КАРА ИНЬ

Наблюдатель влияет на наблюдаемое



Психология восприятия, сознания и реальности

18+

Кара Инь

Наблюдатель влияет на наблюдаемое

«Автор»
2026

Инь К.

Наблюдатель влияет на наблюдаемое / К. Инь — «Автор», 2026

А что, если реальность, которую вы воспринимаете, во многом зависит от того, куда направлено ваше внимание?Почему одни и те же события разные люди переживают совершенно по-разному? Как наши убеждения, ожидания, страхи и внутренние установки влияют на интерпретацию происходящего? И действительно ли, меняя способ наблюдения за миром, мы можем изменить собственную жизнь?Книга «Наблюдатель влияет на наблюдаемое» — это интеллектуальное путешествие на пересечении психологии, философии, когнитивных наук и исследования человеческого сознания.Автор приглашает читателя исследовать удивительную связь между восприятием и реальностью: от психологических механизмов избирательного внимания и когнитивных искажений до философских вопросов свободы воли, субъективности и природы познания.

© Инь К., 2026
© Автор, 2026

Содержание

НАБЛЮДАТЕЛЬ ВЛИЯЕТ НА НАБЛЮДАЕМОЕ 5
ЧАСТЬ I. РЕАЛЬНОСТЬ НЕ ТАКАЯ, КАКОЙ КАЖЕТСЯ 6
Глава 1. Мир, который мы считали настоящим 7
Глава 2. Кто смотрит твоими глазами? 10
Глава 3. Когда физика перестала быть интуитивной 13
Глава 4. Материя, которая оказалась не такой материальной 16
Глава 5. Мир за пределами человеческих чувств 19
Глава 6. Иллюзия непрерывности 22
Глава 7. Можно ли доверять собственным глазам? 25
Глава 8. Реальность до того, как мы её назвали 28
Глава 9. Карта — не территория 30
Глава 10. Первый вопрос, меняющий всё 32
ЧАСТЬ II. КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ 35
Глава 11. Рождение квантового мира 36
Глава 12. Эйнштейн и свет, который оказался частицами 39
Глава 13. Двойственная природа реальности 41
Глава 14. Эксперимент, который потряс физику 43
Глава 15. Когда возможность становится результатом 45
Глава 16. Принцип неопределённости 47
Глава 17. Мир вероятностей 49
Глава 18. Измерение, которое меняет эксперимент 51
Глава 19. Квантовая запутанность 53
Глава 20. Вселенная, которая не обещала нам простых ответов 55
Конец ознакомительного фрагмента. 58

Кара Инь
Наблюдатель влияет на наблюдаемое

НАБЛЮДАТЕЛЬ ВЛИЯЕТ НА НАБЛЮДАЕМОЕ

Квантовая физика, сознание и тайна реальности

Кто наблюдает за миром — и почему мир, который мы видим, не всегда совпадает с тем, что существует на самом деле?

Автор: Кара Инь

ЧАСТЬ I. РЕАЛЬНОСТЬ НЕ ТАКАЯ, КАКОЙ КАЖЕТСЯ

Первые трещины в привычной картине мира

Глава 1. Мир, который мы считали настоящим

Утром ты открываешь глаза, и мир уже на месте. Потолок над головой, свет сквозь штору, холодный пол под ногами. Никто не спрашивает у тебя разрешения, чтобы всё это существовало. Стул стоит там, где стоял вчера. Чашка тяжёлая, чай горячий, окно выходит на двор, где соседская машина снова заняла чужое место. Мир кажется самой надёжной вещью на свете. Если уж в чём-то сомневаться, то точно не в этом.

Мы редко задумываемся, как много усилий уходит на то, чтобы эта надёжность казалась такой простой. Человек, который идёт по улице, не решает уравнений, не пересчитывает расстояния и не сверяет показания приборов. Он просто видит дерево, дом, прохожего. Видит — и всё. Слово «просто» здесь самое коварное. Именно оно заставляет нас считать, что мир поступает в голову готовым, как посылка, и нужно лишь открыть коробку.

Философы называют это наивным реализмом. Звучит почти обидно, но на самом деле это нормальное состояние любого здорового человека. Мы убеждены, что вещи таковы, какими мы их воспринимаем: красное яблоко действительно красное, твёрдый стол действительно твёрдый, а Солнце действительно встаёт утром и садится вечером. Такая вера не глупость. Она помогла нашим предкам выжить. Тот, кто слишком долго рассуждал о природе тигра, вряд ли оставил много потомков.

И всё же стоит присмотреться к тому, что мы называем очевидным.

Возьмём Солнце. Ни одна фраза не звучит так естественно, как «солнце взошло». Мы говорим её каждый день, и на кухне, и в разговоре с детьми. А между тем Солнце никуда не восходит. Земля вращается, и мы вместе с ней поворачиваемся к звезде, которая всё это время находилась на своём месте. Человечество потратило тысячелетия, чтобы признать это. Коперник опубликовал свою книгу в 1543 году, и ещё долго после этого учёные и священники спорили, кто на самом деле двигается: небо или мы. Самое поразительное, что глаза в этом споре были на стороне старой картины. Если смотреть честно, без образования и учебников, то всё выглядит так, будто Земля неподвижна. Мы не чувствуем её движения. Мы не ощущаем, что в эту секунду несёмся вокруг оси со скоростью в сотни метров в секунду, а вокруг Солнца и вовсе около тридцати километров в секунду. Тело спокойно, чай в чашке не расплёскивается.

Вот первая странность. Наша повседневная картина мира не просто неполна. В некоторых важных деталях она прямо противоречит тому, что мы знаем о реальности из науки. И всё равно мы продолжаем жить в этой картине, как в удобной квартире, не переставая пользоваться ею каждый день.

Если подумать, в этом нет ничего трагического. Любая карта упрощает. Любая модель что-то отбрасывает ради удобства. Вопрос только в том, насколько мы помним, что перед нами упрощение.

Представь инженера, который строит мост. Ему не нужна квантовая механика, чтобы рассчитать нагрузку на балку. Не нужна и теория относительности. Законы Ньютона, написанные больше трёх столетий назад, прекрасно справляются с мостами, лифтами, самолётами и даже с полётами к Луне. Это одно из чудес науки: старая теория не стала ложью, когда пришла новая. Она оказалась очень хорошим приближением, работающим в определённых условиях. Пока тела большие по сравнению с атомом, медленные по сравнению со светом и не слишком тяжёлые, Ньютон остаётся верным помощником.

Проблемы начинаются на границах. Когда мы спускаемся в мир атомов, когда разгоняемся до скоростей, близких к скорости света, когда заглядываем в окрестности чёрных дыр, привычные правила перестают работать. Не потому, что природа вдруг нарушает собственные законы, а потому, что наши представления были выкроены по размеру обычной человеческой жизни. Мы родились среднего роста, живём среднюю по меркам Вселенной жизнь и двигаемся

со средней скоростью. Наша интуиция настроена именно на этот диапазон. За его пределами она ведёт себя как навигатор в лесу, где нет дорог: вроде бы работает, но куда-то не туда.

Есть замечательный пример, который любят физики. Подумай, как выглядит поверхность воды в стакане. Ровная, гладкая, непрерывная. Но если бы ты мог рассмотреть её с увеличением в миллионы раз, то увидел бы хаотичный рой молекул, которые сталкиваются, цепляются друг за друга и разлетаются. Никакой гладкости нет. Гладкость возникает только на нашем масштабе, как возникает впечатление цельного изображения на экране, пока не приблизишь глаза вплотную и не заметишь отдельные пиксели.

Ты можешь сказать: ну и что? Мы живём на этом масштабе, нам этого достаточно. Разве важно, что там, внутри? Да, для большинства повседневных дел не важно. Но стоит однажды задать вопрос «а как всё устроено на самом деле?», и привычная картина начинает расползаться по швам. Потому что оказывается, что «на самом деле» — выражение, с которым нужно обращаться очень осторожно.

У детей есть поразительная способность спрашивать об очевидном. Маленький ребёнок, которому сказали, что небо голубое, может спросить: «Почему?» Взрослый отвечает про рассеяние света в атмосфере, про то, что короткие волны рассеиваются сильнее длинных. Ребёнок слушает и спрашивает следующее: «А почему тогда на закате оно красное?» Цепочка вопросов длится, пока у взрослого не кончаются ответы или терпение. Но в этой детской настойчивости спрятано то, что сделало науку возможной: нежелание принимать видимое за последнее слово.

У этой привычки доверять глазам есть и обратная сторона. Мы привыкли считать, что если мы чего-то не видим, то этого нет. Долгое время люди не знали о микробах, пока Левенгук в XVII веке не рассмотрел в самодельный микроскоп крохотных существ в капле воды. Заболевания объяснялись дурным воздухом, гневом богов или несбалансированными жидкостями организма. Никто не глупил: просто целый мир, влиявший на жизнь каждого человека, был скрыт от невооружённого глаза. Пока не появился инструмент, он как будто не существовал. А он всё это время был здесь.

Это удивительная мысль, если дать ей отстояться. Реальность может быть огромнее, чем то, что умещается в поле нашего зрения. И то, что мы считаем «настоящим», зависит от того, какими инструментами мы располагаем: глазами, ушами, микроскопами, телескопами, ускорителями частиц.

Можно пойти ещё дальше. Допустим, ты смотришь на красный цветок. Тебе кажется, что красный цвет находится в цветке, как сахар находится в чае. Но физика говорит другое. Лепестки отражают свет определённой длины волны. Это физический факт: волна, колеблющаяся с определённой частотой. А вот ощущение красного, то самое живое, тёплое, узнаваемое «красное», возникает в твоём мозге. В самой волне нет никакого красного. Есть колебания электромагнитного поля. Красным они становятся там, где есть тот, кто способен их так пережить.

Не спеши делать из этого далекоидущих выводов. Это не значит, что мир выдуман или что его нет без нас. Цветок существует, свет от него идёт, волны движутся. Но то, каким этот мир предстаёт перед нами, — результат встречи двух вещей: того, что есть снаружи, и того, как устроены мы сами. Между «миром» и «миром, который я вижу» стоит сложный механизм: глаз, нервы, мозг, память, ожидания. И этот механизм не просто пассивно пропускает сквозь себя картинку. Он её собирает.

В этой книге мы будем идти именно по этой границе. По тонкой линии между тем, что есть, и тем, как оно нам является. Для этого придётся заглянуть и в лабораторию физика, где странные эксперименты заставляют пересматривать самые базовые представления, и в кабинет нейробиолога, где выясняется, как мозг строит внутреннюю модель мира, и в тишину философской библиотеки, где те же вопросы задавали ещё за две с половиной тысячи лет до появления первых лабораторий.

Я сразу хочу оговорить одну вещь. На эту тему написано очень много книг, в которых красивая мысль выдаётся за научный факт. Читателю говорят, что квантовая физика доказала, будто мысль создаёт материю, что Вселенная существует только потому, что мы на неё смотрим, что достаточно захотеть, и реальность подстроится. Звучит вдохновляюще, но такие утверждения не следуют из физики. Мы будем разбираться, где проходит граница между доказанным и вдохновляющим предположением. Иногда она окажется неожиданно тонкой. Иногда она окажется более интересной, чем любая красивая легенда.

Потому что подлинная картина мира, какой её рисует современная наука, оказывается страннее любой выдумки. Нам не нужно ничего приукрашивать.

Пока же остановись на минуту и просто посмотри вокруг. На стол, на окно, на свои руки. Всё это кажется простым, привычным, твёрдым и ясным. Именно таким мы и привыкли считать настоящее. А теперь допусти на секунду, что это лишь первый, самый поверхностный слой чего-то гораздо более сложного. Слой, который наш мозг вылепил для нас, чтобы мы могли жить, не сходя с ума от избытка подробностей.

Мы ещё вернёмся к этому столу. Мы вернёмся и к твоим рукам. Пока что достаточно одного: мир, который мы считали настоящим, — это только начало разговора.

Глава 2. Кто смотрит твоими глазами?

Закрой левый глаз и смотри правым на какую-нибудь точку прямо перед собой. Теперь, не отрывая взгляда, медленно отводи в сторону руку с поднятым большим пальцем. Где-то на расстоянии вытянутой руки, чуть в стороне от центра, палец вдруг исчезнет. Не станет размытым, не потемнеет, а просто пропадёт, как будто его аккуратно вырезали из картинки. Двинешь руку дальше, и он появится снова.

Это слепое пятно. У каждого человека в каждом глазу есть участок сетчатки, где зрительный нерв выходит из глазного яблока. Там нет ни одного светочувствительного рецептора. Свет туда попадает, но превращаться ему не во что. Участок немаленький: он занимает в поле зрения угол примерно в несколько градусов, и в него может целиком спрятаться человеческое лицо, если смотреть на него с расстояния в несколько метров.

Тем не менее ты не ходишь по миру с двумя чёрными дырами в картинке. Ты вообще ничего не замечаешь. Мозг тихо заполняет пропуск, достраивая его по соседним участкам: если вокруг пятна обои в цветочек, то и внутри пятна будут цветочки. Он делает это так аккуратно, что ты даже не подозреваешь о правке.

Эта крошечная деталь анатомии говорит о главном больше, чем целые трактаты. То, что ты видишь, не снимок. Это реконструкция.

Мы привыкли думать о зрении как о камере. Свет попадает в линзу, на сетчатке рисуется картинка, картинка передаётся в мозг, а там кто-то сидит и её разглядывает. Каждая часть этого образа неточна. Начнём с линзы. Хрусталик, который строит изображение, переворачивает его вверх ногами, и мозг, как выясняется, ничуть не огорчён этим. Сетчатка устроена не как ровная матрица: в центре, на крохотном пятачке, называемом ямкой, рецепторы расположены очень плотно и дают чёткое изображение. Чем дальше от центра, тем хуже разрешение и тем скуднее цвет. Ты можешь убедиться: смотри на одну букву в этой строке и попробуй, не двигая глазами, прочесть слово на расстоянии десяти букв от неё. Скорее всего, не получится. Всё, что за пределами узкого центра, видится смутно, и только ощущение, что вокруг всё резко и ясно, остаётся с тобой.

Откуда оно берётся? Из движения. Глаза непрерывно совершают быстрые скачки, которые называют саккадами, в среднем несколько раз в секунду. Взгляд перепрыгивает с лица на руку, с руки на окно, с окна на часы. Во время самого скачка зрение на короткое время подавляется, иначе мир превращался бы в смазанную полосу. Ты этого не замечаешь по той же причине, по которой не замечаешь слепое пятно. Мозг склеивает короткие чёткие фрагменты в плавный непрерывный фильм, а потом показывает его тебе под видом реальности.

Любопытно, что на вопрос «что вы видите?» мы отвечаем как будто о самом мире, хотя имеем в виду собственную модель мира. Нейрофизиологи говорят об этом осторожно, а философы без обиняков: между тобой и вещами стоит посредник. Он очень хорош. Он почти никогда не ошибается в важных мелочах, вроде расстояния до бордюра или выражения лица собеседника. Но он посредник.

И дело не только в глазах. Возьмём цвет. Ещё Ньютон в семнадцатом веке заметил, что лучи света сами по себе не окрашены: в них нет ничего, кроме определённой способности возбуждать в нас ощущение того или иного цвета. Прошли века, и ничего принципиально нового к этой мысли не добавили. Свет имеет длину волны. Предмет поглощает одни волны и отражает другие. В сетчатке три типа колбочек реагируют на разные участки спектра. Мозг сравнивает сигналы и выдаёт: «красное». Самого красного нигде нет, пока этот процесс не завершится внутри живого существа.

На этом месте часто возникает недоразумение, и я хочу его сразу предупредить. Из сказанного не следует, что внешнего мира нет. Из сказанного не следует, что цвет — иллюзия в

том смысле, что его можно отменить усилием воли. Свет с определённой длиной волны существует независимо от нас. Мы можем измерить его прибором. Но прибор, измеряющий длину волны, не видит красного. Он видит число. «Красное» появляется, когда у кого-то есть глаза, нервы и мозг, способный превратить число в переживание.

Странный вопрос: где именно это происходит? Мы как будто видим цвет в яблоке. Но яблоко содержит только молекулы, поглощающие и отражающие свет. Мы как будто видим его «в голове». Но если заглянуть в голову, то там нет ни маленького экрана, ни зрителя, а только нейроны, которые вспыхивают электрическими импульсами. Ни в яблоке, ни в нейронах красного не найти. И всё-таки оно есть, потому что ты его видишь прямо сейчас, если вспомнишь яблоко.

Этот вопрос мы будем разбирать позже, в главах о сознании. Пока важно другое. Он показывает, что фраза «внешний мир» не такая простая, как нам кажется. Есть мир, который существует независимо от нас, и есть мир, каким он нам является. Вторая версия не копия первой. Это, скорее, перевод, причём перевод, сделанный для определённой цели: чтобы наш вид мог выжить, найти еду и не попасть под копыта.

Психологи и нейробиологи сегодня всё чаще говорят о мозге как о машине предсказаний. Он не ждёт, пока снаружи придёт полная информация, чтобы потом её обработать. Он постоянно строит догадки о том, что должно быть вокруг, и сверяет их с сигналами от органов чувств. Если догадка подтверждается, сигнал почти не обрабатывается дальше. Если нет, возникает ошибка предсказания, и вот тогда мы замечаем: что-то не так. Эта идея известна давно, а в последние десятилетия получила серьёзные экспериментальные подтверждения. Не все нейробиологи принимают её во всей полноте, но в её основе лежит очень простое наблюдение: восприятие работает быстрее и экономнее, когда опирается на ожидания.

Поэтому мы так легко видим лица в облаках, в узорах на обоях, в розетке на стене. Лица для нас слишком важны, чтобы пропустить хоть одно. Мозг предпочитает ошибиться и увидеть лицо там, где его нет, чем не заметить его там, где оно есть.

Поэтому же иногда мы не видим того, что прямо перед нами. Тот, кто искал очки и нашёл их на собственной голове, знает, о чём я. Он смотрел туда много раз. Картинка была. Но ожидание подсказывало: очки не на голове. И мозг, послушно следуя прогнозу, не отмечал их присутствия.

Теперь представим, что вопрос «кто смотрит твоими глазами?» принадлежит не только философам. Допустим, ты спрашиваешь серьёзно. Кто именно рассматривает эту реконструированную картинку? Если сказать «ты сам», то придётся объяснить, что такое «ты сам». Если сказать «мозг», то получается, что мозг смотрит сам на себя. Если сказать «никто, это просто процесс», то остаётся вопрос, почему этот процесс сопровождается переживанием, а не идёт в темноте, как работа почек.

