</sup>.

Особо интересный случай — это ситуация, когда запутаны несколько пар квантовых систем, к примеру A–B и C–D, и при этом связанные измерения того типа, что используются в квантовой телепортации (см. главу 8), выполняются на системах, принадлежащих разным парам, к примеру на B и C. Естественно предположить, что разные запутанные пары независимы друг от друга. Если существует  $n$  пар, мы говорим о  $n$ -локальности. Это открывает целое поле для исследований, в которых совмещаются две грани запутанности — идея неразделимых состояний и идея связанных измерений<sup>2</sup>.

Но кто решает, кому с кем быть запутанным? Где хранится информация о местах, в которых может проявляться нелокальная случайность? Может быть, существует ангел, который управляет огромным математическим пространством, известным нам как гильбертово пространство (есть предположение, что она хранится именно там)? Мы никогда не узнаем этого в нашем трехмерном мире. Несмотря на серьезность этого по-детски простого вопроса, на него пока мало кто обращает внимание.

---

<sup>1</sup> Svetlichny G.: *Distinguishing three-body from two-body nonseparability by a Bell-type inequality*, Phys. Rev. D **35**, 3066 (1987); Collins D., Gisin N., Popescu S., Roberts D., Scarani V.: *Bell-type inequalities to detect true  $n$ -body nonseparability*, Phys. Rev. Lett. **88**, 170405 (2002).

<sup>2</sup> Branciard C., Gisin N., Pironio S.: *Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping*, Phys. Rev. Lett. **104**, 170401 (2010); Branciard C., Rosset D., Gisin N., Pironio S.: *Bilocal versus non-bilocal correlations in entanglement swapping experiments*, Phys. Rev. A **85**, 032119 (2012).

Позвольте мне рассказать о другой весьма популярной области исследований: что мы можем предсказать с помощью нелокальности, не используя при этом полный математический аппарат квантовой физики? В главе 4 мы видели, что для теоремы о запрете клонирования можно дать полное доказательство. Затем в главе 7 мы коснулись темы практического применения в генераторах случайных чисел и квантовой криптографии. И даже можем извлечь определенные детали из соотношений неопределенности Гейзенберга<sup>1</sup>. С другой стороны мы по-прежнему не можем объяснить квантовую телепортацию исключительно на языке приборов, подобных тем, что в игре Белла. Сложным моментом здесь являются связанные измерения. Мы все-таки не можем зафиксировать существенные детали без привлечения математического аппарата квантовой физики. Важность этого исследования недавно оценили в Европе и запустили программу DIQUIP<sup>2</sup>, объединившую исследователь из шести стран.

## «ТЕОРЕМА О СВОБОДНОЙ ВОЛЕ»

Теперь, когда любое локальное объяснение исключено, естественно спросить, не может ли существовать какое-нибудь детерминистическое нелокальное объяснение? Ведь если не получилось сохранить локальность, мы можем по крайней мере сохранить детерминизм. Обратимся к тезису о детерминистических нелокальных переменных — таких,

---

<sup>1</sup> Scarani V., Gisin N., Brunner N., Masanes L., Pino S., Acin A.: *Secrecy extraction from no-signalling correlations*, Phys. Rev. A **74**, 042339 (2006).

<sup>2</sup> Приборно-независимая обработка квантовой информации, Device independent quantum information processing [www.chistera.eu/projects/diqip](http://www.chistera.eu/projects/diqip).

которые могут полностью определить результаты любого измерения.

В принципе, это выглядит правдоподобно. Квантовая теория предсказывает вероятности, и можно подумать, что достаточно рассмотреть статистику этих детерминистических переменных, чтобы воспроизвести квантовые вероятности. Это, по сути, основная идея имитирующих квантовые явления коммерческих программ, которые используют наши студенты. Так как это работает?

Вспомним, что для двух далеко разнесенных в пространстве событий хронология может зависеть от системы отсчета, которую мы используем для их описания. Поэтому, помимо изображения квантовых явлений на компьютере, о чем упоминалось выше, дополнительные детерминистические нелокальные переменные могут пригодиться только в том случае, если они способны делать одинаковые предсказания во всех системах отсчета. Такие переменные называются ковариантными. Мы увидим, что на самом деле это невозможно<sup>1</sup>, а потому ковариантных детерминистических нелокальных переменных не существует. И это провозглашает конец детерминизма!

Чтобы показать, что такие нелокальные детерминистические переменные не существуют, нам нужно предположить, что Алиса и Боб обладают свободной волей. Некоторые ученые делают из этого вывод, что если люди действительно обладают свободной волей, то и квантовые частицы, такие как электроны, фотоны, атомы и т. д., тоже должны ею обладать. Столь поразительной формой представления результата мы обязаны британскому и американскому математиками Джону Конуэю и Саймону Кочену (эксперты

---

<sup>1</sup> Gisin N.: *Impossibility of covariant deterministic nonlocal hidden variable extensions of quantum theory*, Phys. Rev. A **83**, 020102 (2011).

