

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
ПРЕАМБУЛА.....	17
ВВЕДЕНИЕ.....	19
Глава 1	
АПЕРИТИВ.....	25
Глава 2	
ЛОКАЛЬНЫЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ.....	33
Глава 3	
НЕЛОКАЛЬНОСТЬ И ИСТИННАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ.....	65
Глава 4	
НЕВОЗМОЖНОСТЬ КВАНТОВОГО КЛОНИРОВАНИЯ.....	81
Глава 5	
КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ.....	91
Глава 6	
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 приспособливается 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 Орсе 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 Николя Жизана.

Тот факт, что эта книга занимает определенную позицию по этому вопросу, вразрез с другими популярными взглядами, неудивителен. Николя 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 революции¹.

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

¹ 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 Шрёдингера¹, «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.

¹ 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 локальности¹, 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 экспертов².

*Ален Аспе
Пализо, май 2012*

-
- ¹ 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.
- ² 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 вызывали 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 дерзость¹. Тогда по этому направлению исследований

¹ 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».¹

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 действия². Как и Ньютон за три века до него, Эйнштейн отверг эту гипотезу как

¹ 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.

² 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 объяснили¹. 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

¹ Bell J. S.: *Speakable and Unspeakable 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