Здесь начинается загадка наблюдателя. Ранние философы представляли себе внутри головы маленького человечка, который смотрит на экран внутри. Но у такого человечка должны быть свои глаза, и свой маленький человечек, и так далее без конца. Идею давно отбросили, но она живёт в нашем языке. Мы говорим «я вижу», «я слышу», как будто есть некто, стоящий за глазами и ушами. Современная наука не нашла в мозге такого места. Нет центра, где всё сходится и где сидит наблюдатель. Есть множество процессов, работающих одновременно, и откуда-то из их согласованной работы появляется единое ощущение: «это я, и вот что я вижу».

Можно сказать так: наблюдатель не стоит у окна, а сам является частью того, что происходит в доме.

Это не отменяет самого вопроса, а делает его серьёзнее. Если наблюдатель не точка и не маленький человечек, то что это? Продукт работы нервной системы? Свойство некоторых

физических систем? Нечто, что нельзя свести ни к чему другому? В этой книге мы будем идти к ответу постепенно, и честно признаем: окончательного ответа сегодня нет ни у кого.

Но кое-что мы уже можем сказать. Между миром и тем, кто его воспринимает, существует работа. Огромная, незаметная, невероятно быстрая работа, которую выполняют миллиарды нейронов. Она не бывает прозрачной, потому что без неё не было бы вообще никакой картины. Каждый раз, когда ты видишь, слышишь, касаешься, ты участвуешь в процессе, который одновременно открывает и скрывает.

Открывает, потому что без него ты был бы слеп и глух. Скрывает, потому что он выбирает, что пропустить, что достроить, что усилить, а что отбросить как несущественное.

Когда ты в следующий раз закроешь один глаз и увидишь, как исчезает палец, вспомни: это не фокус и не сбой. Это просто редкий случай, когда ты поймал собственный мозг на аккуратной правке реальности. Таких правок бесконечно много. Мы просто не видим ни одной.

Глава 3. Когда физика перестала быть интуитивной

В начале девятнадцатого века французский математик Пьер-Симон Лаплас написал фразу, которую потом цитировали два столетия. Он предложил представить разум, способный в какой-то момент знать положения и скорости всех частиц во Вселенной и все силы, которые между ними действуют. Для такого разума, писал Лаплас, не осталось бы ничего неопределённого: будущее лежало бы перед ним так же ясно, как прошлое. Позже этот воображаемый разум стали называть демоном Лапласа.

Идея была не фантазией, а обобщением успеха. Ньютоновская механика к тому времени объяснила всё, что только можно было проверить. Движение планет, приливы, траекторию пушечного ядра, качание маятника. Если известно, где стоит тело и с какой скоростью движется, то будущее его положение можно вычислить. Мир напоминал огромные часы: сложные, но понятные. Достаточно разобрать механизм и посмотреть на шестерёнки.

Человек, воспитанный на такой картине, чувствует себя в мире уверенно. Случайность в ней лишь следствие нашего незнания. Монета падает орлом или решкой не потому, что в природе есть настоящая неопределённость, а потому, что мы не знаем всех условий броска. Если бы знали, предсказали бы без ошибки.

К концу девятнадцатого века многие физики полагали, что работа почти закончена. Историки науки любят приводить слова, которые приписывают разным учёным того времени: в физике остаётся лишь уточнять знаки после запятой. Достоверно ли они были сказаны именно так, спорят до сих пор. Но настроение эпохи передают верно. Здание казалось достроенным, оставалось лишь покрасить стены.

В 1900 году лорд Кельвин, один из самых уважаемых физиков своего времени, выступил с докладом, где назвал два «облачка» на ясном горизонте теоретической физики. Первое касалось странных результатов опытов по обнаружению эфира, воображаемой среды, в которой должен распространяться свет. Второе касалось того, как нагретые тела излучают энергию. Облачка казались мелкими, почти несущественными. Кельвин, вероятно, надеялся, что с ними удастся разобраться в ближайшие годы, не затрагивая основ.

Из первого облачка выросла теория относительности. Из второго квантовая механика.

Вот что бывает с мелкими несоответствиями. Они похожи на едва заметную трещину в фундаменте. Её можно замазать, а можно потянуть, и тогда окажется, что стена держалась на честном слове. Физики потянули.

Давай остановимся на втором облачке, потому что именно оттуда вырос квантовый мир. Загадка выглядела почти бытовой. Раскалённая печка светится красным, а при ещё большем нагреве становится жёлтой, а затем белой. Классическая физика предсказывала для излучения нагретого тела результат, который при высоких частотах уходил в бесконечность. Это означало бы, что любая тёплая печка должна мгновенно залить комнату смертельным излучением. Что-то в расчётах было не так. Опыт показывал аккуратную кривую, а теория давала абсурд.

Макс Планк, немецкий физик, в 1900 году нашёл способ свести концы с концами. Он предположил, что энергия излучается и поглощается не любыми количествами, а только порциями, пропорциональными частоте. Сам Планк относился к этому как к математическому трюку, а не как к открытию о природе. Он не хотел верить, что мир на самом деле дробится на порции. Но трюк работал. Формула совпала с опытом.

Дальше события развивались так, что оставалось только следить за ними с открытым ртом. Эйнштейн в 1905 году применил идею порций к свету и объяснил фотоэффект. Бор в 1913 году предположил, что электроны в атоме могут находиться только на определённых орбитах, и объяснил, почему атомы излучают свет только определённых цветов. В середине двадцатых годов Гейзенберг, Шрёдингер, Борн, Дирак и другие превратили набор догадок в

стройную математическую теорию. К 1927 году на пятом Сольвеевском конгрессе в Брюсселе собрались почти все её создатели. Фотография участников известна: Эйнштейн, Бор, Планк, Кюри, Гейзенберг, Паули, де Бройль и многие другие. Двадцать девять человек, семнадцать из которых получили или позже получили Нобелевские премии. Едва ли в истории науки есть другая комната, в которой собрано столько умов, перевернувших представления о мире.

И они спорили. Не о деталях, а о самом смысле того, что получилось. Эйнштейн и Бор вели свои знаменитые дискуссии за завтраками и ужинами, придумывая мысленные эксперименты, которые должны были поймать теорию на противоречии. Бор отвечал. Эйнштейн возражал снова. К счастью для историков, многие из этих споров сохранились в воспоминаниях участников.

Почему они так яростно спорили? Потому что квантовая механика работала поразительно хорошо и при этом никак не желала объяснять, о чём она на самом деле. Математика давала точные предсказания. Эксперименты подтверждали их с невероятной точностью. Но стоило спросить, что происходит между измерениями, как ответ становился неуловимым.

В классической физике шарик летит по траектории. В каждый момент у него есть положение и скорость, и мы можем их знать. В квантовой механике такой картины нет. Электрон описывается волновой функцией, которая позволяет вычислить вероятности разных результатов измерения. Что делает электрон между измерениями, теория ничего не говорит, или говорит так, что ответ зависит от выбранной интерпретации.

Это задевало самые глубокие интуиции. Эйнштейн, один из отцов квантовой теории, до конца жизни не мог принять, что в основе природы лежит случайность. Ему приписывают фразу о том, что Бог не играет в кости, и хотя точная формулировка в письмах чуть другая, смысл ясен: он был убеждён, что за вероятностями скрывается что-то более определённое. Бор отвечал, что не дело физиков указывать Богу, что ему делать. Лучше, чем в этой перебранке, не скажешь, насколько глубок был разрыв.

Мне особенно дорога одна деталь. Эти люди не были мистиками. Они были, наоборот, людьми строгого ума, воспитанными на классической физике и уважавшими её. Им самим результат казался странным. Гейзенберг в воспоминаниях рассказывал, что после долгих ночных споров с Бором в Копенгагене он выходил в парк и спрашивал себя: неужели природа действительно так абсурдна, как кажется нам в этих экспериментах? Они не искали странностей. Странность настигла их сама.

Именно поэтому квантовая физика не просто очередная теория. Она показала, что мир на фундаментальном уровне может быть устроен иначе, чем подсказывает наш опыт. И дело не в том, что у нас не хватает данных. Дело в том, что сама форма вопросов, к которой мы привыкли, перестаёт подходить. «Где находится частица?» Оказывается, не всегда есть ответ. «Что она делает, пока мы не смотрим?» Оказывается, что вопрос поставлен не так.

На этом месте многие читатели делают поспешный вывод: раз физика такая странная, значит, возможно всё. Раз частицы ведут себя необычно, значит, и в жизни действуют необычные законы. Это неверно, и я буду повторять это снова и снова. Квантовая теория не разрешает всё подряд. Она, напротив, одна из самых строгих и самых точных теорий в истории науки. Некоторые её предсказания проверены с точностью до десятка знаков после запятой. На ней работают лазеры, транзисторы, томографы, атомные часы. Без неё не работал бы ни телефон в твоём кармане, ни компьютер, на котором, возможно, ты читаешь эту книгу.

Странность не означает произвол. Скорее наоборот: чем страннее оказывался результат, тем жёстче были правила, которые его описывали.

И всё же чувство, которое испытали физики двадцатых годов, знакомо и нам. Мы живём в мире, где вещи остаются на своих местах, где предметы имеют определённую форму, а события следуют друг за другом в понятном порядке. Мы не готовы к тому, что у основания всего этого

лежит мир, который так не выглядит. Мы привыкли, что чем лучше знаешь, тем яснее картина. А тут вышло наоборот: чем глубже копали, тем больше вопросов.

Демон Лапласа не пережил этого открытия. Сегодня в рамках квантовой механики невозможно задать начальные условия настолько точно, чтобы вычислить будущее без остатка. Это не недостаток приборов. Это свойство самой теории. Позже мы разберём принцип неопределённости и поймём, что именно он утверждает и чего не утверждает. Пока достаточно одного: картина мира, в которой всё предопределено и ясно, перестала быть единственной серьёзной картиной.

Кельвин не мог знать, что два его облачка скоро превратятся в бурю. Но его слова остались как напоминание. Именно там, где всё кажется почти завершённым, чаще всего прячется самое интересное. Именно мелкое, неудобное, не вписывающееся в общую картину нередко оказывается тем самым краем, потянув за который можно распутать весь клубок.

Глава 4. Материя, которая оказалась не такой материальной

Положи ладонь на стол. Ощущение твёрдое, надёжное, не вызывающее вопросов. Ты не проваливаешься, рука не проходит насквозь, стол не прогибается, как желе. Это один из самых базовых опытов в жизни: вещество существует, оно плотное, оно сопротивляется.

А теперь сведения от физики. Если бы можно было увеличить атом настолько, чтобы его ядро стало размером с горошину, весь атом имел бы в поперечнике около километра. Ядро, в котором сосредоточена почти вся масса, составляет по размеру примерно одну стотысячную часть атома. Остальное, то есть почти весь объём, занимает пространство, в котором движутся электроны.

Звучит так, будто стол почти пустой. И в популярных книгах нередко именно так и пишут: материя на девяносто девять процентов пустота. Фраза красивая, но неточная, и пора разобраться, почему.

Начнём с истории, потому что она хороша. В начале двадцатого века господствовала модель атома, предложенная Дж. Дж. Томсоном: нечто вроде кекса с изюмом, где положительный заряд размазан по всему атому, а электроны вкраплены в него, как изюминки. В 1909 году Эрнест Резерфорд поручил своим помощникам, Гансу Гейгеру и Эрнесту Марсдену, обстреливать тонкую золотую фольгу альфа-частицами. Ожидали, что частицы будут пролетать сквозь фольгу, лишь слегка отклоняясь. Так и было почти всегда. Но изредка, примерно одна частица из многих тысяч, отскакивала назад. Резерфорд позже сравнивал это с тем, как если бы он выстрелил пятнадцатидюймовым снарядом в кусок папиросной бумаги, а снаряд вернулся и ударил его самого.

Единственное объяснение: в центре атома есть крошечное плотное ядро с положительным зарядом, которое и отбрасывает частицы назад. Вокруг ядра, на огромном по сравнению с ним расстоянии, находятся электроны. Так родилась планетарная модель атома, которую Бор вскоре дополнил квантовыми правилами.

Модель Бора вошла в учебники, и многие помнят картинку: ядро в центре, электроны по орбитам, как планеты. Но дальнейшее развитие квантовой механики показало, что и эта картинка слишком наивна. Электрон не движется по орбите, как спутник. У него нет определённой траектории. Вместо неё есть то, что физики называют орбиталью: область пространства, в которой электрон с определённой вероятностью может быть обнаружен. Правильнее представлять не точку на дорожке, а размытое облако, плотность которого в каждой точке говорит, насколько вероятно найти там электрон при измерении.

Да и слово «облако» не вполне честное, потому что мы привыкли, что облако состоит из множества мелких частиц. Электрон же один. Облако описывает не его размазанность в пространстве, а распределение вероятностей. Впрочем, не будем забегать вперёд, в главах о суперпозиции мы разберём это подробнее.

Итак, атом: крошечное ядро и электронное облако вокруг него. Что же тогда удерживает твою ладонь на столе? Если бы всё определялось одним только размером ядер, ладонь должна была бы проваливаться сквозь стол так же легко, как сквозь дым. Но она не проваливается.

Причин две. Первая — электромагнитное отталкивание. Электронные облака атомов в ладони и атомов в столе имеют одинаковый отрицательный заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга. Когда ты прижимаешь ладонь к столу, ты по сути не касаешься его в привычном смысле слова. Твои атомы никогда не соприкасаются с его атомами. Их электронные оболочки упираются друг в друга, и этого упора достаточно, чтобы ты чувствовал твёрдость.

Вторая причина тоньше. Она называется принципом запрета Паули, и по значению это одно из главных открытий двадцатого века. Он гласит, что два электрона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии. Попросту говоря, электроны не терпят тесноты. Когда ты пытаешься сжать вещество, электроны вынуждены занимать всё более высокие энергетические состояния, и это требует всё больше усилий. Именно запрет Паули не даёт материи схлопнуться, и именно он делает так, что стол твёрдый, а ты не сливаешься со стулом. Расчёты показывают, что без этого принципа вещество вообще не смогло бы существовать в привычном виде. Устойчивость окружающего нас мира опирается на правило, которое нельзя увидеть и которое не имеет аналога в повседневном опыте.

Поэтому твёрдость вещества на самом деле не свойство «плотно набитых шариков». Это результат работы электрических сил и квантовых правил. Твёрдость возникает из взаимодействия, а не из вещества как такового.

А теперь самый любопытный факт, из-за которого фраза про пустоту становится ещё менее убедительной. Протон и нейтрон, из которых состоит ядро, не являются неделимыми частицами. Каждый из них состоит из трёх кварков, связанных между собой так называемым сильным взаимодействием. Масса самих кварков удивительно мала: вместе они дают всего около одного процента массы протона. Откуда же остальное?

Ответ вытекает из знаменитой формулы Эйнштейна, связывающей энергию и массу. Основной вклад в массу протона вносит энергия движения кварков и энергия поля, которое их скрепляет. Иными словами, почти вся масса привычной материи, из которой состоим мы с тобой, это не масса «вещества» в наивном смысле, а энергия связи. Энергия взаимодействий, запертая в крошечном объёме. Если спросить, из чего сделана масса стола, правильный ответ будет не «из кусочков материи», а «из энергии, которая удерживает его части вместе».

Это вовсе не мистика, а один из самых проверенных результатов современной физики. Расчёты на суперкомпьютерах, основанные на теории сильного взаимодействия, уверенно воспроизводят массу протона. Но интуитивно это переворачивает привычную картину. Мы воображали, что где-то в самой глубине лежат твёрдые кирпичики, из которых всё построено. А на дне нашли поля, энергию, вероятности и правила.

Современная физика вообще осторожна в слове «частица». Электрон в квантовой теории поля рассматривается как возбуждение особого поля, пронизывающего всё пространство. Фотон — возбуждение электромагнитного поля. В этом языке «пустого места» в привычном смысле нет: даже в вакууме присутствуют поля, пусть и в низшем энергетическом состоянии. Вакуум не абсолютное ничто. Он обладает свойствами, которые измеряют и которые приводят к вполне наблюдаемым эффектам.

Но вернёмся к твоей ладони. Ты по-прежнему ощущаешь стол твёрдым, и это ощущение совершенно правильно. Оно сообщает тебе нечто действительно важное: рука не пройдёт сквозь столешницу. Наши чувства не врут, они просто работают на своём уровне описания. На этом уровне есть твёрдые предметы, есть жидкости, есть газы. Для практической жизни это самое нужное описание. Для понимания глубин природы оно оказывается лишь поверхностным слоем.

Удивительная, я бы сказала, вещь: поверхностный слой ведёт себя очень последовательно. Твёрдые предметы действительно ведут себя как твёрдые. Вода действительно течёт. Мир на привычном нам масштабе оказывается надёжным, хотя его основание зыбко. Как будто крепкий дом стоит на фундаменте, который сам по себе состоит из чего-то вроде музыки.

Последнее замечание о слове «материя». В обиходе оно означает нечто плотное, осязаемое, из чего сделаны предметы. В физике это слово давно утратило такую ясность. Что считать материей: частицы вещества, поля, энергию, пространство-время? Разные физики и философы отвечают по-разному. Для нашего разговора важно одно: самая простая идея о том, что мир состоит из маленьких твёрдых шариков, разбилась о собственные результаты науки.

И это снова не означает, что реальность иллюзорна. Это означает лишь, что она устроена тоньше и неожиданнее, чем подсказывали нам глаза и руки. Мы привыкли считать «настоящим» то, что можно потрогать. Физика предлагает пересмотреть эту привычку: возможно, настоящее то, что можно измерить и что воспроизводится вновь и вновь, пусть даже оно ни на что не похоже.

Глава 5. Мир за пределами человеческих чувств

В начале двадцатого века немецкий биолог Якоб фон Икскюль описал жизнь обыкновенного клеща. Ты, возможно, встречал его в траве или на лесной тропе: крошечное существо, которое неделями, а то и месяцами сидит на кончике ветки и ждёт. Ни глаз, ни слуха у клеща нет в привычном смысле. Весь его мир сведён к трём сигналам. Первый: запах масляной кислоты, которая выделяется с потом млекопитающих. Почуяв её, клещ разжимает лапки и падает вниз. Второй: тепло, около температуры тела. Если он упал на что-то тёплое, значит, добыча найдена. Третий: ощущение волосков и кожи, по которым нужно найти место, где можно впиться.

Вот и всё. Весь клещовый мир умещается в три признака, а остальное для него словно не существует. Икскюль назвал такой индивидуальный мир каждого вида словом «умвельт», то есть «окружающий мир», но понятый не как объективная среда, а как то, что доступно данному существу. Пространство, в котором живёт клещ, и пространство, в котором живёшь ты, это не одно и то же пространство, хотя они находятся в одном и том же лесу.