в маркетинге, однако), которые назвали ее теоремой о свободе воли<sup>1</sup>.

Давайте еще раз воспользуемся приемом сведения к абсурду. Доказательство довольно запутанное, поэтому если вы потеряетесь по пути, просто переходите к заключению. Представим, что Алиса и Боб играют в игру Белла и смотрят на происходящее из системы отсчета, в которой Алиса двигает джойстик чуть раньше Боба. Пусть  $k$  — это нелокальная переменная, которая, в соответствии с нашим предположением, определяет результаты, производимые приборами Алисы и Боба. Тогда результат Алисы зависит от переменной  $k$  и ее выбора  $x$ . Мы запишем это так:  $a = F_{AB}(k, x)$ , где  $F_{AB}$  — некоторая функция. Если смотреть из этой системы отсчета, то, когда Боб двигает свой джойстик, его результат  $b$  может зависеть от переменной  $k$  и его выбора  $y$  и вдобавок от выбора Алисы  $x$ . Мы можем записать это так:  $b = S_{AB}(k, x, y)$ . Именно здесь мы видим, что переменная  $k$  нелокальна<sup>2</sup>, так как результат Боба может зависеть от выбора Алисы. Заметьте, что обозначения  $F_{AB}$  и  $S_{AB}$  обозначают «первый» и «второй» в хронологическом порядке  $AB$ .

Теперь рассмотрим эту же ситуацию из другой системы отсчета, где Боб двигает джойстик чуть раньше, чем Алиса. К примеру, вторая система отсчета может быть связана с ракетой, которая очень быстро движется от Алисы к Бобу. В этом случае результат Боба  $b$  зависит только от переменной  $k$  и его выбора  $y$ , поэтому мы запишем так:  $b = F_{BA}(k, y)$ . Но теперь уже результат Алисы  $a$  может зависеть от нелокальной переменной  $k$ , ее выбора  $x$  и выбора Боба  $y$ , поэтому у нас получается  $a = S_{BA}(k, x, y)$ . Символы  $F_{BA}$  и  $S_{BA}$

<sup>1</sup> Conway J.H., Kochen S.: *The free will theorem*, Found. Phys. **36**, 1441–1473 (2006).

<sup>2</sup> Более точно, переменная не является в силу своей природы ни локальной, ни нелокальной. В данном случае физики говорят, что переменная  $k$  нелокальна, поскольку ее использует функция  $S_{AB}$ .

опять обозначают «первый» и «второй», но в хронологическом порядке  $BA$ .

Но результат Алисы  $a$  не может зависеть от системы отсчета, в которой мы описываем эксперимент (или игру). Следовательно, всегда должно выполняться соотношение  $a = F_{AB}(k, x) = S_{BA}(k, x, y)$ . Последнее равенство может быть справедливо лишь в том случае, когда  $S_{BA}$  на самом деле не зависит от  $y$ , то есть результат Алисы на самом деле не зависит от выбора Боба. И наоборот, результат Боба не может зависеть от выбора Алисы. Но ведь это было условием локальности, сформулированным Беллом в 1964 году: прибор Алисы производит результат локально, так же как прибор Боба. В этом случае, как мы видели, Алиса и Боб не могут выиграть больше, чем 3 раза из 4. А это означает, что если они выигрывают больше трех раз из четырех, это исключает существование нелокальных переменных, которые одновременно являются детерминистическими и ковариантными.

Суммируя вышесказанное, отметим, что единственная возможность, которая остается — это существование недетерминистических нелокальных переменных. Так квантовая теория описывает игру Белла. Заметьте, что определение «недетерминистический» также является негативным. Оно не говорит нам, что это за переменные или как эти переменные или эти модели описывают игру Белла. Определение просто утверждает, что они не являются детерминистическими. В частности «недетерминистический» не означает «вероятностный» в обычном смысле этого слова, так как не является статистической смесью детерминистических случаев. (С хорошей иллюстрацией этого направления можно ознакомиться в статьях Колбека и Пьюси с соавторами<sup>1</sup>.)

<sup>1</sup> Colbeck R., Renner R.: *No extension of quantum theory can have improved predictive power*, Nature Communications **2**, 411 (2011); Pusey M.F., Barrett J., Rudolph T.: *The quantum state cannot be interpreted statistically*, Nature Physics **8**, 476–479 (2012).

## СКРЫТОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ?

Я не могу удержаться от описания одного последнего результата, тоже совсем недавнего, хоть он и отрицательный. Для спасения локальности, то есть идеи о том, что предметы и воздействия распространяются непрерывно из точки в точку, без разрывов и скачков, — идеи, которая так глубоко укоренилась в нашем сознании, что нам так трудно от нее отказаться, очень соблазнительной выглядит идея о том, что Алиса или ее прибор влияет на Боба каким-то неуловимым образом, который остается незаметным для физиков начала XXI века. Или что Боб влияет на Алису, в зависимости от того, кто первый делает выбор. Так как эта хронология зависит от произвольного выбора системы отсчета, хочется вообразить, что есть какая-то привилегированная система отсчета, которая определяет раз и навсегда порядок всех интересующих нас событий. Мы видели, что эксперимент может установить нижнюю границу скорости такого воздействия (см. главу 9) Но разве не может быть так, что очевидная нелокальность — это следствие воздействия, распространяющегося непрерывно из точки в точку между Алисой и Бобом с гигантской скоростью, определенной в привилегированной системе отсчета, которая пока неизвестна физикам? Согласно этой гипотезе, если воздействие приходит вовремя, то наблюдаемые корреляции будут как раз такими, какие описывает квантовая теория, а если воздействие не успевает, то эти корреляции с необходимостью являются локальными, а потому не дадут нам победить в игре Белла. Такая гипотеза противоречит духу теории относительности Эйнштейна, но не противоречит никаким экспериментальным проверкам этой теории. Короче говоря, эта гипотеза мирно сосуществует с теорией относительности, так же как и нелокальные квантовые корреляции, которые позволяют нам побеждать в игре Белла.

На первый взгляд, исключить такое объяснение кажется невозможным. В лучшем случае мы можем провести новые эксперименты вроде того, что описан в главе 9 и устанавливает нижний предел скорости распространения этого гипотетического воздействия. Но мы можем быть умнее.

Действительно ли существование воздействий, распространяющихся быстрее света, обязательно влечет за собой возможность коммуникации со сверхсветовой скоростью? Ведь можно представить себе, что такие воздействия навсегда останутся скрытыми. Это звучит не слишком хорошо с точки зрения физики, но естественно предположить, что пока физики не могут контролировать эти гипотетические воздействия, они не смогут и использовать их для сверхсветовой коммуникации.

Удивительно, но этой простой гипотезы, согласно которой мы не способны на коммуникацию со скоростью выше скорости света, если не можем контролировать это воздействие, достаточно для доказательства того, что такие воздействия не могут существовать! Этот результат получили во время написания этой книги мой студент Жан-Даниэль Банкаль, малайзийский постдок Йонг-Ченг Лянг, трое моих бывших коллег — Стефано Пироньо из Брюсселя, Антонио Ачин из Барселоны и Валерио Скарани из Сингапура — и я. Это была кульминация большого приключения, которое началось более десяти лет назад. Не удивляйтесь, что это будет трудно понять, ведь даже у нас это заняло столько времени. Я постараюсь обобщить наши разработки, но вы можете сразу перейти к выводам. Просто поймите, что даже само предположение о воздействиях, распространяющихся на сколь угодно больших, но конечных скоростях, быстрее скорости света, но тем не менее конечных, — даже эту экстремальную гипотезу можно опровергнуть. Природа совершенно точно нелокальна.

Гипотеза сверхсветовых воздействий может воспроизвести все экспериментальные результаты между двумя

партнерами, например нашими друзьями Алисой и Бобом. Так как мы не можем обеспечить идеальную синхронизацию в эксперименте, мы всегда можем предположить, что эти взаимодействия распространяются достаточно быстро, чтобы успеть скоррелировать два события. С тремя партнерами вопрос остается открытым<sup>1</sup>. Но с четырьмя партнерами, назовем их А, В, С и D, мы нашли такой довод. Представим, что в привилегированной системе отсчета первой производит измерение А, затем D, а потом и почти одновременно — В и С, так что воздействие от А успевает дойти до всех трех партнеров, а воздействие от D успевает дойти до В и С, но В и С не могут повлиять друг на друга. В этой конкретной ситуации корреляции ABD и ACD получаются такими же, как предсказывает квантовая теория в соответствии с предположением о скрытом воздействии. Однако корреляция В и С локальна. Нам удалось найти удивительное неравенство<sup>2</sup>, которому удовлетворяют все четырехсторонние корреляции при условии, что корреляция ВС является локальной, и которое не может быть использовано для коммуникации без передачи. Более того, это неравенство содержит только члены, основанные на корреляции между ABD и между ACD. Каждая из этих троек взаимосвязана гипотезой о скрытом воздействии, к примеру А влияет на D, которая влияет на В. Следовательно, в описанной выше конфигурации любая модель, использующая скрытые воздействия, распространяющиеся с конечной скоростью, выдает то же значение, что и квантовая теория для этого

<sup>1</sup> Ответ на него был получен, когда эта книга уже была дописана: T.J. Barnea, J.D. Bancal, Y.C. Liang, and N. Gisin: *Tripartite quantum state violating the hidden-influence constraint*, Phys. Rev. A **88**, 022123 (2013).

<sup>2</sup> Bancal J.D., Pironio S., Acin A., Liang Y.C., Scarani V., Gisin N.: *Quantum nonlocality based on finite-speed causal influences leads to superluminal signaling*, Nature Physics **8**, 867 (2012), arXiv:1210.7308.

неравенства. Но квантовое предсказание нарушает наше неравенство, поэтому мы можем сделать вывод, что любая модель, содержащая скрытые воздействия, распространяющиеся с конечной скоростью, с необходимостью производит корреляции, позволяющие сверхсветовую коммуникацию.