Первая реакция на такой рассказ, скорее всего, снисходительная: бедный клещ, до чего ограничен. Но стоит спросить себя, чем наш собственный умвельт принципиально отличается. Только богаче? Или тоже по-своему ограничен?

Начнём со зрения. Видимый свет составляет крошечный участок электромагнитного спектра, примерно от трёхсот восьмидесяти до семисот пятидесяти нанометров. Слева от него лежит ультрафиолет, справа инфракрасное излучение, за ними рентгеновские лучи, микроволны, радиоволны. Весь спектр простирается на огромное число порядков величины, а мы различаем буквально узкую щёлочку. Если бы электромагнитный спектр был клавиатурой рояля, мы слышали бы всего около одной октавы.

И всё остальное тем не менее существует и действует. Радиоволны проходят через твою комнату в эту секунду: от станций, роутеров, мобильных вышек. Инфракрасное излучение исходит от твоего собственного тела. Ультрафиолет обжигает кожу на пляже, хотя ты не видишь его. Всё это реально, всё это измеримо и совершенно недоступно непосредственному восприятию.

А между тем у других существ эта щёлочка сдвинута. Пчёлы видят в ультрафиолете. Цветы, которые нам кажутся однотонными, у них имеют сложный рисунок: тёмные центры, световые полосы, указатели, ведущие к нектару. Некоторые птицы тоже различают ультрафиолет, и оперение, которое для нас выглядит одинаковым, для них может сильно отличаться у самцов и самок. Змеи, относящиеся к ямкоголовым, воспринимают инфракрасное излучение с помощью специальных органов между глазом и ноздрёй и способны «видеть» тёплую добычу в полной темноте. У креветок-богомолов, по данным исследователей, в глазах от двенадцати до шестнадцати типов фоторецепторов, против наших трёх, хотя это вовсе не значит, что они различают оттенки лучше нас: механизм у них другой, и учёные до сих пор спорят, зачем им столько.

Со слухом та же история. Человек слышит примерно от двадцати герц до двадцати тысяч герц, причём с возрастом верхняя граница опускается. Летучие мыши ориентируются в ультразвуке, который для нас беззвучен. Слоны общаются инфразвуком, и их низкие сигналы разносятся на километры. Собака слышит свист, которого ты не замечаешь. Мир звуков вокруг тебя гораздо шире, чем тот, который ты можешь воспринять.

Дальше интереснее. Есть чувства, которых у нас нет вообще. Акулы и некоторые рыбы воспринимают слабые электрические поля живых существ. Утконос находит добычу под водой по электрическим сигналам мышц. Многие перелётные птицы, как показывают эксперименты, каким-то образом чувствуют магнитное поле Земли и используют его при навигации. Как

именно, до сих пор не вполне ясно. Среди популярных гипотез есть та, что связывает это с особыми светочувствительными белками в сетчатке птиц, в которых магнитное поле влияет на квантовые состояния электронов. Гипотеза интригующая и ещё проверяется, поэтому говорить об окончательном ответе рано. Но сам факт, что птицы ориентируются по магнитному полю, подтверждён множеством опытов.

Представь, что это значит. Магнитное поле Земли существует вокруг тебя и проходит сквозь твоё тело в каждый момент жизни. Ты его не чувствуешь, а птица, возможно, чувствует. Пока она летит над облаками, оно для неё, видимо, нечто вроде постоянного фона, подобного тому, как для тебя фон создаёт сила тяжести.

Можно сказать, что в мире существует гораздо больше, чем способно заметить любое отдельное существо. Каждое живое создание воспринимает не мир, а свой кусочек мира, вырезанный эволюцией под его нужды. Этот кусочек не случаен: он соответствует тому, что нужно для выживания и размножения именно данному виду. Для тебя важны лица, голоса, расстояния, цвета спелых плодов. Для клеща — масляная кислота и тепло. Для летучей мыши — эхо. Всё остальное просто не попадает в зону внимания.

Мне нравится, как об этом написал философ Томас Нагель в известной статье 1974 года «Каково это — быть летучей мышью?». Он предположил, что мы можем знать всё о нервной системе летучей мыши, о том, как она работает, как эхолокация преобразуется в нервные сигналы, и всё равно не узнаем, каково это на самом деле — воспринимать мир таким способом. Субъективный опыт другого существа остаётся недоступным, даже если мы изучили всю его физиологию. К этой статье мы вернёмся, когда заговорим о сознании.

Но вот что важно для нашего разговора. Если у каждого вида свой умвельт, возникает вопрос: чей из них правильный? Увы, такая постановка вопроса неверна. Нет «правильного» умвельта. Есть множество возможных способов взаимодействовать с одним и тем же миром, и каждый из них что-то улавливает и о чём-то умалчивает.

Человек, однако, сделал нечто необычное. Мы построили приборы, которые расширяют наши чувства. Телескопы позволяют видеть свет, пришедший от далёких галактик. Радиотелескопы улавливают сигналы, невидимые глазу. Микроскопы раскрывают мир клеток и вирусов. Детекторы регистрируют частицы, пролетающие сквозь тело в каждую секунду. Рентгеновский аппарат показывает кости. Гравитационные детекторы, как LIGO, в 2015 году впервые зарегистрировали рябь пространства-времени от слияния двух чёрных дыр, случившегося больше миллиарда лет назад.

Каждый такой прибор можно считать искусственным органом чувств. И каждый раз, когда создавали новый, открывался мир, о существовании которого никто не подозревал. Рентгеновские лучи были открыты в 1895 году, и через несколько месяцев врачи уже делали снимки. До того в человеческом опыте не было ни малейшего намёка на то, что сквозь тело можно «заглянуть». Космическое микроволновое излучение, реликтовый отзвук ранней Вселенной, нашли в 1960-х почти случайно, когда двое инженеров пытались избавиться от шума в антенне.

Каждый раз оказывалось, что реальность богаче, чем мы думали. И каждый раз казалось, что теперь-то мы знаем всё. И каждый раз ошибались.

Есть ли у этого процесса предел? Есть ли такая часть реальности, которую мы принципиально не сможем воспринять никакими приборами? Это серьёзный философский вопрос, на который нет единого ответа. Некоторые мыслители считают, что нет ничего в принципе недоступного познанию. Другие уверены, что у нашего разума есть собственные границы, как у собаки есть границы понимания математики. Собака никогда не поймёт теорему, и дело не в лени, а в устройстве её мозга. Возможно, и мы чего-то не поймём из-за устройства собственного.

Я не знаю, кто прав. Но мысль об этом заставляет по-новому смотреть на привычное. Когда ты выходишь утром во двор, тебе кажется, что перед тобой весь мир. А перед тобой лишь тот его кусочек, который удобен для существа вроде тебя. Рядом, невидимые, текут радиоволны, шелестит ультразвук, пролетают нейтрино, светятся инфракрасные тела. Всё это там. Просто не для тебя.

Но иногда, когда очень внимательно прислушиваешься, начинает казаться, что граница твоего восприятия не стена, а занавес. Он не прозрачный, но и не глухой. И если потянуть за край, можно заглянуть.

Глава 6. Иллюзия непрерывности

Кино — это обман, на который мы соглашаемся добровольно. Когда ты смотришь фильм, перед тобой не движущаяся картина, а быстрая смена неподвижных кадров. В классическом кино их двадцать четыре в секунду. Каждый кадр на экране замирает, затем исчезает на мгновение темноты, затем сменяется следующим. Если бы ты мог видеть все эти паузы, ты бы видел мерцающую вереницу картинок. Но ты видишь плавное движение, живых людей, дождь, танец.

Почему так? Потому что зрительная система работает не как идеальный регистратор. Ей требуется некоторое время, чтобы обработать вспышку света, и если новые вспышки приходят достаточно быстро, они сливаются. Это называют слиянием мельканий. Порог зависит от яркости, от размера изображения, от того, в какой части поля зрения оно находится, и в среднем лежит где-то около нескольких десятков кадров в секунду. Выше этого предела мерцание исчезает, и мы воспринимаем свет как непрерывный.

Лампочка в твоей комнате тоже мерцает. Если питание от сети переменное, то яркость обычной лампы накаливания слегка меняется с частотой сети, а у некоторых светодиодных ламп мерцание заметно сильнее. Мы этого не замечаем, но камера смартфона иногда ловит тёмные полосы на экране, когда снимает монитор. Глаз сглаживает. Камера не умеет.

В этом есть тонкая мысль: непрерывность может быть свойством нашего восприятия, а не свойством самого мира. Мир способен идти дискретными толчками, но мы этого не заметим, потому что наш прибор слишком медлителен.

С временем та же история. Субъективное «сейчас» не мгновение, а короткий отрезок. Психологи говорят о том, что окно настоящего длится порядка нескольких сотен миллисекунд, а иногда и до пары секунд. Именно в нём мы слышим мелодию как мелодию, а не как набор отдельных нот. Когда ты слышишь фразу, начало слова ещё удерживается в сознании, пока доносится его конец. Если бы не было этой «растянутой» современности, мы воспринимали бы только отдельные звуки, и речь превратилась бы в хаос.

Немного странно, но то, что мы называем настоящим, всегда немного опаздывает. Сигналу от сетчатки нужно дойти до зрительной коры, а оттуда до других областей мозга. Свет от лампы приходит почти мгновенно, а звуку нужно время, чтобы пройти по воздуху, и сигналы от разных органов чувств обрабатываются с разной скоростью. И всё же мы воспринимаем событие, например хлопок в ладоши, как единое целое: видим и слышим одновременно. Мозг подгоняет, синхронизирует, склеивает. Он создаёт ощущение, что всё происходит сейчас и вместе, хотя в действительности «сейчас» собирается из разрозненных кусочков с небольшими задержками.

Теперь перенесёмся с уровня наших ощущений на уровень вещества. Сколько ни вглядывайся в металлический брусок, он выглядит сплошным. Любая поверхность кажется гладкой. Вода течёт как единая масса. Воздух ощущается как непрерывная среда. Но с точки зрения физики всё это не так. Вещество состоит из атомов, между которыми существуют промежутки. Вода состоит из молекул. Воздух состоит из молекул, которые носятся со скоростью несколько сотен метров в секунду и сталкиваются друг с другом миллиарды раз в секунду.

Привычная непрерывность оказывается результатом усреднения. Когда частиц очень много, их индивидуальные движения сглаживаются, и мы наблюдаем лишь общее поведение: давление, температуру, плотность. Эти понятия имеют смысл только для больших ансамблей. У одной молекулы нет температуры в привычном смысле слова. Температура рождается из хаоса многих.

Для физики девятнадцатого века такое объяснение было вызовом. Многие серьёзные учёные сомневались, существуют ли атомы вообще. Знаменитый физик и философ Эрнст Мах отказывался верить в них, пока их нельзя увидеть. Спор продолжался до начала двадцатого

века, и только работа Эйнштейна 1905 года о броуновском движении, подкреплённая опытами Жана Перрена, убедила большинство, что атомы реальны. Мельчайшие частицы пыльцы, дрожащие в воде, оказались следствием ударов невидимых молекул. Непрерывная жидкость на глазах превратилась в рой.

Квантовая механика сделала следующий шаг. Она показала, что дискретность свойственна не только веществу, но и самой энергии, и многим другим величинам. Энергия электрона в атоме не может принимать любые значения, а только определённые, как ступеньки лестницы между этажами. Свет поглощается и излучается порциями, которые называют квантами. Это не метафора, а описание того, что измеряют в лаборатории.

Почему же мы не замечаем этих порций в повседневной жизни? Потому что постоянная Планка, определяющая размер кванта, ничтожно мала. Она порядка десяти в минус тридцать четвёртой степени в тех единицах, которые используются в физике. Попросту говоря, для крупных тел порции так малы, что неразличимы. Покачивание маятника в часах тоже, строго говоря, происходит квантованными порциями энергии, но размер каждой порции настолько мал по сравнению с полной энергией маятника, что картина кажется плавной.

Можно сравнить с песчаным пляжем. С самолёта он выглядит сплошной жёлтой полосой. Только вблизи видно, что он состоит из зёрен. Квантовая природа мира похожа на зёрна, которые различимы лишь при достаточном увеличении.

Нужно быть осторожным, чтобы не перескочить от этого к утверждению, что вообще всё в мире дискретно. Это неверно, и я обязана здесь остановиться. Некоторые величины в квантовой механике действительно принимают лишь отдельные значения. Но положение частицы, например, обычно описывается непрерывно. А вот вопрос о том, дискретны ли пространство и время на самом малом масштабе, остаётся открытым. Существуют гипотезы, в которых на масштабе, примерно в миллиарды миллиардов раз меньшем размера ядра, они имеют зернистую структуру. Но экспериментальных доказательств этого нет, и серьёзные учёные осторожны в таких утверждениях. Не стоит принимать красивую гипотезу за открытие.

Вернёмся к главной мысли. Наш опыт непрерывности имеет разные источники. Часть из них лежит в нас: инерционность зрения, склеивание времени, работа памяти. Часть находится в самом мире: усреднение огромного числа микроскопических событий. Но и то и другое объединено одним свойством: мы воспринимаем итог, а не процесс.

Если тебе когда-нибудь случалось смотреть на сверхзамедленную съёмку, ты знаешь, какое это странное чувство. Падающая капля воды превращается в корону, разбитый бокал распадается на отдельные осколки, лопнувший шарик раскрывается, как цветок. Всё это происходит вокруг тебя постоянно, просто слишком быстро для глаза. Мир намного богаче событиями, чем мы можем разглядеть.

А при ускоренной съёмке происходит обратное. Распускающийся цветок, облака, плывущие по небу, рост кристалла. Мы видим жизнь, которая обычно слишком медленна, чтобы её заметить. Две эти технологии показывают, что обычный темп восприятия всего лишь один из множества возможных. У мухи, например, частота слияния мельканий выше, чем у человека, и мир для неё, вероятно, течёт медленнее. Поэтому поймать её так трудно: ей наша рука кажется движущейся как в замедленном кино.

Любопытно, что и у людей чувство времени не постоянно. В минуты опасности многие рассказывают, что всё как будто замедляется. Исследования показывают, что дело, возможно, не в самом восприятии, а в памяти: в стрессовой ситуации мозг записывает события подробнее, а потом, вспоминая, мы оцениваем время по количеству запомненных подробностей и считаем, что оно тянулось дольше. Это один из примеров, как сложно отделить, что мы действительно ощущаем, от того, что мы потом об этом думаем.

Поэтому когда ты в следующий раз почувствуешь, что день тянулся бесконечно или пролетел мгновенно, вспомни, что время, которое ты переживаешь, и время, которое показывают часы, не обязаны совпадать. Одно измеряется механизмом, другое возникает внутри тебя.

Это не недостаток. Скорее, замечательное свойство. Благодаря сглаживанию мы можем следить за мелодией, понимать речь, ловить мяч, водить машину. Плавный поток нужен нам, чтобы действовать. Но за плавностью всегда стоит зернистая, прерывистая, вероятностная ткань, которую приходится открывать с помощью приборов и математики, а не просто глядя вокруг.

Глава 7. Можно ли доверять собственным глазам?

В 1889 году немецкий психиатр и социолог Франц Мюллер-Лайер опубликовал рисунок, который с тех пор не сходит со страниц учебников психологии. Две горизонтальные линии одинаковой длины. На концах первой нарисованы стрелки, острые углы которых направлены наружу, на концах второй те же стрелки повёрнуты внутрь. Первая линия выглядит короче, вторая длиннее. Возьми линейку и убедишься, что они равны. Потом отложи линейку и посмотри снова. Линии опять разные.

Вот что поражает: знание не помогает. Ты теперь знаешь, что линии равны, но зрительная система продолжает показывать иллюзию. Знание живёт в одном месте мозга, а восприятие в другом, и первое не может отменить второе. Иллюзия сильнее убеждения.

Это едва ли не самое важное, что нужно усвоить о зрении. Мы воспринимаем не то, что есть, и даже не то, что думаем. Мы воспринимаем то, что нам выдаёт зрительная система, а она работает по собственным правилам.

Давай разберём ещё один пример, из тех, которые я люблю больше всего. В 1995 году американский учёный Эдвард Адельсон показал картинку с шахматной доской, на которой лежит цилиндр, отбрасывающий тень. Две клетки отмечены: одна в тени, другая на свету. Клетка на свету выглядит тёмной, а клетка в тени светлой. Всем очевидно, что они разные. А на самом деле они абсолютно одного серого цвета. Если вырезать их из картинки и положить рядом, невозможно поверить, что это одно и то же. Многие протирают глаза и думают, что их обманывают. Их не обманывают, если речь о яркости пикселей на экране. Но зрительная система решает другую задачу: она старается определить не количество света, пришедшего в глаз, а настоящий цвет поверхности, независимо от освещения. Раз клетка находится в тени, мозг «знает», что на самом деле она светлее, чем кажется, и вычитает тень. В результате клетка воспринимается светлой, хотя свет от неё идёт такой же, как от тёмной клетки на солнце.

И в этом смысле глаза не обманывают. Они делают то, для чего созданы: выясняют свойства предметов, а не яркость световых пятен. Иллюзия возникает только тогда, когда мы просим их выполнить задачу, для которой они не предназначены.

Эту же мысль подтвердила история с платьем, которая в феврале 2015 года взбудоражила интернет. Фотография платья, на которой одни люди видели бело-золотой цвет, а другие сине-чёрный. Спорили друзья, семьи, редакции. Каждый был абсолютно уверен, что видит правильно, и не мог понять, как другие могут видеть иначе. Последующие исследования показали, что дело, скорее всего, в том, как мозг каждого человека по-разному оценивает освещение на фотографии. Одним кажется, что платье освещено тёплым светом, и они мысленно вычитают жёлтый оттенок. Другим кажется, что платье в холодной тени, и они вычитают синеву. Исходные пиксели одни и те же. Различаются предположения мозга.

Это один из редких случаев, когда можно прямо увидеть, как восприятие зависит от скрытых допущений. Допущения эти мы не выбираем, они выросли из нашего опыта и работают без нашего участия.

Есть ещё одна группа явлений, не менее тревожная. Это случаи, когда мы не видим того, что находится прямо перед глазами. В 1999 году психологи Дэниел Саймонс и Кристофер Шабри провели эксперимент, который теперь знают даже те, кто никогда не читал о психологии. Участникам показывали видео, на котором две команды в чёрных и белых майках перебрасывают друг другу баскетбольные мячи. Задача была простой: считать передачи мяча игроками в белом. В середине видео на площадку выходил человек в костюме гориллы, останавливался посередине, бил себя в грудь и спокойно уходил. Он находился в кадре около девяти секунд. Примерно половина участников его вообще не заметила.

Когда им потом показывали запись и говорили, что там была горилла, многие не верили. Просили показать видео ещё раз, думая, что экспериментаторы подменили плёнку. Это явление называют слепотой по невниманию. Оно показывает, что видеть нашими глазами и осознавать увиденное не одно и то же. Свет попадает на сетчатку, сигнал идёт в мозг, но если внимание занято другим, объект может остаться за пределами сознательного опыта.

Соседнее явление называют слепотой к изменениям. В одном из известных опытов экспериментатор останавливал прохожего и спрашивал дорогу. Пока прохожий объяснял, двое рабочих с большой дверью проходили между ними, и в этот момент экспериментатор подменялся другим человеком, другого роста, в другой одежде. Заметно меньше половины прохожих замечали подмену. Они продолжали объяснять дорогу, не отметив, что перед ними уже другой человек. Нужно сказать, что результаты зависят от условий: когда подмена происходила между людьми одной социальной группы, замечали ещё реже. Мы запоминаем не лицо, а роль: человек, который спрашивает дорогу.

Эти опыты разрушают одну из наших самых стойких иллюзий: что мы видим полную, подробную картину мира в каждый момент. На самом деле мы видим лишь то, на что направлено внимание, а остальное достраиваем по ожиданиям. Ощущение, что вокруг всё чётко видно, как мы уже говорили, сопровождается лишь верой в это.

На этом месте нетрудно впасть в другую крайность: решить, что глаза нельзя вообще ни в чём доверять, что реальность неуловима, а значит, всё относительно. Но это такая же ошибка, как наивная вера. Зрение вовсе не фабрика обмана. В огромном большинстве случаев оно работает отлично и сообщает правдивую информацию о мире: расстояния, формы, движение, знакомые лица. Иначе наши предки не доживали бы до потомства.

Иллюзии интересны именно тем, что они редки. Они возникают на краях, при искусственно созданных условиях, которых в природе почти не бывает: когда рисунок специально придуман, чтобы запутать. Это как проверка прочности материала, при которой его доводят до разрушения. Мы узнаём, как он устроен, именно в точке поломки.

Важнее другое. Научный метод возник как ответ на ненадёжность чувств. Когда Галилей навёл телескоп на небо, ему сначала не поверили: мол, стёкла искажают картину, и в трубе видно то, чего нет на небе. Галилею пришлось доказывать, что прибор показывает реальные вещи, а не артефакты. Для этого он сравнивал наблюдения, повторял измерения, показывал другим людям. Всё то, что мы называем научным методом, во многом сводится к одному: как сделать так, чтобы результат не зависел от того, кто смотрит.

Эксперименты повторяют в разных лабораториях. Измерения сверяют разными приборами. Данные записывают, а не доверяются памяти. Статьи читают конкуренты, у которых есть все основания искать ошибки. Всё это своего рода защита от самих себя, от тех самых скрытых допущений, которые подсказывает нам привычное зрение и привычное мышление.

И вот здесь возникает вопрос, к которому ведёт вся эта часть книги. Если наши органы чувств так ограничены, а мозг так склонен достраивать, откуда мы вообще знаем, что наука видит реальность точнее? Ответ, как мне кажется, в том, что наука не заменяет органы чувств, а расширяет их, и расширяет так, чтобы проверка была возможна. Любой желающий, имея ту же аппаратуру, может получить тот же результат. Совпадение результатов у множества независимых людей не гарантия истины, но очень веский довод в её пользу.

То, что не зависит от конкретного наблюдателя и воспроизводится, мы называем объективным. Но обрати внимание, что слово «объективный» здесь означает не «не требующий наблюдателя», а «не зависящий от того, кто именно наблюдает». Разница огромна. Можно проводить измерения без привязки к личности экспериментатора и всё равно признавать, что измерение предполагает прибор, взаимодействие, условия опыта. Об этом мы будем говорить очень много.

Пока же запомни простую вещь. Иллюзия Мюллера-Лайера не исчезает, даже если ты знаешь, что линии равны. Но знание позволяет взять линейку. И в этом, пожалуй, заключается вся история познания: мы не можем отменить собственные ограничения, но мы можем придумать, как их обойти.

Глава 8. Реальность до того, как мы её назвали

В русском языке есть два слова для синего цвета: «голубой» и «синий». Мы настолько привыкли к этому, что не замечаем странности. Но носителям многих других языков такое деление покажется необычным: в английском, например, оба оттенка обычно называют одним словом «blue», и чтобы различить светлый и тёмный, нужно добавлять уточнение. Для русского уха «голубой» и «синий» разные цвета, а не просто светлая и тёмная версии одного. Мы скажем, что это очевидно, как красный и розовый.

В 2007 году группа американских психологов под руководством Иокаса Виневера провела любопытное исследование. Они показывали участникам три квадрата разных оттенков синего и просили определить, какой из двух нижних совпадает по цвету с верхним. Выяснилось, что русскоязычные участники справляются заметно быстрее, когда два оттенка относятся к разным нашим словам, то есть один «голубой», а другой «синий». У англоговорящих такого преимущества не обнаружили. Разница исчезала, если участникам давали параллельное задание, мешавшее проговаривать слова про себя. Получается, что язык влияет не на само различение цветов глазом, а на скорость, с которой мозг это различение делает.

На этом примере я хочу задержаться, потому что вокруг него легко нагромоздить лишнего. Это не доказательство того, что язык определяет мышление целиком. Подобные идеи, известные как гипотеза лингвистической относительности, переживали и взлёты, и падения. Сильная версия, согласно которой люди не могут думать о том, для чего у них нет слов, не нашла подтверждения. Слабая версия, по которой язык способен слегка сдвигать внимание и ускорять некоторые различения, подтверждается всё чаще. Результаты скромные, но реальные.

Что же тогда происходит, когда мы называем вещи? Начнём с самой простой истории. Ты идёшь по лесу и видишь дерево. Это берёза. Рядом другая, это тоже берёза. Они не одинаковы: одна выше, другая кривее, у третьей отвалилась кора. И всё же мы без раздумий говорим «берёза». Мы сразу объединили разное в одно.

Как это работает? Мозг не хранит каждое увиденное дерево отдельным файлом. Он строит категории, из которых затем собирает опыт. Категория «берёза» вбирает множество экземпляров и позволяет мгновенно узнавать новые, даже никогда не виденные. Без такой способности мир превратился бы в бесконечный поток неповторимых впечатлений, в котором нельзя ориентироваться.

Проблема только в том, что границы категорий не всегда проходят там, где их проводит природа. Возьмём простой вопрос: чем гора отличается от холма? Какой высоты должна быть возвышенность, чтобы называться горой? В разных странах и в разные времена ответы различались. В Британии когда-то существовало определение, по которому гора начиналась от тысячи футов. Подобные границы удобны, но произвольны. Нет такой точки, где природа сама объявляет, что вот здесь заканчивается холм и начинается гора.

То же касается цветов. В 1969 году антропологи Брент Берлин и Пол Кей опубликовали исследование, из которого следовало, что в языках мира цветовые категории выстраиваются в определённом порядке. Сначала появляются слова для тёмного и светлого, потом для красного, затем для зелёного или жёлтого, и так далее. Позднее выводы уточняли и оспаривали, но сам факт интересен: между языками есть закономерность, значит, у нас есть общая биологическая основа, на которой культура строит разные здания. Спектр непрерывен, а цветов в нём ровно столько, сколько мы решили выделить.

И в биологии картина не проще. Мы привыкли думать, что виды живых существ существуют в природе как чёткие группы: вот собаки, вот волки, вот лисы. Но чем внимательнее биологи изучали живое, тем сложнее оказывалось провести границу. Некоторые виды скрещиваются между собой и дают плодовитое потомство. Некоторые популяции постепенно перехо-

дят друг в друга на огромных территориях, так что соседние особи похожи и способны скрещиваться, а крайние уже нет. Есть кольцевые виды, где цепочка популяций замыкается, и крайние звенья, встречаясь, друг друга не признают. Биологи до сих пор спорят о самом понятии вида, и существует несколько десятков определений.

Это не говорит о том, что видов нет. Мы действительно легко отличаем лошадь от зебры. Но чёткие границы, которые мы рисуем в учебниках, во многом результат нашей потребности в порядке. Природа, вероятно, устроена более текуче.

Есть слова, которые сначала выглядят описаниями, а на деле уже интерпретации. «Сорняк» не ботанический термин, а оценка: растение, растущее там, где мы его не хотим. «Вредитель» не научная категория, а точка зрения человека. «Мусор» то, что нам не нужно. Ничто в молекулярном составе картофельной шкурки не говорит о том, что это мусор, пока кто-нибудь не решит, что она ему не нужна.

Мне кажется, самое интересное начинается там, где слова рождаются у нас на глазах. В конце двадцатого века в Никарагуа появилось сообщество глухих детей, которых собрали в школы, не имевшие общего жестового языка. Дети начали общаться жестами, придумывая их на ходу, и за несколько поколений у них сложился самостоятельный язык со своей грамматикой, ныне называемый никарагуанским жестовым языком. Каждое новое поколение детей делало его более структурированным. Это один из редких случаев, когда мы можем наблюдать, как язык возникает практически с нуля. Дети не получили мир уже разложенным по полочкам. Они сами создали полочки.

Но что было до этого? Существовали ли сами различия, пока не появились слова для них? Нужно очень осторожно ответить на этот вопрос, чтобы не скатиться в крайности. С одной стороны, мир не сводится к нашим названиям. Камень существует независимо от того, называем ли мы его камнем. Гора не растворится, если мы забудем слово «гора». С другой стороны, форма, в которой мы воспринимаем и обсуждаем мир, сильно зависит от наших слов и понятий. Мы разрезаем действительность на части, и разрезы проходят там, где нам удобно.

Есть старый образ, который приписывают Платону: хороший мясник рассекает тушу по естественным суставам, а не рубит как попало. Философы до сих пор спорят, есть ли в природе такие естественные суставы, по которым наши понятия должны проходить, или мы везде режем по-своему. Скорее всего, правда посередине. Некоторые разрезы удобнее других, потому что они совпадают с реальным устройством мира: например, различие между живым и неживым или между веществами с разными атомными номерами. Другие разрезы условны: границы стран, градация возрастов, «взрослый» и «ребёнок».

А теперь представь, что квантовая физика предлагает ещё одну сложность. Она ставит под вопрос саму идею, что у вещей всегда есть чёткие свойства, независимые от наших действий. Электрон не «красный» и не «зелёный», не «здесь» и не «там», пока мы не поставили определённый вопрос. Мы вернёмся к этому в следующей части, но уже сейчас можно уловить родство мыслей. Реальность, описанная физикой, не набор вещей с готовыми этикетками. Этикетки появляются в процессе взаимодействия.

Осторожнее: это не значит, что мы сами создаём мир, называя его. Но это значит, что между «миром до слов» и «миром со словами» лежит работа, и работа эта наша. Каждый язык, каждая наука, каждая культура предлагает свою сетку координат. Некоторые сетки работают лучше других, и в этом смысле одни описания точнее. Но всех их объединяет одно: они накладываются на реальность, а не растут из неё сами собой.

Когда ты в следующий раз скажешь «это просто стул», задумайся на секунду, сколько тут человеческого. Форма, функция, слово, культурный опыт, привычка сидеть. Собственно сам предмет, существующий независимо от наших представлений, остаётся где-то в глубине, и мы воспринимаем его через плотную вуаль смыслов.

Глава 9. Карта — не территория

В конце девятнадцатого века английский писатель Льюис Кэрролл, автор «Алисы в Стране чудес», написал менее известную книгу «Сильви и Бруно». Один из её героев рассказывает о картографах далёкой страны, которые постепенно делали свои карты всё подробнее. Сначала масштаб был один к шести дюймам на милю, потом один к шести ярдам, потом один к ста ярдам. Наконец они решились на самое большое: карту в масштабе одной мили к одной миле. «Её ни разу не разворачивали, — жалуется рассказчик. — Фермеры возражали: она закроет собою всю страну и заслонит солнце. Теперь мы пользуемся самой страной, как своей картой, и уверяю вас, она подходит почти так же хорошо».

Почти на полвека позже аргентинский писатель Хорхе Луис Борхес написал крошечный рассказ о том, как картографы империи составили карту, по размеру равную самой империи. Следующие поколения решили, что такая карта бесполезна, и бросили её на произвол солнца и непогоды, и в пустынях Запада, говорит Борхес, ещё сохранились обрывки этой карты, которыми пользуются нищие и животные.

Это остроумные истории, но они о серьёзном. Карта имеет смысл именно потому, что она не равна территории. Подробная карта, отражающая всё до последней травинки, ничем не лучше самой местности и не помогает ориентироваться. Хорошая карта потому и хороша, что что-то опускает. Она оставляет дороги и реки, но убирает отдельные камни. Она выбирает, что показать, исходя из того, для чего её будут использовать.

Фразу «карта не есть территория» обычно связывают с польско-американским учёным Альфредом Коржибски. Он произнёс её в 1931 году на докладе в Нью-Орлеане, а позднее развил в книге «Наука и здравомыслие». Коржибски хотел сказать, что наши слова, понятия, теории — это карты, а не сама реальность, и многие человеческие беды происходят от того, что мы принимаем одно за другое. Мы начинаем спорить о названиях так, будто спорим о самих вещах. Мы путаем описание с описываемым, ярлык с содержимым.

Мысль простая, а следствия у неё глубокие.

Вот, например, физика. Любая физическая теория, по сути, карта. Она описывает определённую область явлений определённым языком и с определённой точностью. Ньютоновская механика — отличная карта для движения тел с обычными скоростями и размерами. Но стоит выйти за её пределы, например в мир скоростей, близких к скорости света, или в мир атомов, и карта перестаёт соответствовать местности. Это не значит, что она «неправильная». Просто это карта для другой территории.

Теория относительности нарисовала новую карту для больших скоростей и сильных гравитационных полей. Квантовая механика — для малых масштабов. Обе показывают на удивление точные результаты. Но когда физики пытаются совместить их в единой картине, возникают трудности. Теории, которые прекрасно работают порознь, пока не удаётся свести в одну. Это значит, что обе карты неполны и, возможно, есть более общая, из которой они обе вытекают как частные случаи.

Можно встретить и такую точку зрения, что тот, кто придерживается слишком долго одной карты, начинает принимать её за мир. История науки полна таких примеров. Физики девятнадцатого века искали эфир, потому что их карта требовала среды для распространения волн. Когда оказалось, что эфира нет, карту пришлось перерисовать.

Любопытно, что и модель атома, о которой мы говорили в четвёртой главе, ясно показывает эту же закономерность. Планетарная модель Бора — красивая карта, но на ней электроны вращаются по орбитам. Дальнейшая квантовая механика показала, что орбит нет, а есть вероятностные облака. Но модель Бора не выбросили. Она до сих пор помогает школьникам понять, почему атомы излучают свет определённых цветов. Она хороша там, где нужна, и плоха там,

где не нужна. Любая модель похожа на костыль: пока идёшь по знакомой дороге, он выручает, а на льду может подвести.

Это ещё важнее, когда речь заходит о нашем собственном внутреннем мире. Мы тоже носим в голове карты. Карту самого себя: кто я, на что способен, что мне доступно. Карту других людей: что они обо мне думают, чего хотят, какие у них намерения. Карту мира: что опасно, что безопасно, что возможно, что нет. Эти карты складывались годами, из опыта, из слов родителей, из книг, из пережитого. Они нам очень нужны, потому что без них мы бы вообще не ориентировались.

Но иногда карта, нарисованная в детстве, остаётся с нами, когда местность давно изменилась. Человек, которого когда-то высмеивали за ошибки, продолжает бояться любого выступления перед людьми, хотя вокруг давно другая жизнь. Человек, выросший в нестабильной обстановке, ожидает подвоха там, где его нет. Это не глупость и не слабость. Это старая карта, которая когда-то спасала.

Терапия, в сущности, часто занимается тем, что помогает человеку заметить: вот карта, а вот местность. Не отвергнуть карту, а сверить её с тем, что на самом деле вокруг.

Вернёмся к науке. Здесь есть ещё одна тонкость, на которую часто не обращают внимания. Когда мы говорим, что теория описывает реальность, возникает искушение считать, что элементы теории буквально соответствуют элементам мира. Раз в формуле стоит волновая функция, значит, в мире есть волновая функция, раз есть поле, значит, где-то там существует поле, подобное этому. Но физики по-разному относятся к такой «буквальности». Для одних математический аппарат отражает реально существующие объекты. Для других он всего лишь инструмент, позволяющий делать предсказания, а вопрос о том, что «на самом деле» стоит за формулами, не имеет смысла или недоступен для ответа.

Споры между такими позициями ведутся уже сто лет. И дело не в упрямстве. Квантовая механика уникальна тем, что её уравнения ясны и результаты точны, а вот что они говорят о мире, остаётся предметом разногласий. Разные интерпретации квантовой механики дают разные карты одной и той же территории. Все они согласуются со всеми известными экспериментами, но рисуют разные картины того, что происходит. Подробнее мы разберём это в третьей части.

Пока же я хочу, чтобы ты запомнил один простой навык: всякий раз, когда слышишь категоричное «на самом деле», спрашивай себя, о карте идёт речь или о территории. Когда кто-то заявляет, что наука доказала то-то и то-то, уточни: что именно измерили, а что истолковали? Эксперимент показал определённый результат. Теория объясняет этот результат определённым образом. А то, что говорят потом в популярных статьях, нередко уже третий слой: красивая карта карты.

Поэтому внимательный читатель отличается от наивного тем, что умеет держать в голове два слоя. Есть то, что наблюдают. Есть то, как это объясняют. Иногда объяснения меняются, а наблюдения остаются. Эксперимент с двумя щелями проведён множество раз и всегда даёт один и тот же результат. А вот что он означает, учёные обсуждают до сих пор.

Мне кажется, это очень трезвая и при этом не лишённая красоты позиция. Она не требует отказаться от знания. Она лишь просит помнить, что знание всегда предстаёт в человеческом облике: в словах, формулах, схемах. И что территория, какой бы подробной ни была карта, всегда больше.

Глава 10. Первый вопрос, меняющий всё

Представь пещеру. В ней, спиной ко входу, сидят люди, скованные так, что не могут повернуть голову. Позади них горит костёр, а между костром и пленниками проносят предметы: статуи, посуду, фигурки животных. На стене перед людьми появляются тени. Они видят только тени, слышат только эхо, и всю жизнь принимают их за единственную реальность. Давать имена теням, угадывать, какая пройдёт следующей, хвалить того, кто лучше других это делает, становится для них главным делом.