Результат, обрисованный выше, завершает иницированную Джоном Беллом программу по объяснению квантовых корреляций через принцип непрерывности, согласно которому всё распространяется непрерывно из одной точки пространства в следующую. Рис. 10.1 иллюстрирует эту программу. Еще раз: неизбежный вывод состоит в том, что удаленные события соединены неким разрывным образом, и природа действительно нелокальна.



**Рис. 10.1.** Исследовательская программа Джона Белла, к настоящему времени полностью выполненная. Не существует локальных объяснений для определенных корреляций, которые могут порождаться квантовой физикой. Природа нелокальна, и Бог действительно играет в кости, чтобы существовала та форма нелокальности, которая исключает коммуникацию без передачи информации



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот мы и подошли к концу книги. Как я предупреждал, вы поняли не всё. Никто не знает, почему квантовая физика нелокальна. С другой стороны, вы поняли, что природа недетерминистична и что она способна на подлинный акт творения. Другими словами, она может создавать истинно случайные события. Кроме того, раз мы подхватили идею, что эти события нередуцируемо случайны и не предопределены какой-то скрытой от нас силой, мы понимаем, что ничто не может помешать этой случайности проявиться в нескольких местах одновременно, при этом не подразумевая какой-либо коммуникации между этими местами.

Эти места не произвольны — они должны сначала быть запутаны. Запутанность переносится квантовыми объектами, такими как фотоны или электроны. Эти объекты движутся с конечными скоростями, меньшими или равными скорости света. В этом смысле понятия расстояний и пространства по-прежнему значимы, несмотря на то что нелокальная случайность может возникать в двух произвольно далеких друг от друга местах.

В этой книге я сказал, что нелокальные корреляции, кажется, появляются извне нашего пространства и времени — в том смысле, что ни одна происходящая в нашем мире история не может объяснить, как природа производит такие корреляции. В сущности, верно, что ни одна обычная история, рассказывающая нам, как предметы и события могут влиять друг на друга, двигаться и распространяться непрерывно из точки в точку, не может объяснить нам появление нелокальных корреляций. Но разве это значит, что физики должны оставить попытки понять природу? Я всегда удивляюсь, что многие ученые не особенно обеспокоены этим вопросом. Им достаточно того, что они могут провести все необходимые расчеты. Может быть, эти физики скажут, что компьютеры понимают природу?

А ведь для науки всегда был характерен поиск хорошего объяснения.

До открытия квантовой физики все корреляции, которые были предсказаны и наблюдались наукой, объяснялись причинно-следственными цепочками, которые непрерывно распространялись из точки в точку, то есть посредством локальных аргументов. Все эти доквантовые объяснения также отмечены детерминизмом. В принципе все определяется исходными условиями. Хотя на практике часто невозможно проследить все детали детерминистических причинно-следственных связей, физики никогда не сомневались в их существовании. Однако квантовая физика заставляет нас сформулировать новый вид хорошего объяснения для нелокальных корреляций.

Как мы можем объяснить нелокальность? Это было бы невозможно с нашими доквантовыми концептуальными инструментами, поэтому нам нужно больше инструментов. Один из способов — это говорить о нелокальной случайности, производимой запутанными объектами.

Представьте себе виртуальную игральную кость, примерно как те PR-приборы, которые мы обсуждали в главе 10. Ее может «бросить» как Алиса, так и Боб, а случайный результат получают они оба. Бросок этой нелокальной кости делает Алиса по своему выбору или Боб по своему выбору, чтобы провести измерение, путем отклонения джойстика на приборе Алисы или на приборе Боба. Говоря чуть более формально, случайный процесс может быть инициирован либо Алисой, которая решает сделать выбор  $x$ , либо Бобом, который решает сделать выбор  $y$ . Результаты  $a$  и  $b$  случайны, но они гарантированно соотносятся друг с другом так, что удовлетворяют основной корреляции игры Белла, выраженной в уравнении  $a + b = x \times y$ . Если мы допускаем такое объяснение, то мы можем понять нелокальность, так же как мы в конце концов поняли всемирное тяготение, приняв утверждение, что все массы, и в частности люди, притягиваются к Земле. Естественно, когда дело доходит до всемирного тяготения, у нас есть знакомая аналогия с магнитом на холодильнике. Если квантовая криптография когда-нибудь станет столь же обычна, мы сможем сказать своим детям: «Понимаешь, нелокальность — это так же как квантовая криптография. Алиса не посылает тайный ключ Бобу, Боб не посылает тайный ключ Алисе, но Алиса и Боб, будучи разделенными огромным расстоянием, вместе производят тайный ключ, который материализуется одновременно у каждого из них».

Единственный ли это способ объяснить нелокальную случайность? Некоторые предпочитают говорить об обращении причинной связи, в том смысле, что выбор Алисы действует назад во времени на источник запутанности, который в свою очередь действует вперед во времени на квантовую систему Боба. То есть обратная причинная связь действует назад во времени, в прошлое. Она распространяется

из одной точки в другую сквозь пространство, но при этом по направлению к прошлому. Лично я не сомневаюсь, что нелокальность, как и теория относительности, является источником некоторых сложностей для привычной нам концепции времени, но вывести отсюда хронологически обращенную причинную связь, которая развивается обратно во времени, представляется весьма радикальным шагом.