Этот образ из «Государства» Платона знают, вероятно, все, кто хоть раз открывал учебник философии. Ему больше двух тысяч трёхсот лет. И всё это время он не перестаёт волновать, потому что задевает нечто очень личное. Каждому хоть раз приходила мысль: а вдруг то, что я принимаю за мир, лишь его отражение?

На первый взгляд, это просто красивая притча. Но к концу девятой главы мы с тобой уже знаем достаточно, чтобы увидеть в ней нечто большее. Мы видели, что зрение строит реконструкцию, а не снимок. Что органы чувств захватывают крошечный диапазон возможного. Что даже сама материя, которую мы считали такой надёжной, оказалась не тем, чем кажется. Что слова разрезают мир там, где нам удобно. Что любая теория это карта, а карта всегда беднее территории.

Все эти нити сходятся к одному вопросу. Если наше восприятие ограничено, насколько хорошо мы вообще знаем реальность?

Этот вопрос не нов. Но он каждый раз меняет облик, в зависимости от того, что известно о мире. Для Платона ответ лежал в области идей, которые мы можем постичь разумом, но не чувствами. Для философов семнадцатого века вопрос превратился в спор о том, можно ли доверять чувствам, и Декарт предложил знаменитое сомнение: допустим, что я могу обманываться во всём, но сам факт того, что я сомневаюсь, говорит о том, что я существую. Для англичанина Джорджа Беркли, жившего в начале восемнадцатого века, всё существующее есть то, что воспринимается, и вопрос о мире за пределами восприятия просто теряет смысл. Для Дэвида Юма опыт дал нам только последовательность впечатлений, а вот причинная связь между ними, на которую мы полагаемся, нигде в опыте не обнаруживается: мы наблюдаем лишь то, что за одним событием регулярно следует другое.

Иммануил Кант, прочитав Юма, как он сам писал, «пробудился от догматического сна». Его ответ оказался одним из самых влиятельных в истории мысли. Кант предположил, что мы никогда не имеем дела с вещами самими по себе, а только с явлениями, то есть с тем, как вещи предстают нам, пройдя через устройство нашего ума. Пространство и время, по Канту, не свойства мира, а формы нашего восприятия, в которые мы заключаем всякий опыт. Что же такое мир сам по себе, независимо от нашего способа его воспринимать, мы, по Канту, знать не можем в принципе.

Есть искушение сказать, что Кант угадал и что современная наука его подтвердила. Но это было бы слишком просто. Современные учёные, например, показали, что некоторые представления о пространстве и времени, которые Кант считал необходимыми, не являются таковыми: геометрия, как выяснилось, может быть неевклидовой, а время зависит от скорости движения. Значит, наши «формы восприятия» не абсолютны, и наука способна выйти за их пределы, пусть окольным путём, через математику и эксперимент. Кант был прав в том, что между нами и миром существует посредник. Но он, пожалуй, недооценил, насколько этого посредника можно изучить и даже в каких-то отношениях преодолеть.

Поэтому ответ на вопрос «насколько хорошо мы знаем реальность?» вовсе не «никак» и не «в точности». Он, скорее, звучит так: с разной степенью точности и разной степенью уверенности, и притом степень можно оценивать.

Вот что я имею в виду. Некоторые вещи мы знаем исключительно надёжно. Что Земля вращается вокруг Солнца. Что вода состоит из водорода и кислорода. Что существуют электроны, и они имеют определённый заряд и массу. Эти знания проверены тысячи раз, разными способами, разными людьми, и согласованы с огромным числом других данных. Мы не можем быть уверены абсолютно ни в чём, но уверенность в них практически полная.

Другие вещи мы знаем хуже. Как устроена тёмная материя? Что происходило с Вселенной в первые доли секунды? Что такое сознание? Здесь есть гипотезы, но нет согласия.

Между этими полюсами лежит широкая полоса вопросов, где знание есть, но не окончательное. Именно здесь проходит граница познания, и именно здесь интереснее всего.

Научный подход отличает ясное понимание, где проходит эта граница. Хороший учёный не говорит: «Я знаю». Он говорит: «Вот что подтверждено, вот что вероятно, вот что гипотеза, а вот о чём мы пока ничего не знаем». Эта способность различать степени уверенности, пожалуй, самое ценное, чему можно научиться у науки, и самое трудное.

И вот, пожалуй, главное, с чем я хочу тебя оставить перед тем, как мы перевернём страницу и войдём в квантовый мир. Между наблюдателем и миром всегда есть связь. Мы не смотрим на мир из окна, расположенного где-то снаружи. Мы находимся внутри мира, мы сами его часть, и любое наше наблюдение это взаимодействие. Когда глаз видит яблоко, фотон отражается от яблока и попадает в сетчатку. Это взаимодействие света, предмета и живой ткани. Когда физик измеряет частицу, прибор тоже взаимодействует с частицей.

В классической физике это взаимодействие можно было, в принципе, сделать сколь угодно слабым. Нужно лишь использовать достаточно тонкий инструмент. Термометр чуть-чуть меняет температуру воды, в которую его опускают, но этим можно пренебречь. Для наблюдения за планетой мы просто смотрим на отражённый свет, и планета от этого не меняется ни капли.

Именно здесь, на самом тонком масштабе, начинается то, что заставило физиков двадцатых годов растерянно замолчать. Оказалось, что на уровне атомов и электронов взаимодействие нельзя сделать сколь угодно слабым. Любое наблюдение, любое измерение неизбежно вмешивается в то, что мы наблюдаем, и вмешивается так, что игнорировать это уже нельзя. Это не техническая проблема, которую можно решить усовершенствованием приборов. Это свойство самой природы.

До этого момента мы говорили о том, что восприятие ограничено и что наши картины мира неполны. Это важные, но довольно спокойные мысли. Теперь же перед нами совсем другая история. Речь идёт не о том, что мы плохо видим, а о том, что сам акт видения, акт измерения становится частью происходящего.

Может быть, самая большая загадка Вселенной заключается не только в том, что мы наблюдаем, но и в том, что означает само наблюдение.

Что такое наблюдение? Кто или что может быть наблюдателем? Влияет ли он на то, что видит, и если да, то как именно? Только человек или любая физическая система? Требует ли это сознания или нет? Эти вопросы, которые философы задавали ещё в древности, физика двадцатого века поставила заново, и на этот раз у неё были инструменты, чтобы проверить ответы в лаборатории.

Вот почему следующая часть книги называется «Квантовая революция». Мы отправимся в мир, где частица ведёт себя как волна, где вероятность становится фундаментальной, где два объекта, разделённые огромным расстоянием, оказываются связаны так, что это поражало самого Эйнштейна. И мы будем идти осторожно, внимательно отделяя то, что проверено, от того, что только красиво звучит.

Но уже сейчас, на пороге, стоит запомнить, чем начинается любая серьёзная встреча с неведомым. Она начинается с вопроса. Не с готового ответа, а с вопроса, который заставляет

по-новому смотреть на привычное. Вот этот первый вопрос: что значит видеть? Что значит знать? Что значит быть тем, кто смотрит?

Можно прожить жизнь, ни разу не задав его. Многие так и живут, и это нормально. Но стоит однажды его задать, как привычный мир уже не будет прежним.

ЧАСТЬ II. КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Когда Вселенная перестала подчиняться здравому смыслу

Глава 11. Рождение квантового мира

Макс Планк не был революционером. Он родился в 1858 году в семье профессора права, получил классическое образование, играл на фортепиано так хорошо, что всерьёз выбирал между музыкой и наукой, и в конце концов выбрал физику, хотя один из преподавателей отговаривал его: мол, в этой области почти всё уже открыто. Планк ответил, что не собирается делать открытий, ему достаточно разобраться в том, что уже известно. Через сорок лет он совершил открытие, после которого физика уже не была прежней. И до конца жизни относился к нему с недоверием.

Началось всё с задачи, которая казалась скромной и почти технической. В 1859 году Густав Кирхгоф предложил понятие абсолютно чёрного тела: воображаемого тела, которое поглощает всё падающее на него излучение и, будучи нагретым, излучает свет определённого состава, зависящего только от температуры. Строго говоря, ничего абсолютно чёрного нет, но хорошим приближением служит маленькое отверстие в закрытой печи. Если заглянуть в него, увидишь свечение, цвет которого говорит о температуре: тускло-красное при невысокой, жёлтое, потом белое при более высокой. Так кузнец без всяких приборов определяет, готов ли металл.

Физиков занимал вопрос: как распределяется энергия излучения по длинам волн? Сколько света приходится на красный участок, сколько на синий, сколько на невидимые участки спектра? Ответ можно было измерить, и к концу девятнадцатого века измерения стали довольно точными. Кривая получалась изящная: сначала подъём, затем максимум, а потом спад. Чем выше температура, тем левее, к коротким волнам, смещается максимум. Всё совпадало с опытом кузнеца.

Оставалось объяснить это теоретически. И вот тут физика столкнулась с неприятностью. Если применить к излучению классические законы, так, как их понимали в то время, получалась формула, которая хорошо работала для длинных волн, но для коротких давала абсурд. Чем короче волна, тем больше энергии она должна нести, и в сумме по всем коротким волнам выходила бесконечность. Это означало бы, что любая тёплая печь излучает бесконечную энергию в ультрафиолете и дальше. Позднее, в 1911 году, физик Пауль Эренфест назвал этот результат «ультрафиолетовой катастрофой». Название закрепилось, хотя настоящей катастрофы, разумеется, не происходило: печи спокойно грели людей. Катастрофа происходила в теории.

Планк работал над этой проблемой несколько лет. Он был человеком методичным, и его поначалу интересовала не революция, а то, как свести одно с другим. К осени 1900 года он подобрал математическую формулу, которая отлично совпадала с экспериментальными данными. Кривая ложилась точно. Подобрал, как говорят физики, эмпирически, то есть угадал, не имея теоретического обоснования. В октябре 1900 года друг Планка, экспериментатор Генрих Рубенс, сообщил ему результаты своих измерений в инфракрасной области, и формула их подтвердила. Планк в тот же вечер записал её и отправил Рубенсу открытку.

Но формула, взятая из воздуха, не удовлетворяла самого Планка. Он хотел понять, почему она такая. И тогда, как он позже писал, в приступе отчаяния, он решился на шаг, который казался ему вынужденной уловкой. Он предположил, что осцилляторы, из которых состоит стенка печи и которые излучают и поглощают энергию, не могут обмениваться ею как угодно, а только порциями. Размер порции пропорционален частоте колебаний. Коэффициент пропорциональности он обозначил буквой h. Сегодня мы называем её постоянной Планка. Её величина около шести целых шестисот двадцати шести тысячных, умноженных на десять в минус тридцать четвёртой степени джоуль-секунд. Число настолько мало, что в повседневной жизни о нём можно забыть.

С этой гипотезой вывод формулы получался. Классическая бесконечность исчезала: для коротких волн порции оказывались так велики, что нагретое тело просто не могло их заказать, ему не хватало энергии, и коротковолновое излучение подавлялось.

14 декабря 1900 года Планк доложил результат на заседании Немецкого физического общества в Берлине. Многие историки считают эту дату днём рождения квантовой теории. Хотя сам Планк тогда вовсе не чувствовал, что делает нечто эпохальное. Он видел в квантах математический приём, формальность, возможно, временную. Вероятно, думал он, удастся найти способ объяснить всё без разрывов, в непрерывных терминах. Ему понадобилось много лет, чтобы поверить, что порции имеют физический смысл. Позже он честно писал, что долго пытался вписать квант в классическую физику, и эти попытки стоили ему немало времени и сил, и всё напрасно.

Поразительно, насколько мало шума вызвала его работа. Современники не бросились обсуждать её как переворот. Прошло несколько лет, пока Эйнштейн в 1905 году не показал, что кванты вовсе не особенность печи, а свойство самого света. Только тогда стало ясно, что открыто что-то фундаментальное.

Есть известное наблюдение Планка о том, как принимаются новые идеи в науке. Он заметил, что новая научная истина торжествует не потому, что убеждает противников и заставляет их прозреть, а потому, что противники постепенно вымирают, а новое поколение вырастает уже с ней знакомым. Фраза горькая, хотя, как мне кажется, чересчур жёсткая: история знает множество случаев, когда выдающиеся учёные меняли свои взгляды под давлением фактов. Но в ней есть доля правды. Новые идеи пробивают себе дорогу медленно, и нередко самым упорным сторонником старого оказывается тот, кто сам эти идеи породил.

Что же на самом деле значило открытие Планка? Что природа не терпит бесконечного дробления. Что у энергии, по крайней мере в некоторых процессах, есть минимальная порция, как у денег есть минимальная монета. Нельзя заплатить полкопейки, хотя бы цена товара вычислялась в долях. Нельзя отдать или получить меньше одного кванта энергии определённого вида излучения. Нужно подчеркнуть, что это не значит, будто вся энергия во Вселенной состоит из дискретных порций. Скорее, существует определённая связь между энергией и частотой, и для света она именно такова.

Огромный шаг состоял в том, что в физику вошла новая фундаментальная постоянная. До этого такие постоянные уже были: скорость света, гравитационная постоянная. Теперь к ним добавилась ещё одна, и эта новая постоянная отмечала границу между двумя мирами. Всякий раз, когда в уравнениях появляется h, мы знаем, что речь идёт о явлениях, где квантовая природа мира даёт о себе знать. Когда величины, с которыми мы имеем дело, много больше h, классическая физика работает безупречно. Когда они сопоставимы с h, нужна квантовая механика.

Странно думать, что одна из самых радикальных революций в науке началась с желания навести порядок в вопросе об излучении раскалённой печи. Не с мистического озарения и не с желания перевернуть мир, а с упрямого стремления свести в формулу то, что измеряли в лаборатории. Квантовая физика родилась из практической задачи, как нередко рождаются великие вещи. Может быть, поэтому она так хорошо работает.

Планк прожил долгую и непростую жизнь. Он получил Нобелевскую премию в 1918 году, пережил обе мировые войны, потерял на первой из них сына, а на второй его второго сына казнили по обвинению в причастности к заговору против Гитлера. До конца дней он оставался верным человеком науки и, говорят, играл на рояле, пока позволяли руки. Всё это время дверь, которую он приоткрыл в 1900 году, продолжала открываться всё шире, хотя сам он никогда не любил того, что за ней оказалось.

Мне это кажется очень человечным. Тот, кто сделал первый шаг, не обязан одобрять дорогу, на которую он вывел остальных. Открытие живёт своей жизнью, независимо от жела-

ний первооткрывателя. Следующий шаг сделал молодой патентный служащий из Берна, который не боялся того, что Планк предпочёл бы не замечать.

Глава 12. Эйнштейн и свет, который оказался частицами

В 1905 году в Берне работал молодой человек двадцати шести лет. Днём он служил экспертом третьего класса в патентном бюро, проверял чужие изобретения, а по вечерам и в свободные часы писал статьи, которые потом назовут чудесным годом физики. За несколько месяцев он опубликовал работы о броуновском движении, о специальной теории относительности, о связи массы и энергии и ещё одну, самую смелую по его собственной оценке, о природе света. Он сам, в письме другу, назвал её очень революционной. Звали молодого человека Альберт Эйнштейн.

Чтобы понять, насколько дерзкой была эта идея, нужно вспомнить, что к тому времени о свете, казалось, всё было известно. В начале девятнадцатого века англичанин Томас Юнг показал, что свет способен создавать интерференцию, то есть при встрече двух световых пучков возникают чередующиеся светлые и тёмные полосы. Такое поведение свойственно волнам: там, где гребни совпадают, они усиливают друг друга, там, где гребень встречается со впадиной, гасят. Позднее Максвелл в шестидесятых годах девятнадцатого века объединил электричество, магнетизм и оптику и показал, что свет это электромагнитная волна. Теория была красива и безупречна. Волны в вакууме, волны в стекле, волны, которые можно отклонить призмой и сложить зеркалами.

И вдруг приходит человек и говорит, что в некоторых ситуациях свет ведёт себя так, будто состоит из частиц.

На чём он основывался? На одном странном явлении, которое называется фотоэффектом. Ещё в 1887 году Генрих Герц заметил, что ультрафиолетовый свет, падая на металл, помогает искре проскакивать легче. Позднее выяснилось, что свет выбивает из металла электроны. Казалось бы, ничего удивительного: волна приносит энергию, электроны её получают и вырываются. Но детальные измерения Филиппа Ленарда в 1902 году показали три странности, с которыми волновая теория не справлялась.

Первая: энергия вылетающих электронов не зависит от яркости света. Если усилить свет в десять раз, электронов вылетит в десять раз больше, но каждый из них будет иметь прежнюю энергию. По волновой теории, более яркий свет, несущий больше энергии, должен был бы вырывать более энергичные электроны.

Вторая: энергия электронов зависит от цвета света, то есть от частоты. Красный свет, как бы ярок он ни был, может вообще не выбить ни одного электрона, а слабенький фиолетовый выбивает сразу. Существует порог: ниже определённой частоты эффекта нет вообще.

Третья: эффект возникает мгновенно. По волновой теории электрону, чтобы накопить достаточную энергию от слабого света, потребовалось бы заметное время, секунды или минуты. На опыте задержки не наблюдалось.

Эйнштейн предложил выход. Что, если свет не просто излучается порциями, как у Планка, но и распространяется порциями, и каждая порция, позднее названная фотоном, несёт энергию, пропорциональную частоте? Тогда всё встаёт на места. Один фотон отдаёт всю свою энергию одному электрону. Если энергии фотона хватает, чтобы выбить электрон, он вылетает сразу, и энергия электрона равна энергии фотона за вычетом того, что нужно потратить на выход из металла. Красные фотоны слишком слабы, и сколько бы их ни было, ни один не справится. Яркость показывает лишь число фотонов, а не энергию каждого. Всё сходится.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта простое и ясное, и у него есть предсказание, которое можно проверить: график зависимости энергии электронов от частоты света должен быть прямой линией с наклоном, равным постоянной Планка. Проверку взял на себя амери-

канский физик Роберт Милликен. Любопытно, что он не верил в идею Эйнштейна и надеялся её опровергнуть. Он потратил около десяти лет на кропотливые измерения, и к 1914–1916 годам получил результат, который точно подтвердил предсказание, и даже значение постоянной Планка из его опытов совпало со значением из совсем другой области. Милликен был честным человеком и признал результат, хотя ещё некоторое время продолжал говорить, что сама гипотеза о световых квантах неразумна.

Эйнштейн получил Нобелевскую премию в 1921 году. Не за теорию относительности, как многие думают, а именно «за заслуги перед теоретической физикой и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта». Комитет предпочёл не спорить с теорией, которая ещё казалась слишком смелой.

Идея световых частиц встречала сопротивление и среди самых выдающихся физиков. Планк, который сам открыл кванты, считал, что Эйнштейн «немного перегнул палку». Бор сопротивлялся световым квантам до середины двадцатых годов. Он был убеждён, что волновая природа света неоспорима, и возражал против понятия частицы. Переломным стал опыт американца Артура Комптона 1923 года, в котором рентгеновские лучи рассеивались на электронах так, как рассеиваются бильярдные шары: с передачей импульса и энергии. Описать это явление, считая свет только волной, не удавалось. Название «фотон» ввёл химик Гилберт Льюис в 1926 году.

В этом месте легко сделать неверный вывод, что победили частицы, а волны проиграли. Ничего подобного. Волновые свойства света никуда не делись, интерференцию Юнга никто не отменял. Одна и та же световая вспышка, которая в одном опыте ведёт себя как россыпь отдельных частиц, в другом создаёт интерференционную картину, свойственную волнам. Мы вернёмся к этой странности в следующей главе, потому что она одна из центральных во всей квантовой физике.

А пока посмотрим, что фотоэффект даёт нам в повседневной жизни. Солнечная батарея на крыше работает именно благодаря ему: фотоны выбивают электроны из полупроводника, возникает ток. Матрица фотоаппарата в твоём телефоне это, по сути, огромное множество микроскопических детекторов, каждый из которых регистрирует фотоны. Автоматические двери, которые открываются при твоём приближении, фотодатчики на производстве, приборы ночного видения. Квантовая природа света спрятана в самых обычных вещах.

При слабом освещении эффект можно увидеть напрямую. Если снимать на камеру чрезвычайно тусклую сцену, например далёкую звезду или лунный пейзаж, изображение сначала выглядит как россыпь отдельных светящихся точек, и только при накоплении достаточного числа фотонов складывается привычная картинка. Человеческий глаз, как показывают эксперименты, способен реагировать на очень небольшое число фотонов в идеальных условиях, хотя до сознания доходит лишь часть сигналов.

Эйнштейн, проживший всю жизнь рядом с квантовой теорией, никогда не чувствовал себя в ней дома. Позже, уже в пожилом возрасте, он писал, что все эти пятьдесят лет размышлений не приблизили его к ответу на вопрос, что такое световые кванты. Это признание звучит почти трогательно. Человек, который ввёл идею, понимал её не лучше остальных. И, как мы увидим, именно он станет одним из самых серьёзных критиков того, во что она превратилась.

Есть в этой истории ещё одна черта, которую хочется отметить. Эйнштейн не открыл ничего принципиально нового экспериментально. Он взял факты, известные другим, и посмотрел на них иначе. То, что другие считали неудобной деталью, он принял всерьёз и сделал из неё вывод. Иногда научная смелость состоит не в том, чтобы найти новое, а в том, чтобы не отворачиваться от странного, которое уже лежит на столе.

Глава 13. Двойственная природа реальности

В 1924 году в Парижском университете защищал диссертацию французский аристократ Луи де Бройль. Он происходил из старинного герцогского рода, начинал с изучения истории и права, потом, под влиянием старшего брата, физика-экспериментатора, переключился на науку. Его диссертация была короткой и дерзкой. Если свет, который считали волной, иногда ведёт себя как частица, рассуждал он, то, может быть, и частицы вещества, например электроны, иногда ведут себя как волны? Симметрия казалась ему слишком красивой, чтобы быть случайной.

Члены комиссии не знали, что с этим делать. Говорят, что экземпляр работы отправили Эйнштейну, чтобы тот высказал мнение. Эйнштейн ответил, что молодой человек приподнял угол большой завесы. Диссертацию приняли, а де Бройль получил докторскую степень. В 1929 году он стал нобелевским лауреатом.

Предсказание было конкретным. Любому телу, движущемуся с определённым импульсом, соответствует длина волны, равная постоянной Планка, делённой на импульс. Для обычных предметов эта длина ничтожна. У летящего мяча она настолько мала, что никакой опыт не мог бы её обнаружить. Но для лёгкой и быстрой частицы, такой как электрон, длина волны сравнима с расстояниями между атомами в кристалле. А значит, кристалл мог бы работать как дифракционная решётка и рассеивать электроны так, как рассеивает рентгеновские лучи.

Проверка состоялась в 1927 году. В американской лаборатории Bell Labs Клинтон Дэвиссон и Лестер Гермер изучали отражение электронов от поверхности никеля. Они увидели то, чего не ожидали: электроны отражались не равномерно, а в определённых направлениях, как будто интерферировали волны. Практически в то же время в Шотландии Джордж Томсон, сын того самого Джозефа Томсона, который открыл электрон, получил дифракционную картину при прохождении электронов сквозь тонкие плёнки. Забавная деталь: отец получил Нобелевскую премию за доказательство того, что электрон это частица, а сын через тридцать лет разделил её за доказательство того, что электрон ведёт себя как волна. Шутят, что оба были правы.

Так возникло понятие корпускулярно-волнового дуализма. Слово звучит солидно, и им часто пугают. На самом деле оно означает довольно простую вещь. Объекты микромира в разных экспериментах проявляют разные стороны своей природы. Хочешь узнать, где именно находится электрон? Ставь детектор, и он сработает в одной точке, как будто электрон частица. Хочешь узнать, как электрон распространяется и что он делает при встрече с препятствием? Увидишь интерференцию и дифракцию, как у волны.

Но вот на этом месте начинается самое важное, и оно сразу ускользает от внимания. Нельзя сказать, что электрон «и частица, и волна одновременно», как будто это маленький шарик, который ещё и колышется. Нельзя и сказать, что «иногда он частица, а иногда волна», будто он переодевается. Эти выражения распространены, но они обманчивы. Правильнее сказать, что электрон не является ни тем, ни другим в привычном смысле. Он нечто третье, для чего в повседневном языке нет слова. Нам знакомы две модели: острые твёрдые шарики и растекающиеся колебания. Квантовый объект не укладывается ни в одну, но в разных ситуациях ведёт себя, как если бы подходила то одна, то другая.

Один из создателей квантовой электродинамики Ричард Фейнман любил подчёркивать: электроны ведут себя ни как волны, ни как частицы, они ведут себя так, как не ведёт себя больше ничто в нашем повседневном опыте. Нам остаётся принять этот факт и привыкнуть к нему, как привыкают к жизни в чужой стране.

Нильс Бор в 1927 году предложил для этого свой принцип дополнительности. Волновое и корпускулярное описания взаимно исключают друг друга, потому что для их проявления нужны разные экспериментальные условия, но вместе они дают полное представление об объ-

екте. Нельзя одновременно поставить опыт, показывающий и волновую, и частичную природу. Выбирая тип эксперимента, мы выбираем, какая сторона проявится. Бор считал это не недостатком теории, а фундаментальным свойством природы. Многие физики до сих пор находят этот принцип глубоким, другие считают его неясным, но историческое влияние идеи огромно.

Насколько далеко простирается волновая природа вещества? Только электроны? Нет, и это одно из самых удивительных открытий. Опыты показали интерференцию нейтронов, атомов, а затем и целых молекул. В 1999 году группа Антона Цайлингера в Вене получила интерференционную картину для молекул фуллерена, состоящих из шестидесяти атомов углерода. Футбольный мяч в миниатюре, если угодно, и он ведёт себя как волна. Позже интерференцию получили для молекул из тысяч атомов. Рекорд постоянно растёт, и учёные ищут, где проходит граница, если она вообще существует.

Это подводит нас к вопросу, который неизбежно возникает у каждого вдумчивого читателя. Если всё состоит из квантовых объектов и каждый из них способен вести себя как волна, то почему мы не видим волновых свойств у мяча, у стола, у собственной руки? Почему мяч не проходит сквозь стену, хотя у него тоже есть длина волны?

Ответ двойной. Первое: длина волны макроскопических тел настолько ничтожна, что любые проявления волновых свойств в тысячи миллиардов раз меньше, чем мы могли бы заметить. Второе, более тонкое: большие объекты постоянно взаимодействуют с окружением, с воздухом, светом, собственными тепловыми колебаниями, и это взаимодействие стирает следы интерференции. Это явление называется декогеренцией, и мы подробно поговорим о нём в третьей части книги. Здесь стоит лишь запомнить, что не существует резкой границы, где мир внезапно переходит от «квантового» к «классическому». Есть плавный переход, определяемый масштабом и степенью изоляции от среды.

При всём этом идея дуализма не означает, что физики не знают, что происходит. Математика квантовой механики безупречно описывает оба поведения единым образом. Волновая функция, о которой мы будем говорить дальше, одновременно объясняет и интерференцию, и точечные регистрации. Парадокс не в формулах. Парадокс в том, что наша интуиция, наши слова и наши картинки не успевают за формулами.

Мне нравится в этой истории то, что сама наука научила нас осторожности в обращении с образами. Мы привыкли думать, что понять что-то значит «увидеть это внутренним взором», представить в виде картинки. Но природа не обязана подчиняться нашему воображению. Вполне может оказаться, что мир на самом глубоком уровне нельзя нарисовать, а можно только описать на языке математики и проверить опытом.

Для физика такое положение дел не трагедия, а повод для работы. Для читателя, надеюсь, это приглашение к скромности, которая никому не вредила.

Глава 14. Эксперимент, который потряс физику

Задача на вид школьная. Возьмём непрозрачную перегородку с двумя узкими вертикальными щелями. За ней поставим экран. Будем стрелять в перегородку чем-нибудь и смотреть, что попадёт на экран.

Если стрелять из пулемёта мелкими шариками, картина ясна. Часть шариков пролетит через левую щель, часть через правую, и на экране появятся две полосы напротив щелей. Если закрыть одну щель, останется одна полоса. Если открыть обе, будет две. Сложение простое и понятное.

Если вместо шариков пустить волны, например по воде, картина другая. Волна проходит через обе щели одновременно, и от каждой расходятся круги. Эти круги накладываются друг на друга: где гребни встречаются, возникает усиление, где гребень встречается со впадиной, возникает гашение. На экране получается не две полосы, а целый ряд чередующихся светлых и тёмных полос, которые называются интерференционной картиной. Самая яркая полоса оказывается посередине, между щелями, там, где нет ни одной щели.

Первым эту картину для света получил Томас Юнг в самом начале девятнадцатого века. Опыт Юнга считался неопровержимым доказательством волновой природы света и стоял в учебниках как образец ясности.

А теперь возьмём электроны.

В нашем эксперименте источник испускает электроны по одному. Не пучком, а штучно, с такими интервалами, что каждый успевает долететь до экрана до того, как вылетит следующий. Экран фиксирует каждое попадание в виде маленькой вспышки или точки. Что мы ожидаем увидеть?

Если электрон частица, и она летит через одну из щелей, то на экране должны появляться две полосы. Если же, как волна, он проходит через обе щели, должна возникнуть интерференция. Но у нас электроны, которые прилетают поодиночке, и интерферировать им как будто не с кем. Каждый электрон один.

Вот что показывает эксперимент. Первые электроны ложатся на экран как будто беспорядочно: одна точка здесь, другая там, третья совсем в другом месте. Ничего упорядоченного не видно. Каждый электрон приходит как неделимая частица и оставляет на экране одну точку, а не размытое пятно. Но по мере накопления точек начинает проступать рисунок. Через тысячи электронов становятся видны полосы. Светлые участки, где точек много, и тёмные, где их почти нет. Это в точности та самая интерференционная картина.

Представь себе, как это выглядит. Отдельные электроны никак не договариваются между собой, они вылетают по одному, но суммарная картина строго воспроизводит результат волны. Каждый электрон будто «знает», куда ему можно попасть, а куда нельзя, и «знает» это из-за того, что открыта вторая щель, через которую он, по логике частицы, не мог пролететь.

Имя этого эксперимента звучит буднично: опыт с двумя щелями. Но Ричард Фейнман, один из величайших физиков двадцатого века, говорил, что в нём заключена единственная настоящая загадка квантовой механики. Не одна из загадок, а именно главная. Всё остальное, говорил он, можно вывести из неё.

Исторически опыт с электронами сначала был мысленным. Физики обсуждали его с двадцатых годов, но технически осуществить его было очень трудно. Электронные щели должны быть невероятно узкими, а детектирование одиночных электронов требовало чувствительной аппаратуры. Первые реальные эксперименты с электронными щелями провёл Клаус Йонссон в Тюбингене в 1961 году. Затем итальянские физики Пьер Джорджо Мерли, Джанфранко Миссироли и Джулио Поцци в 1974 году получили картину для одиночных электронов. Самое известное наглядное воспроизведение выполнил в 1989 году японский физик Акира Тономура

с коллегами из лаборатории Hitachi. Они записали на плёнку, как интерференционные полосы постепенно складываются из отдельных точек. Эту запись можно найти и сегодня, и она производит сильное впечатление, потому что видишь процесс как бы изнутри.

Таким образом, поведение, как будто бы свойственное волне, наблюдается даже тогда, когда частицы идут по одной. Это не результат взаимодействия электронов между собой. Каждый электрон интерферирует, по выражению Поля Дирака, сам с собой. Выражение остроумное, но осторожное: оно не говорит, что электрон разделился на две части. Оно лишь указывает, что вклад, который вносят обе возможности, как-то складывается.

Что происходит, если попробовать выяснить, через какую щель прошёл электрон? Поставить рядом со щелями детектор, который покажет: этот электрон прошёл через левую, а этот через правую. И здесь опыт даёт ещё один неожиданный результат. Как только мы получаем информацию о том, через какую щель пролетел электрон, интерференционные полосы исчезают. На экране остаются две полосы, как в случае обычных частиц. Попытка подглядеть уничтожает интерференцию.

Это и есть то место, где в разговор вступает «наблюдатель». Но торопиться с выводами не нужно. Сейчас важно понять, что именно показывает опыт, и ничего больше. Он показывает, что если существуют физические различающие метки, то есть если где-то в мире остаётся след того, какую щель выбрал электрон, интерференции нет. Если такого следа нет, она есть. Мы подробно разберём, что значит «след» и при чём тут человек, в третьей части. Пока достаточно констатации: два режима, два разных результата.

Можно возразить: может быть, электрон всё-таки проходит через одну щель, а мы просто чего-то не понимаем? Физики проверяли многие варианты. Если электрон проходит через одну определённую щель, то результат с двумя открытыми щелями должен быть просто суммой результатов с каждой щелью по отдельности. Но он не равен сумме. Он содержит интерференцию, которой нет ни в одном из слагаемых. И в тёмных местах интерференционной картины, куда электроны не попадают при двух открытых щелях, они попадали бы, если закрыть одну щель. Открытие второго пути уменьшает число попаданий в определённых местах. Как будто добавление дороги может уменьшить число приезжающих в город.

Поэтому наивная картина, в которой электрон представляется маленьким шариком, летящим по определённой траектории, не работает. Но и чисто волновая картина не работает: электрон всякий раз регистрируется целиком, в одной точке.

Как сказал Фейнман, физики не умеют объяснить опыт в том смысле, чтобы свести его к чему-то более привычному. Они умеют его описать, и описание получается точным до мельчайших деталей. Это одна из тех ситуаций, когда лучше всего признать: мы знаем, что происходит, но не знаем, почему оно так.

Мне кажется, красота этого опыта в его простоте. Для него не нужны гигантские ускорители или миллиарды долларов. Источник, перегородка с двумя щелями, экран. И из этой скромной установки вырастает вопрос, который уже почти век занимает лучшие умы: что такое физическая реальность на самом малом масштабе и как она связана с тем, что мы о ней узнаём.

Глава 15. Когда возможность становится результатом

Подбрось монету и накрой её ладонью. Пока ты не посмотрел, она лежит либо орлом, либо решкой. Ты просто не знаешь, как именно. Вероятность пятьдесят на пятьдесят отражает твоё незнание, а монета при этом совершенно определённа. Стоит поднять ладонь, и ты узнаешь то, что уже было.

Когда физики впервые стали говорить о квантовой суперпозиции, многие слушатели решали, что речь идёт именно об этом. Мол, электрон находится «здесь или там», мы не знаем где, поэтому говорим о вероятностях. Это выглядело бы понятно и привычно. И было бы неверно.

Разница принципиальная, и опыт с двумя щелями показал её почти нагляднее любого рассуждения. Если бы электрон просто проходил через одну из двух щелей, а мы не знали, через какую, то картина на экране была бы суммой двух возможностей: полоса от левой щели плюс полоса от правой. Монета, которая «либо орёл, либо решка», не создаёт никаких особенных узоров. Но на экране возникает интерференция, а интерференция требует, чтобы обе возможности каким-то образом участвовали в происходящем одновременно. Незнание не интерферирует. Если ты не знаешь, в какой руке у приятеля конфета, от этого не меняется ничего, кроме твоей осведомлённости.

Суперпозиция называется состояние, в котором система не находится определённо ни в одной из возможностей, но и не просто «не известна». Математически её описывают как сумму: волновая функция состоит из нескольких слагаемых, каждое из которых соответствует одной из возможностей и имеет своё число, называемое амплитудой. Но это не обычные числа, а комплексные, у них есть не только величина, но и фаза, своего рода «направление». Когда две амплитуды складываются, они могут усиливать друг друга или гасить, как волны на воде. Именно поэтому возникают полосы.

В этой математике нет ничего мистического, но она требует привыкнуть к мысли, что сначала складываются амплитуды, а уже потом вычисляются вероятности. Вероятность определённого результата равна квадрату модуля суммарной амплитуды. Эту связь установил в 1926 году Макс Борн, и она носит его имя. Из неё следует, что вероятности, в отличие от привычных, не обязательно складываются. Вероятность получить результат двумя способами одновременно может быть меньше, чем вероятность получить его одним способом. Именно так возникают тёмные полосы.

Попробуем взять пример попроще, чем электрон в пространстве. У многих частиц есть свойство, называемое спином. Для нас сейчас неважно, что это такое на самом деле, достаточно сказать, что у электрона при измерении вдоль выбранного направления спин может оказаться направленным «вверх» или «вниз», и никаких промежуточных значений нет. Если приготовить электрон в состоянии «вверх» вдоль вертикали, то при проверке вдоль вертикали он всегда окажется «вверх». Но если повернуть детектор и проверить спин вдоль горизонтали, результат станет случайным: половина электронов покажет «вправо», половина «влево». А тот электрон, который был определённо «вверх» по вертикали, теперь описывается как суперпозиция «вправо» и «влево» по горизонтали.

Заметь, что состояние «вверх» вовсе не было неопределённым. Оно было вполне определённым. Но определённым относительно одного вопроса. Относительно другого вопроса оно оказалось суперпозицией. Нет такого состояния электрона, в котором определены сразу все возможные ответы на все возможные вопросы. Это принципиальное отличие от монеты, которая определена по отношению ко всем мыслимым вопросам: цвет, вес, положение.