Я упоминаю этот подход как иллюстрацию к современным исследованиям. Вы поймете, что я предпочитаю свое собственное объяснение, которое основывается на идее нелокальной случайности, проявляющей себя в нескольких местах одновременно вне зависимости от расстояния между этими местами, но, быть может, будущее удивит меня, и следующие поколения придумают совсем другое объяснение. Но одно мы знаем точно: мы будем учитывать нелокальность. Физики никогда не прекратят великий поход с целью познать мир и когда-нибудь объяснят и это.

Таким образом, нелокальная случайность — это новый метод объяснения, который мы возьмем на вооружение наряду со всеми другими инструментами, накопленными за столетия изучения природы. И это подлинная концептуальная революция! Так как квантовая теория предсказывает существование нелокальных корреляций, у нас нет выбора, кроме как работать с ними и принять этот новый вид объяснения мира.

Квантовая нелокальность прошла долгий путь, прежде чем оказалась на центральном месте в физике. Даже сегодня многие физики отвергают термин «нелокальность»<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Конечно, ситуация значительно изменилась на протяжении последних двадцати лет. Появление квантовой информации и изменение взглядов в огромном сообществе специалистов по физике твердого тела сделали возможным более широкое использование терминов, которые два десятилетия назад были почти что запретными, таких

И все же еще в 1935 году Эйнштейн и Шрёдингер и некоторые другие утверждали, что этот аспект квантовой теории является ее основной чертой. Кажется, все эти недоверчивые физики не уловили того, что квантовая нелокальность не разрешает обмен информацией. Ничто не перемещается от Алисы к Бобу или от Боба к Алисе. Лишь случайное событие проявляет себя в нескольких местах способом, который не может быть описан локально, то есть нелокальным способом. Эйнштейн был неправ, говоря о «нелокальном воздействии», так как никакого воздействия Алисы на Боба или Боба на Алису попросту нет. Но он был совершенно прав, подчеркивая значимость этого аспекта квантовой теории, так как именно он лучше всего отличает квантовую физику от классической. Сегодня, когда мы хотим убедиться, что система является квантовой, мы должны показать, что с ее помощью можно производить нелокальные корреляции, другими словами, что с ее помощью можно победить в игре Белла. Сегодня нарушение неравенств Белла — это характерная черта квантового мира.

Однако это остается серьезным ударом по нашим интуитивным представлениям. Настанет ли день, когда квантовые технологии помогут нам воспринять на интуитивном уровне квантовую физику и ее нелокальность? Я бы сказал, что да. Для начала было бы полезным отбросить старомодный термин «квантовая механика», заменив его повсеместно

---

как «нелокальность», «нелокальные корреляции», «истинная случайность» и «неравенство Белла». Однако остается еще обширное сообщество ученых, работающих в физике высоких энергий, которое отказывается сдаться. Эти физики, кажется, полагают, что только их ветвь науки имеет право работать с фундаментальными вопросами, а остальная часть физики — это просто инженерное дело, хотя и в красивой упаковке. Количество профессиональных физиков в течение XX века существенно выросло, и социология этого сообщества еще не описана.

на «квантовую физику». Ведь в этом разделе физики нет ничего механического!

Давайте еще раз подведем итоги. Мы видели, что нелокальные корреляции и существование истинной случайности очень близко связаны. Без истинной случайности нелокальные корреляции могли бы использоваться для коммуникации без передачи (и поэтому на любых скоростях). Поэтому центральная концепция этой книги утверждает существование истинной случайности и провозглашает конец эры детерминизма. Напротив, как только мы приняли существование истинной случайности, существование нелокальных корреляций больше не выглядит сумасшествием, как внушала нам классическая физика с ее упорным детерминизмом. В самом деле, если природа способна производить истинно случайные события, почему корреляции, наблюдаемые в природе, должны быть только локальными?

Влияние нелокальности на метафизику, то есть на мировоззрение, предлагаемое современной физикой, не может быть переоценено. Прошло несколько веков, прежде чем атомистический взгляд на мир утвердился в Европе. Это был мир, созданный из огромного количества атомов — крошечных невидимых бусинок, которые, соединяясь разным образом, формировали все известные нам предметы. Их случайные движения давали ощущение тепла и поставляли энергию паровым двигателям, использование которых привело к промышленной революции. В то же время в Китае этот взгляд на мир не нашел поддержки в интеллектуальных кругах. Им казалось, что в мире, полном пустоты между атомами, мы бы не видели и не слышали, так как восприятие наших органов чувств подавлялось бы пустым пространством<sup>1</sup>. Очевидно, что в древней китайской

---

<sup>1</sup> Needham J.: *Science in Traditional China*, Harvard University Press, 1981.