Вспомним теперь название главы. «Когда возможность становится результатом». Что происходит в момент измерения? До измерения система в суперпозиции, после измерения

мы видим один определённый результат. Если спин измерен вдоль горизонтали и получилось «вправо», то последующее измерение вдоль той же оси снова даст «вправо». Что-то изменилось. Квантовая механика предсказывает вероятности разных исходов, но не говорит, какой исход случится в данном конкретном случае, а затем описывает состояние уже как определённое.

Этот переход от суперпозиции к одному результату физики называют проблемой измерения, и она остаётся предметом споров до сих пор. Одни считают, что происходит реальное физическое изменение, называемое коллапсом. Другие полагают, что никакого коллапса нет, а лишь кажется, что он есть, потому что мы сами оказываемся в одной из ветвей. Третьи ищут иные объяснения. Мы вернёмся к этим вариантам в третьей части, а пока важно усвоить сам факт: суперпозиция реальна, измерима и имеет проверяемые следствия.

И она используется. Квантовые компьютеры работают на суперпозиции. Обычный бит принимает значение ноль или единица. Квантовый бит, кубит, может находиться в суперпозиции нуля и единицы, и система из многих кубитов способна обрабатывать огромное количество комбинаций одновременно, правда, только в специальном смысле, потому что в конце всё равно нужно извлечь единственный результат. Не стоит думать, что квантовый компьютер просто «пробует все варианты сразу и выбирает лучший». Это популярное упрощение, которое вводит в заблуждение. Выигрыш достигается тем, что алгоритм хитро организует интерференцию, чтобы нужный ответ усилился, а ненужные погасли. Для некоторых задач это даёт значительное ускорение, для большинства других нет.

Представим на минуту, что мы в самом деле можем создать суперпозицию большого объекта. Что тогда? Физики добиваются этого всё более крупных масштабов: в последние годы получали суперпозиции для колеблющихся микроскопических мембран, содержащих триллионы атомов, правда, при сверхнизких температурах и очень тщательной изоляции. Любой контакт с окружением разрушает хрупкое состояние. Поэтому суперпозиции в повседневной жизни не встречаются, и всё же в принципе они не запрещены.

То, что делает эту идею такой трудной для освоения, тоже связано с языком. Слова вроде «и там, и там» или «ни там, ни там» обманчивы. Состояние, которое математика описывает как сумму, нельзя сводить ни к конъюнкции, ни к дизъюнкции обычной логики. Это третья возможность, отдельная категория бытия, о которой мы привыкли не думать, потому что в обыденной жизни с ней не сталкиваемся.

Если всё это показалось тебе непонятным, не расстраивайся. Ты в хорошей компании. Шрёдингер, который сам и придумал уравнение, описывающее суперпозиции, до конца жизни испытывал по поводу этого сомнения. Эйнштейн возмущался. Даже у Бора сохранялись трудности с тем, как говорить об этом. Но все они сходились в одном: теория работает безупречно. Предсказания совпадают с экспериментом, и до сих пор никто не нашёл ни одного расхождения.

Поэтому мы можем смело говорить: суперпозиция — это не метафора. Это настоящее физическое явление, которое наблюдают в лабораториях и используют в технике. А вот что именно она значит для картины реальности, это уже другой вопрос, и именно он, как мы вскоре увидим, привёл к самым горячим спорам в истории физики.

Глава 16. Принцип неопределённости

Весной 1927 года двадцатипятилетний Вернер Гейзенберг жил в Копенгагене, в институте Нильса Бора, и страдал от того, что они с учителем никак не могут договориться. Бор, как рассказывали очевидцы, мог часами и до глубокой ночи разбирать каждую фразу, и Гейзенберг, измотанный этими спорами, уходил гулять в парк за институтом. Там, в феврале, во время ночной прогулки, ему и пришла в голову мысль, которая принесла ему славу. Статью он закончил в марте.

Суть мысли можно выразить просто, хотя истолковывают её чаще всего неправильно. Нельзя одновременно задать сколь угодно точные значения определённых пар физических величин. Самый известный пример: положение и импульс частицы. Чем точнее мы знаем, где она находится, тем менее определён её импульс, то есть, грубо говоря, скорость и направление движения. И наоборот. Количественно это выражено так: произведение неопределённостей положения и импульса не может быть меньше половины постоянной Планка, делённой на два пи. Формула в современном виде появилась чуть позже, её строго вывел Эрл Кеннард.

Обычно объясняют это так. Чтобы узнать, где находится электрон, нужно его «осветить», то есть послать фотон. Фотон ударяет электрон и меняет его скорость. Чем точнее хотим определить положение, тем короче должна быть длина волны света, а значит, тем больше энергия фотона и сильнее удар. Получается, что измерение неизбежно возмущает измеряемое.

Такое объяснение удобно, и сам Гейзенберг его использовал. Но оно, как теперь понимают, не точно отражает смысл принципа. Дело не в грубости приборов и не в том, что мы своими неловкими руками что-то сбиваем. Неопределённость не недостаток измерения, а свойство самого квантового состояния. Даже если ничего не измерять, частица в определённом состоянии просто не имеет одновременно точного положения и точного импульса. Эти величины не определены одновременно, потому что для такого состояния нет математического описания.

Чтобы почувствовать, откуда это берётся, лучше всего обратиться к аналогии с обычными волнами. Подумай о звуке. Допустим, ты хочешь описать звуковой сигнал, который длится очень короткое время, например щелчок. Можно ли сказать, какая у него частота? Чистый тон, ровная нота, предполагает бесконечно длинную волну с совершенно определённой частотой. А короткий щелчок состоит из смеси множества частот. Чем короче сигнал, тем шире набор частот в нём. Обратное тоже верно: чем чище частота, тем длиннее должен быть сигнал. Это не недостаток микрофона, а математическое свойство любых волн. Нельзя сделать сигнал одновременно очень коротким и очень «чистым» по частоте.

В квантовой механике частица описывается волной, и положение соответствует тому, насколько волна сосредоточена в пространстве, а импульс связан с длиной волны. Сжать волну в узкий пакет, значит, составить её из множества разных длин волн, то есть из разных импульсов. Это тот же самый закон, только применённый к материальным объектам. Неопределённость оказывается не мистическим запретом, а прямым следствием того, что у квантовых объектов есть волновая природа.

Историки науки отмечают любопытную деталь. Первоначальное рассуждение Гейзенберга с воображаемым микроскопом, как показал Бор, содержало ошибки, и между ними возник довольно болезненный спор. Гейзенберг был огорчён, даже расплакался, как рассказывают. В итоге в статье была добавлена приписка о том, что Бор указал на неточности. Но сам принцип оказался верным, и более строгие доказательства лишь подтвердили его.

Что важно понимать про этот принцип? Прежде всего, он говорит не о нашем незнании, а о том, как устроена природа. Во-вторых, он не запрещает точно измерить одну величину. Можно сколь угодно точно измерить положение, просто тогда импульс станет сильно неопре-

делённым. В-третьих, он имеет значение лишь в мире очень малых масштабов. Для мяча или человека неопределённости так ничтожны, что их можно не принимать во внимание. Даже самые чувствительные приборы не регистрируют ничего подобного.

И ещё одно уточнение. Иногда принцип неопределённости пересказывают как «наблюдатель влияет на результат». Это путаница. Принцип неопределённости, строго говоря, не об этом. Он касается структуры самих состояний, а влияние измерения на систему — отдельная, хотя и связанная тема, к которой мы вернёмся в главе, посвящённой измерению. Не стоит смешивать две разные идеи. Позже мы увидим, что физики даже спорят о том, как точно соотносятся неопределённость и возмущение при измерении. Современные теоретические работы показывают, что исходное рассуждение Гейзенберга о неизбежном возмущении нуждается в уточнении, хотя неравенство для неопределённостей самих состояний остаётся неизменным.

У принципа есть замечательное практическое следствие. Электрон в атоме не может упасть на ядро. Почему? Потому что при падении он оказался бы в очень малой области, то есть его положение определялось бы очень точно, а значит, неопределённость импульса стала бы огромной, и он получил бы большую кинетическую энергию. Баланс между притяжением к ядру и стремлением к локализации задаёт размер атома. То есть устойчивость вещества, о которой мы говорили в четвёртой главе, во многом обязана принципу неопределённости.

Есть и ещё одно следствие, более причудливое. Даже при абсолютном нуле температуры, когда, казалось бы, всё должно замереть, частицы не могут остановиться полностью, потому что остановка означала бы и точное положение, и нулевой импульс. Остаётся так называемая нулевая энергия. Этот эффект подтверждён опытами: например, жидкий гелий не замерзает при обычном давлении даже при приближении к абсолютному нулю именно из-за энергии нулевых колебаний. Чтобы получить твёрдый гелий, приходится прикладывать высокое давление.

Соответствующее соотношение существует и для энергии и времени. Состояние, существующее очень короткое время, не может иметь точно определённую энергию. Так объясняют, например, почему возбуждённые состояния атомов излучают свет не строго определённой частоты, а с небольшим разбросом, называемым естественной шириной линии. Это не просто теория, а измеряемая величина.

Популярная литература любит расцвечивать принцип неопределённости философскими выводами: мол, мир по природе непознаваем, свобода воли оправдана физикой, случайность царит в космосе. Я призываю к осторожности. Физический смысл принципа весьма скромен и определён. Он утверждает конкретное математическое соотношение между конкретными величинами. Из него нельзя вывести ни свободу воли, ни непознаваемость, ни право на любые произвольные утверждения. Он ограничивает не нашу способность узнавать, а то, какие вообще свойства бывают у объектов.

Можно, конечно, размышлять о философском значении этого факта, и это интересное занятие. Но честная позиция требует различать: вот что утверждает теория и проверено в эксперименте, а вот что мы дорисовываем своим воображением. Различать их трудно, но это стоит труда.

Глава 17. Мир вероятностей

Один атом радиоактивного вещества распадётся когда-нибудь. Когда именно, не скажет никто. Не потому, что мы плохо считаем или не хватает данных. Всё, что можно сказать, это вероятность: за определённое время, называемое периодом полураспада, атом распадётся с вероятностью пятьдесят процентов. Если взять миллиард атомов, то через период полураспада их останется примерно половина. Эта закономерность выполняется удивительно точно. Но какие именно из атомов распадутся и когда, остаётся принципиально случайным.

Два совершенно одинаковых атома, находящихся в одинаковых условиях, один может распасться через секунду, а другой через тысячу лет. Никакого скрытого механизма, который бы объяснил разницу, физики не нашли. Атомы не стареют, у них нет внутренних часов, которые отсчитывают время. Каждый атом в каждый момент находится в одном и том же положении, и вероятность распада в следующую секунду постоянна.

Вот это и называется фундаментальной вероятностью. Она отличается от той, с которой мы привыкли иметь дело в повседневной жизни. Когда мы говорим, что вероятность дождя завтра шестьдесят процентов, мы не утверждаем, что природа бросает кости. Мы говорим, что не знаем всех условий, а модель погоды даёт лишь грубое приближение. Если бы мы знали состояние атмосферы с абсолютной точностью, мы могли бы предсказать погоду (по крайней мере, в рамках классической физики). Вероятность в такой картине выражает неполноту знания.

В квантовой механике дело обстоит иначе, по крайней мере в рамках стандартной теории. Здесь вероятность выглядит не как отражение незнания, а как свойство самой природы. Даже при полном знании состояния системы, которое задаётся волновой функцией, можно предсказать лишь вероятности разных исходов измерения.

В середине двадцатых годов этот поворот был настолько неожиданным, что его первооткрыватель Макс Борн, сам немало потрясённый, формулировал свою идею очень осторожно. Он развивал мысль в нескольких статьях 1926 года, и в одной из них, в сноске, добавил, что окончательное решение остаётся за корректировкой. Позже он получил Нобелевскую премию, но только в 1954 году, почти тридцать лет спустя, что, как говорят, его огорчало.

Правило Борна говорит: вероятность обнаружить частицу в данной точке пропорциональна квадрату модуля волновой функции в этой точке. Теперь волновая функция перестаёт быть материальной волной и становится носителем информации о вероятностях. Шрёдингер, который ввёл её, сначала думал иначе. Он надеялся, что электрон на самом деле размазан в пространстве, как облако заряда, и никаких прыжков и вероятностей не будет. Борн показал, что такая интерпретация не работает: электрон всякий раз регистрируется целиком в одной точке. Шрёдингер до конца жизни не мирился с вероятностным толкованием.

Эйнштейн был ещё категоричнее. В письме Борну в декабре 1926 года он написал, что квантовая механика внушает почтение, но внутренний голос подсказывает ему, что это ещё не настоящее. Теория многое даёт, но к тайнам Старика не приближает. И он убеждён, что Бог не играет в кости. Эта фраза, как мы видели, стала знаменитой, хотя в оригинале она звучала чуть мягче и сопровождалась признанием, что он, возможно, ошибается.

Поразительно, но спор не разрешился ни тогда, ни сейчас. Конечно, подавляющее большинство физиков принимает вероятностную природу квантовых предсказаний как рабочий факт. Но что стоит за вероятностями, остаётся предметом дискуссии. Есть несколько подходов.

Первый, который называют копенгагенским, принимает вероятность как фундаментальное свойство. В нём не нужно искать глубже: результат отдельного измерения принципиально случаен.

Второй подход предполагает, что за вероятностями скрывается более глубокий уровень, так называемые скрытые параметры. Просто мы их не знаем, как не знаем всех условий в игре в кости. Долгое время считалось, что такие теории невозможны. Но в 1952 году Дэвид Бом построил рабочую теорию со скрытыми параметрами, в которой у частиц есть точные траектории, а случайность возникает из незнания начальных условий. Эта теория воспроизводит все предсказания квантовой механики, но ценой нелокальности: частицы в ней мгновенно связаны друг с другом на любом расстоянии. Мы подробнее поговорим об этом в главе о запутанности.

Третий подход, предложенный Хью Эвереттом в 1957 году, и вовсе отказывается от случайности. Согласно ему, при измерении реализуются все возможные результаты, но в разных ветвях реальности. Мы, наблюдатели, оказываемся в одной из ветвей и видим один результат, а вероятность выражает то, с какой вероятностью мы окажемся в той или иной ветви. Идея вызывает горячие споры. Одни физики считают её самой элегантной, другие самой экстравагантной.

Четвёртый класс подходов предполагает, что уравнения квантовой механики нужно слегка изменить, чтобы они включали реальный случайный коллапс. Такие модели, например модель Гирарди, Римини и Вебера, предсказывают крошечные отклонения от стандартной теории, которые пока не обнаружены, но экспериментаторы продолжают искать.

Все эти подходы дают одни и те же результаты в известных опытах. Выбор между ними пока определяется вкусом, философскими предпочтениями и надеждами на будущие эксперименты. Честно сказать, это не очень приятное положение дел, но другого у нас нет.

А теперь вернёмся к практической стороне. Каковы результаты предсказаний квантовой теории? Они поразительны. Возьмём величину, называемую магнитным моментом электрона. Квантовая электродинамика предсказывает его значение, а эксперимент измеряет. Совпадение достигает примерно двенадцати значащих цифр. Это одна из самых точных проверок любой теории в истории науки. Представь, что ты измерил расстояние от Москвы до Нью-Йорка, и расхождение между расчётом и измерением составило бы толщину волоса. Теория, в основе которой лежит вероятность, оказывается точнее любой другой.

Как это возможно? Парадокс разрешается просто. Вероятности в квантовой механике вычисляются точно, а предсказать можно распределение результатов в большом числе опытов. Если одинаковый опыт повторить миллион раз, то доли разных исходов будут близки к предсказанным с очень высокой точностью. Теория вероятностей, в строгом смысле, сильна именно в больших числах.

Это примерно то же самое, как в страховом бизнесе. Страховая компания не знает, чей дом сгорит в этом году, но знает, сколько домов сгорит в целом, и строит на этом свою работу. Но в страховании неопределённость, как мы сказали, отражает незнание. В квантовой механике она, возможно, глубже.

Признаюсь, что мне всегда казалось значимым то, что человечество, привыкшее к картине детерминированного мира, смогло освоить и принять язык вероятностей. Это потребовало не одного поколения. Но результат стоил усилий. Мы получили теорию, которая объясняет устройство атомов, химические связи, свойства полупроводников, работу лазеров. Без вероятностной природы квантовой механики не было бы современной электроники.

Но вопрос, откуда берётся случайность, остаётся одним из самых глубоких вопросов науки. Я не буду делать вид, что у меня есть ответ. Я лишь замечу, что это тот редкий случай, когда мы можем отчётливо видеть границу нашего понимания: не туманную, а ясную линию, за которой начинается неизвестное.

Глава 18. Измерение, которое меняет эксперимент

Если ты хочешь узнать температуру воды в кастрюле, ты опускаешь в неё термометр. Строго говоря, ты её слегка изменяешь: холодный термометр забирает немного тепла, вода остывает на доли градуса. Но этим можно пренебречь. Достаточно взять термометр поменьше, и влияние станет ещё меньше. В принципе, ничто не мешает сделать его сколь угодно малым.

Так устроена классическая физика. Измерение, конечно, взаимодействие, но оно сколь угодно слабое, если постараться. Поэтому мы привыкли считать, что можно узнать всё о системе, не потревожив её. Мы спокойно изучаем планеты, отражённый от которых свет их ничуть не меняет. Мы фотографируем спящего ребёнка, и вспышка, пожалуй, влияет на него больше, чем сама идея измерения.

В квантовом мире это допущение перестаёт работать. Не потому, что приборы грубые, а потому, что взаимодействие нельзя сделать меньше определённого предела. Квант энергии, квант действия, определяемый постоянной Планка, это минимальная порция. Слабее, чем в один квант, не получится. А для электрона или фотона один квант, это иногда всё, что у него есть.

То, что измерение в квантовой механике влияет на систему, не выдумка философов и не метафора. Это точно описанная и многократно проверенная особенность. Попробуем увидеть её в конкретном опыте.

Вернёмся к спину, о котором говорили в пятнадцатой главе. В 1922 году в Франкфурте Отто Штерн и Вальтер Герлах пропускали пучок атомов серебра через неоднородное магнитное поле. Атомы, обладающие магнитным моментом, отклонялись в разные стороны в зависимости от ориентации, и на пластинке-детекторе возникали два пятна, а не сплошная полоса, как следовало ожидать от классической физики. Спин оказался квантованным. Опыт сыграл огромную роль в становлении квантовой теории и позже был усовершенствован.