метафизике действие на расстоянии было вполне естественным и было свойством вселенской гармонии, которая связывала всё со всем. Квантовая физика не поддерживает такой холистический взгляд на мир. В квантовой физике не все запутано со всем и лишь некоторые редкие события коррелируют нелокальным способом. Кроме того, повторяюсь, не существует причины, которая, находясь здесь, воздействовала бы на событие где-то там. Запутанность — это род «вероятностной причины», следствия которой могут проявиться в нескольких местах, не позволяя коммуникации на расстоянии. Запутанность определяет естественную склонность объектов производить те или иные коррелированные ответы на определенные вопросы. Эти ответы не предопределены, не записаны в состоянии объекта. Это просто записанная в самом состоянии объекта склонность выдавать такой-то и такой-то результат.

Лично я не считаю столь странным, что квантовый объект не должен содержать в себе все ответы на все вопросы, которые могут задать физики, а обладает лишь склонностью выдавать эти ответы. Мне кажется, что принять непредопределенность мира несложно. Мир, полный склонностей и случайных событий, но подчиняющийся хорошо определенным законам, кажется мне гораздо интереснее, чем мир, где все было предопределено в точности с самого начала времен.

Можно поспорить, однако, что нам предстоит еще многое узнать о нашем мире. В частности, мы до сих пор не понимаем, как совместить новые знания с теорией относительности Эйнштейна. Мы также не понимаем ни полную математическую структуру, ни весь потенциал практического применения в обработке информации, равно как — и это самое удивительное — пределы нелокальности: почему квантовая физика не разрешает больше нелокальности?

## Квантовая случайность

Последний вопрос хорошо отображает путь, который мы прошли со времен Эйнштейна, Шрёдингера и Белла. В то время вопрос стоял так: действительно ли существуют нелокальные корреляции, предсказанные квантовой теорией? Сегодня ни один физик не может в этом сомневаться. Современная проблема заключается в том, чтобы встроить квантовую теорию в теорию относительности и понять пределы нелокальности. Сегодня нам нужно изучать квантовую нелокальность извне квантовой теории. И мы работаем над этим.

# БЛАГОДАРНОСТИ

Написав эту книгу, я думаю обо всех своих студентах и коллегам, работа с которыми вдохновляла меня. Я также хочу поблагодарить тех, кто прочел и раскритиковал первые версии, и особенно французского издателя, Николя Витковски, а также Стивена Лайла за английский перевод. Эта книга во многом результат их терпения и профессионализма. Я выражаю благодарность Fonds national suisse de la recherche scientifique и Европе за щедрое финансирование моей исследовательской лаборатории и Университету Женевы — за то, что я работаю в таком приятном месте. И наконец, я благодарю провидение за то, что я живу в такое интересное для физики время, и за возможность сделать свой скромный вклад в ее развитие.

**ЖИЗАН НИКОЛЯ**

# **КВАНТОВАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ**

**Нелокальность, телепортация  
и другие квантовые чудеса**

Руководитель проекта *А. Тарасова*  
Корректор *Е. Аксёнова*  
Компьютерная верстка *М. Поташкин*  
Дизайн обложки *Ю. Буга*

Подписано в печать 20.10.2015. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.  
Объем 13 печ. л. Тираж 3000 экз. Заказ № .

**ООО «Альпина нон-фикшн»**  
123060, г. Москва  
ул. Расплетина, д. 19, офис 2  
Тел. +7 (495) 980-5354  
[www.nonfiction.ru](http://www.nonfiction.ru)

Знак информационной продукции  
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

0+



## Программируя Вселенную Квантовый компьютер и будущее науки

Сет Ллойд, пер. с англ., 2013, 256 с.

*«В 1993 г. я понял, как создать квантовый компьютер. Квантовые компьютеры — это устройства, которые используют способность отдельных атомов, фотонов и других элементарных частиц обрабатывать информацию. Они вычисляют так, как не могут вычислять классические компьютеры, например Mac или PC. Изучая, как заставить атомы и молекулы — самые маленькие частицы Вселенной — вычислять, я стал все лучше видеть естественную способность к обработке информации, свойственную самой Вселенной. Сложный мир, который мы видим вокруг, — проявление квантовых вычислений Вселенной».*

### О чем книга

Каждый атом Вселенной, а не только различные макроскопические объекты, способен хранить информацию. Акты взаимодействия атомов можно описать как элементарные логические операции, в которых меняют свои значения квантовые биты — элементарные единицы квантовой информации. Парадоксальный, но многообещающий подход Сета Ллойда позволяет элегантно решить вопрос о постоянном усложнении Вселенной: ведь даже случайная и очень короткая программа в ходе своего исполнения на компьютере может дать крайне интересные результаты.

Вселенная постоянно обрабатывает информацию — будучи квантовым компьютером огромного размера, она все время вычисляет собственное будущее. И даже такие фундаментальные события, как рождение жизни, половое размножение, появление разума, можно и должно рассматривать как последовательные революции в обработке информации.

### Почему книга достойна прочтени

В книге описывается новый подход к проблеме информационных вычислений и способ изучения Вселенной как системы, которая создает сама себя.