Теперь представим цепочку. Первый прибор Штерна — Герлаха выделяет атомы со спином «вверх» вдоль вертикали и отбрасывает остальные. Второй, повёрнутый на девяносто градусов, измеряет спин вдоль горизонтали. Результат: половина «вправо», половина «влево». Выбираем только тех, у кого «вправо», и пропускаем через третий прибор, снова вертикальный. Что получится?

По логике классической физики, мы уже отобрали атомы со спином «вверх» на первом этапе, так что на третьем должны получать только «вверх». Но результат другой: снова половина «вверх» и половина «вниз». Информация о вертикальном спине, полученная на первом этапе, оказалась стёрта измерением горизонтального спина. Мы не просто узнали новое. Мы изменили систему так, что прежнее знание перестало быть верным.

Вот что имеют в виду физики, когда говорят, что некоторые измерения несовместимы. Нельзя одновременно знать вертикальный и горизонтальный спин, потому что измерение одного разрушает определённость другого. Это тот же принцип неопределённости, но в другом обличье.

Этот факт можно использовать, причём в очень практичных целях. В 1984 году Чарльз Беннетт и Жиль Брассар предложили протокол квантовой криптографии, известный сегодня по их инициалам как BB84. Идея проста и красива. Отправитель посылает получателю фотоны, закодировав биты в их поляризации, причём для разных фотонов выбирает случайным образом один из двух несовместимых способов кодирования. Получатель тоже случайно выбирает, как измерять. Потом они по открытому каналу сообщают друг другу, какие способы использовали, и оставляют только те биты, где способы совпали. Остальные отбрасывают.

А теперь представим, что между ними сидит подслушивающий. Ему нужно измерять фотоны, чтобы узнать содержимое. Но он не знает, какой способ выбрал отправитель, и в поло-

вине случаев угадывает неверно. Неверное измерение необратимо искажает фотон, и получатель при сверке получит заметное число ошибок. Следовательно, присутствие подслушивающего обнаруживается. Не потому, что он оставил следы, а потому, что сам акт измерения не может не оставить следов. Безопасность гарантируется не сложностью вычислений, как в обычной криптографии, а законами физики. Сегодня системы квантового распределения ключей работают на оптоволоконных линиях и даже через спутники.

Из этих примеров ясно, что в квантовой физике измерение это не пассивный взгляд со стороны, а событие, часть физического процесса. Прибор взаимодействует с системой, после чего их судьбы оказываются связаны. Состояние системы после измерения зависит от того, что именно мы измеряли и что получили.

Но тут возникает тонкость, которую нужно обозначить, чтобы не впасть в ошибку. Влияние измерения на систему не нужно путать с влиянием «взгляда» или «сознания». Прибор не нуждается в человеке. Фотон, поглощённый детектором, меняет состояние независимо от того, смотрит ли кто-нибудь на показания. Взаимодействие происходит между физическими системами, и сознание наблюдателя в нём вовсе не участвует. Об этом мы подробно поговорим в третьей части, потому что именно здесь чаще всего возникают самые распространённые недоразумения.

Есть ещё одна интересная сторона дела. В последние десятилетия физики научились проводить так называемые слабые измерения, при которых система возмущается лишь незначительно, а информации извлекается немного. Если повторить такой опыт много раз и усреднить результаты, то можно получить сведения о системе, почти не нарушая её состояния. Эти методы позволили, например, в 2011 году проследить среднее поведение фотонов в опыте с двумя щелями, как бы «заглянув» в щели, не уничтожая интерференцию полностью. Результаты вызвали бурные обсуждения, и физики спорят до сих пор, как их истолковывать.

Интересно и другое. Если измерять систему очень часто, можно замедлить или даже остановить её эволюцию. Это называется квантовым эффектом Дзенона, по аналогии с древнегреческим парадоксом о летящей стреле. Нестабильный атом, который постоянно «проверяют» на предмет распада, распадается медленнее. Эффект наблюдали в лабораториях, он не умозрительная причуда, а проверенный факт. Но и здесь не нужно спешить с мистическими выводами: «проверка» означает физическое взаимодействие, а не взгляд.

Всё это говорит о том, что между системой и прибором существует тесная связь, и разделить их в квантовом мире нельзя так же легко, как в классическом. Мы не можем сказать, каким был электрон «сам по себе», а затем «что мы с ним сделали». Мы можем лишь описать, что произошло в целой ситуации, которая включает и электрон, и прибор.

Нильс Бор настаивал, что именно это имеет принципиальное значение. Объект и средство наблюдения образуют неделимое целое, и отделить одно от другого, говорил он, значит исказить описание. Не все с этим соглашались. Но сам факт, что измерение в квантовой физике нельзя считать безразличным вмешательством, остаётся общепринятым.

Это и есть то, что стоит за красивой формулой «наблюдатель влияет на наблюдаемое». Влияет, но не так, как нам сначала хочется думать. Не взглядом, не мыслью, не желанием, а физическим взаимодействием, которое от нас не зависит и не может быть уменьшено сколь угодно сильно. Вся тонкость в том, что именно называть наблюдателем, и об этом нам ещё предстоит поговорить.

Глава 19. Квантовая запутанность

В 1935 году в журнале Physical Review вышла статья из четырёх страниц, у которой три автора: Альберт Эйнштейн, Борис Подольский и Натан Розен. Название было вопросом: можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным? Ответ авторы дали отрицательный. Статья стала одной из самых цитируемых в истории физики, хотя сами авторы получили совсем не то, чего добивались.

Идея была такова. Квантовая механика допускает ситуации, когда две частицы возникают вместе и затем разлетаются на огромное расстояние, но остаются в особом состоянии: их свойства взаимосвязаны. Измерив положение одной частицы, мы мгновенно узнаем положение другой. Измерив импульс одной, узнаем импульс другой. А ведь, по принципу неопределённости, положение и импульс одной и той же частицы одновременно точно не определены. Значит, рассуждали авторы, если частицы далеко и ничто не может повлиять на вторую, пока мы возимся с первой, то у второй частицы должны быть заранее определённые и положение, и импульс. Квантовая механика этого не описывает. Значит, она неполна.

Эйнштейн, как всегда, старался отстоять картину мира, в которой у вещей есть определённые свойства независимо от измерений, а воздействия не могут передаваться быстрее света. В письме Борну 1947 года он назвал альтернативу «призрачным дальнодействием». Выражение прижилось.

Бор ответил в том же году, и его ответ, по мнению многих читателей, был довольно туманным. Он утверждал, что нельзя говорить о свойствах второй частицы отдельно от всей экспериментальной установки. Спор ушёл в философию.

Почти сразу после статьи Эйнштейна, Подольского и Розена Эрвин Шрёдингер дал этому явлению название: «Verschränkung», по-русски запутанность. Он писал, что это не одна из черт квантовой механики, а её отличительная черта, которая заставляет полностью оторваться от классического мышления.

Попробуем объяснить, что такое запутанность, не прибегая к формулам. Допустим, у нас есть пара частиц, приготовленных так, что их суммарный спин равен нулю. Это значит, что если одна частица при измерении вдоль какого-либо направления окажется «вверх», то вторая вдоль того же направления окажется «вниз». Каждая из частиц по отдельности совершенно случайна: «вверх» или «вниз» с равными шансами. Но вместе они согласованы идеально.

На это можно ответить: ну и что? Возьмём пару перчаток, положим каждую в отдельную коробку и отправим коробки в разные города. Открыв свою коробку и увидев левую перчатку, ты мгновенно узнаешь, что в другом городе лежит правая. Никакой мистики, просто корреляция, заложенная заранее.

Именно так, по сути, рассуждал Эйнштейн. Свойства заранее определены, мы просто не знали, какие. Это называется теорией скрытых параметров, и она кажется самой естественной.

Но в 1964 году ирландский физик Джон Белл, работавший в Женеве в ЦЕРНе, показал, что у этой простой идеи есть проверяемое следствие. Он доказал теорему, которую теперь называют неравенствами Белла. Суть в том, что, если свойства частиц заданы заранее и ничто не передаётся между ними быстрее света, то корреляции между результатами измерений, сделанных в разных направлениях, не могут превысить определённый предел. Квантовая механика же предсказывает, что для некоторых пар направлений предел будет превышен.

В этом всё дело. Белл превратил философский спор в физический эксперимент. Больше не нужно было спорить, что красивее. Нужно было посмотреть, как на самом деле.

Первые эксперименты поставили в 1970-х, самые известные выполнил Ален Аспе во Франции в начале 1980-х. Результат: неравенства Белла нарушаются, причём именно так, как предсказывает квантовая механика. Позже в опытах закрывали одну лазейку за другой, кото-

рые могли бы позволить скептикам объяснить результат иначе. В 2015 году сразу три группы, в Делфте, в Вене и в Национальном институте стандартов США, получили результаты, в которых были закрыты основные из этих лазеек одновременно. В 2022 году Нобелевскую премию по физике за эти работы получили Ален Аспе, Джон Клаузер и Антон Цайлингер.

Что же это значит? Значит, что мир не описывается теориями, в которых частицы несут заранее определённые свойства и взаимодействуют только локально. Хотя бы одно из этих допущений должно быть отброшено. Какое именно, физики спорят. Одни отказываются от локальности, как в теории Бома. Другие отказываются от определённости свойств до измерения. Третьи, как сторонники многомировой интерпретации, отказываются от единственности результата. Все варианты странные.

Важно понимать, чего запутанность не позволяет. Нельзя с её помощью передавать сообщения быстрее света. Результат измерения на одной частице случаен, и ни один наблюдатель, глядя на свою частицу в отдельности, не может узнать, измеряли ли что-нибудь на второй. Чтобы заметить корреляцию, нужно сравнить результаты обеих сторон, а для этого их надо передать обычным способом, не быстрее света. Эйнштейновская теория относительности остаётся нетронутой. Запутанность странная, но она не нарушает причинность в смысле передачи сигналов.

То же касается квантовой телепортации. Название вводит в заблуждение: никакое вещество не переносится. Передаётся лишь квантовое состояние, причём для этого нужна запутанная пара и обычный канал связи. Исходная частица при этом теряет своё состояние. Первые эксперименты провели в конце 1990-х, и теперь телепортацию состояний осуществляют на расстояниях в сотни километров, в том числе через спутник.

Запутанность лежит и в основе других технологий. Квантовые компьютеры используют её как ресурс для вычислений. Квантовые линии связи, которые мы упоминали в предыдущей главе, могут использовать запутанные пары. Атомные часы нового поколения и некоторые сверхчувствительные датчики тоже полагаются на неё.

И в популярной литературе вокруг запутанности нагромождено множество недоразумений. Её часто преподносят как доказательство того, что «всё во Вселенной связано со всем», что мысли способны мгновенно влиять на далёкие объекты, что существует некая космическая сеть сознания. Ничего такого запутанность не показывает. Она хрупка: любое взаимодействие с окружением быстро разрушает её. Она касается строго определённых систем, которые специально приготовлены. И она не передаёт ни информации, ни воли, ни намерений.

Это не уменьшает её значения, а делает честнее. Запутанность — один из самых глубоких фактов о природе, и приукрашивать его не нужно. Достаточно того, что две частицы, разделённые километрами, ведут себя как единая система, и ни одна теория, в которой каждая из них живёт сама по себе с заранее прописанными свойствами, этого не объясняет.

Эйнштейн умер в 1955 году, не дожив до работ Белла и экспериментов Аспе. Любопытно, как бы он отреагировал. Возможно, с присущим ему упорством пошёл бы искать лазейку. А возможно, радовался бы тому, что спор, который казался философским, превратился в вопрос, на который можно ответить в лаборатории. Мне хочется думать, что второе.

Глава 20. Вселенная, которая не обещала нам простых ответов

В шестьдесят пятом году Ричард Фейнман читал в Корнелле цикл лекций о характере физических законов и позволил себе фразу, которую потом повторяли десятилетиями. Он сказал, что может с уверенностью утверждать: квантовую механику никто не понимает. Зал, как свидетельствуют записи, засмеялся. А Фейнман продолжил серьёзно: не надо спрашивать себя, как это может быть, потому что вы зайдёте в тупик, из которого ещё никто не выбрался.

Звучит как шутка, и в ней действительно есть шутка. Но в ней есть и нечто такое, о чём стоит подумать. Человек, получивший Нобелевскую премию за квантовую теорию, говорит, что не понимает её. При этом он умеет ею пользоваться безупречно. Эти две вещи, умение вычислять и понимание, у нас с квантовой механикой разошлись, и ни одно поколение физиков с тех пор не сумело их свести.

Странно ли это? Если вдуматься, не так уж. Что значит «понимать» в науке? Обычно мы понимаем явление, когда можем свести его к чему-то знакомому. Падение яблока объясняется притяжением, которое мы привыкли ощущать. Волны на воде объясняются колебаниями, которые мы видели. Но электрон не похож ни на что знакомое. Нет привычных образов, к которым его можно свести, потому что вся наша интуиция выросла в мире, где квантовые эффекты усреднены до неразличимости. Мы пытаемся объяснить другое с помощью привычного, и это не получается.

Среди физиков практиков есть шутливое правило, которое приписывают разным авторам: «заткнись и считай». Смысл в том, что не нужно тратить время на философские вопросы, математика работает, и ладно. Подход разумный в повседневной лаборатории, и многие великие открытия сделаны именно так. Но у него есть цена. Вопросы, которые отложили, не исчезают. Они копятся, как неоплаченные счета, и рано или поздно кто-то возвращается к ним, обычно тогда, когда с ними сталкивается практика, как это произошло с запутанностью и квантовыми вычислениями.

Что же квантовая теория нам обещает и чего не обещает? Попробуем сказать честно.

Она обещает предсказания. Для огромного класса явлений от структуры атомов до свойств материалов она позволяет вычислить результат опыта с точностью, которой нет у других теорий. Она даёт рецепты: вот состояние системы, вот что мы собираемся измерить, вот вероятности возможных результатов. И ни разу за почти сто лет эти рецепты не подвели.

Она не обещает рассказать, что происходит между измерениями. Если ты спросишь, где находился электрон, пока никто не измерял его положение, теория скажет, что вопрос поставлен неудачно, или даст ответ, зависящий от выбранной интерпретации. Это не недосмотр, а фундаментальная особенность.

Она не обещает единой картины. Копенгагенская интерпретация, многомировая интерпретация Эверетта, теория Бома, модели спонтанного коллапса — все они совместимы с наблюдаемыми фактами. Они рассказывают очень разные истории о том, что такое реальность. В одной ничего нет, кроме результатов измерений и вероятностей. В другой существует бесконечное число параллельных ветвей. В третьей у частиц есть точные траектории, управляемые скрытой волной. В четвёртой мир время от времени самопроизвольно «схлопывается». Опросы среди физиков показывают, что нет интерпретации, которую поддерживало бы подавляющее большинство. Это очень необычная ситуация для зрелой науки.

Она не обещает комфорта. Всякий, кто изучает квантовую механику всерьёз, рано или поздно сталкивается с чувством, которое хорошо описал Бор. Он говорил, что тот, кого не

потрясла квантовая теория, не понял её. Фраза, возможно, слегка преувеличена, но суть передаёт верно.

И теперь нужно вернуться к вопросу, ради которого эта часть книги вообще задумана. Что квантовая физика говорит о познании? Не о Вселенной вообще, а именно о том, что мы можем знать и как.

Первое. Она показывает, что идеал абсолютно объективного описания, при котором мир описывается без всякой ссылки на то, как мы его исследуем, достижим не везде. На самом малом масштабе то, что мы можем сказать о системе, зависит от вопросов, которые мы ей задаём. Это не значит, что мир выдуман нами. Это значит, что знание о нём всегда складывается из двух частей: что есть и что мы спросили.

Второе. Она показывает, что понятие «определённое свойство» имеет пределы применимости. Привычная идея о том, что у каждой вещи в каждый момент есть полный набор значений всех возможных характеристик, на уровне элементарных частиц не работает. У электрона нет одновременно точной траектории и точной скорости. Нет заранее прописанного результата для каждого мыслимого измерения. Это не недостаток нашего знания, а свойство мира, что подтверждено экспериментами с нарушением неравенств Белла.

Третье. Она показывает, что случайность, возможно, не только следствие незнания. Это спорный вывод, потому что существуют детерминистические интерпретации. Но стандартная теория не содержит механизма, определяющего исход отдельного измерения.

Четвёртое, и самое тонкое. Она показывает, что наука способна идти дальше интуиции. Мы не понимаем квантовый мир в привычном смысле, но мы построили теорию, которая его описывает, и технологии, которые на ней работают. Человеческий разум, возникший для охоты и собирательства, оказался способен приоткрыть то, что не имеет к охоте и собирательству никакого отношения. Это само по себе удивительно, и я не перестаю удивляться.

Однако нужно сказать и о том, чего квантовая физика не показывает. Она не показывает, что реальность создаётся сознанием. Она не показывает, что мысль меняет физический мир. Она не показывает, что всё возможно, что «всё есть энергия и вибрация» в том смысле, в каком эти слова употребляют в популярных курсах. Она не опровергает существования объективного мира. Она не доказывает ни одну религиозную или философскую систему. Все эти утверждения могут быть предметом размышлений, но на физику они не опираются, и ссылаться на неё в таких случаях значит злоупотреблять её авторитетом.

Я делаю это замечание не из педантизма. Как мне кажется, у читателя, пришедшего к квантовой физике в поисках смысла, есть право получить честную картину. Она менее эффектна, чем та, что рисуют многие популярные книги. Зато на неё можно опереться. Фундамент из красивых, но недоказанных идей разрушается при первом серьёзном вопросе, а фундамент из проверенных фактов, даже странных, остаётся.

Подведём черту под второй частью без итогов и выводов, а просто посмотрим, где мы оказались. Мы прошли путь от Планка, который не хотел верить в кванты, до физиков нашего времени, которые строят из них компьютеры. Мы увидели, что свет ведёт себя и как волна, и как частица, что электроны проходят через две щели сразу и всё же регистрируются целиком, что мир подчиняется вероятностям, а две удалённые частицы могут вести себя как единое целое. Всё это подтверждено экспериментами, и ничего из этого не требует мистики.

Но в рассказе остался пробел, и он бросается в глаза. Мы много раз говорили слово «измерение». Говорили, что измерение меняет систему, что после него суперпозиция превращается в один результат, что присутствие детектора у щелей уничтожает интерференцию. Но что такое измерение? Чем оно отличается от обычного взаимодействия? Кто или что должно «измерять»? Нужен ли для этого человек? Достаточно ли прибора? Должен ли в цепочке событий быть кто-то, кто осознаёт результат?

Эти вопросы не заключительные, а, наоборот, начальные. Квантовый мир действительно удивителен. Но самое интересное начинается там, где мы спрашиваем: что именно происходит, когда мы измеряем его?

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.