### Кто автор

Сет Ллойд — специалист по квантовой механике, профессор инженерной механики Массачусетского технологического института, специализирующегося на разработке квантовых компьютеров и квантовых систем коммуникации.



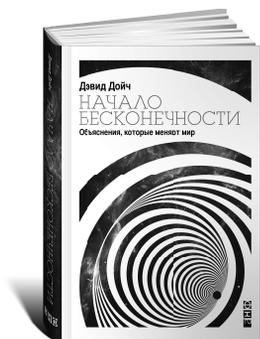
## Структура реальности

Наука параллельных вселенных

Дэвид Дойч, пер. с англ., 2015, 430 с.

Книга британского физика и философа Дэвида Дойча, одного из создателей концепции квантовых вычислений, наглядно демонстрирует, что эпоха великих философских систем вовсе не осталась в прошлом. Автор выстраивает целостный и согласующийся с научными знаниями ответ на один из самых фундаментальных философских вопросов: какова подлинная природа реальности.

По Дойчу ткань реальности, каковой она открывается любому носителю разума, сплетается из четырех основных нитей. Это эпистемология Карла Поппера, раскрывающая путь научного знания; это квантовая механика, которая целостно интерпретируется лишь после признания реальность мультиверса — бесконечного ансамбля параллельных вселенных; это основанная Тьюрингом теория вычислений, без которой не понять природу математических объектов; и, наконец, это универсальная теория эволюции, объясняющая развитие не только жизни, но и цивилизации.



## Начало бесконечности

Объяснения, которые меняют мир

Дэвид Дойч, пер. с англ., 2014, 581 с.

Британский физик Дэвид Дойч — не только один из основоположников теории квантовых вычислений, но и философ, стремящийся осмыслить «вечные вопросы» человечества в контексте, заданном развитием науки. Стержневой вопрос данной книги: есть ли предел для человеческого прогресса? Ответ выражен в заглавии: мы стоим у начала бесконечного пути, по которому поведет нас, выдвигая догадки и подвергая их критике, наш универсальный разум. Мы встали на этот путь в эпоху Просвещения, но с него легко сбиться под влиянием ошибочных философских идей, к которым автор причисляет многие течения мысли — от позитивизма до постмодернизма, не говоря уже о религии. Примером отступления от пути разума в науке предстает у него копенгагенская интерпретация квантовой механики. Разумную альтернативу ей Дойч видит в интерпретации Эверетта, из которой вытекает картина мира как мультивселенной. Но сфера интересов автора не ограничивается наукой. Опираясь на идеи Карла Поппера и понимая разумного объяснения, Дойч формулирует теорию познания, из которой выводит существование объективной истины в этике и эстетике, а также политические принципы, способствующие неограниченному прогрессу.



## Во что мы верим, но не можем доказать

Интеллектуалы XXI века о современной науке  
Джон Брокман, пер. с англ., 2-е изд., 2012, 336 с.

Более ста ведущих интеллектуалов мира делятся своими не проверенными пока еще гипотезами, которые в скором будущем могут стать для нас очевидной истиной. В коротких эссе, посвященных самым разным темам — сознание, эволюция, внеземные формы жизни, будущее человечества, судьба вселенной, — авторы предлагают неожиданные, страстные, иногда эксцентричные и всегда заставляющие задуматься идеи, связанные с их научными дисциплинами. Многие из этих всемирно известных имен знакомы и российскому читателю: Дэниел Деннет, Стивен Пинкер, Ричард Докинз, Джаред Даймонд, Фримен Дайсон, Мартин Рис, Джон Хорган, Михай Чиксентмихайи, Гари Маркус.



## Поток

Психология оптимального переживания

Михай Чиксентмихайи, пер. с англ.,  
3-е изд., 2013, 461 с.

В своей культовой книге выдающийся ученый Михай Чиксентмихайи представляет совершенно новый подход к теме счастья. Счастье для него сродни вдохновению, а состояние, когда человек полностью поглощен интересным делом, в котором максимально реализует свой потенциал, Чиксентмихайи называет потоком. Автор анализирует это плодотворное состояние на примере представителей самых разных профессий и обнаруживает, что эмоциональный подъем, который испытывают художники, артисты, музыканты, доступен в любом деле. Более того, к нему надо стремиться — и не только в целенаправленной деятельности, но и в отношениях, в дружбе, в любви. На вопрос, как этому научиться, и отвечает книга.

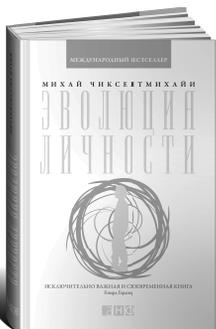


## В поисках потока

Психология включенности в повседневность

Михай Чиксентмихайи, пер. с англ.,  
3-е изд., 2013. — 194 с.

Как стать хозяевами собственной судьбы? Как получать радость от каждой минуты своего существования и при этом чувствовать, что идешь вперед? Как наполнить рутину смыслом? Выдающийся ученый Михай Чиксентмихайи продолжает тему своей культовой книги «Поток: Психология оптимального переживания» применительно к повседневности. Здесь он показывает важность состояния потока в круге обычных дел, учит выявлять занятия, стимулирующие желание приложить все свои силы, и вносить соответствующие коррективы. Это касается и работы, и досуга, и отношений с окружающими, и воспитания детей. Овладев этими методами, каждый имеет шанс на достойную, содержательную, плодотворную и счастливую жизнь.



## Эволюция личности

Михай Чиксентмихайи, пер. с англ., 2013, 420 с.

Эта исключительно своевременная книга автора знаменитой теории счастья посвящена судьбам мира. Лишь активное и сознательное участие в эволюционном процессе поможет нам наполнить жизнь смыслом и радостью, считает Михай Чиксентмихайи, самый цитируемый психолог современности. Судьба человечества в следующем тысячелетии зависит от того, какими сегодня станем мы сами. Захотим ли мы ставить перед собой «сложные» задачи, освободиться от влияния «мемов», устаревших моделей поведения и манипулирования нашим сознанием. Объединение усилий множества людей, каждый из которых реализует собственный потенциал, и общественное переосмысление нашего эволюционного наследия позволяют обратить силу живительного потока на решение вызовов современности. В этом залог не только выживания нашего вида, но и его подлинного возрождения. Рекомендуется читать всем.



## Космос Эйнштейна

Как открытия Альберта Эйнштейна изменили наши представления о пространстве и времени  
Митио Каку, пер. с англ., 2016, 272 с.

Описывая жизнь Альберта Эйнштейна, Митио Каку погружает нас в бурлящую атмосферу первой половины XX в. — две мировые войны, революция в Германии, создание атомной бомбы. Он показывает читателю невидимый обычно за триумфальной стороной открытий и озарений мир ученого — этапы становления, баталии в научном мире, зачастую непростые отношения с близкими. В книге представлен свежий взгляд на новаторскую деятельность Эйнштейна, перевернувшего представления человечества о пространстве и времени.

Автор книги, Митио Каку, — всемирно известный физик и популяризатор науки. Его умение доносить научные знания до самого широкого читателя сродни великому Эйнштейну, любившему повторять, что новая теория никуда не годится, если не базируется на зримом образе, достаточно простом, чтобы понять его мог даже ребенок. В своей книге Митио Каку не только удается увлекательно рассказать о жизни великого гения, но и дать четкое представление об открытиях Альберта Эйнштейна даже тем, кто далек от науки.



## Будущее вещей

Как сказка и фантастика становятся реальностью

Дэвид Роуз, пер. с англ., 2015, 344 с.

Как развитие технологий повлияет на нашу жизнь? Какими станут наши гаджеты? Как всепроникающий Интернет преобразит предметный мир: от кошельков, зонтов и мусорных баков до автомобилей и медицинской аппаратуры? Воплотятся ли в жизнь великие мечты человечества: всеведение, телепатия, неуязвимость, телепортация, бессмертие? Разработчик устройств, подключаемых к Интернету, Дэвид Роуз во многом по-своему отвечает на эти вопросы. И в профессии, и в этой книге он пытается уйти от линейного продолжения образов сегодняшнего дня. Он настаивает на том, что волшебство и очарование должны быть не менее значимыми критериями при конструировании объектов, чем их утилитарность, и тогда мир сказок и фантастики войдет в нашу реальность.



## Будущее разума

Митио Каку, пер. с англ., 2015, 502 с.

Прямое мысленное общение с компьютером, телекинез, имплантация новых навыков непосредственно в мозг, видеозапись образов, воспоминаний и снов, телепатия, аватары и суррогаты как помощники человечества, экзоскелеты, управляемые мыслью, и искусственный интеллект. Это все наше недалекое будущее. В ближайшие десятилетия мы научимся форсировать свой интеллект при помощи генной терапии, лекарств и магнитных приборов. Наука в этом

направлении развивается стремительно. Изменится характер работы и общения в социальных сетях, процесс обучения и в целом человеческое развитие. Будут побеждены многие неизлечимые болезни, мы станем другими. Готов ли наш разум к будущему? Что там его ждет? На эти вопросы, опираясь на последние исследования в области нейробиологии и физики, отвечает Митио Каку, футуролог, популяризатор науки и автор научно-популярных бестселлеров.



## Последнее изобретение человечества

Искусственный интеллект  
и конец эры Homo sapiens

Джеймс Баррат, пер. с англ., 2015, 304 с.

За каких-то десять лет искусственный интеллект сравняется с человеческим, а затем и превзойдет его. Корпорации и государственные структуры по всему миру, конкурируя между собой, вкладывают миллиарды в развитие искусственного разума. Но что ждет нас дальше? Ученые задаются вопросом: не окажется ли это изобретение последним — губительным для нас самих? Достигнув определенного уровня развития, искусственный интеллект сможет сам себя совершенствовать, без участия человека. У нас появится соперник хитрее, сильнее и враждебнее, чем мы можем себе представить.