



Как устроена реальность

ОТ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ
ДО ТЁМНОЙ МАТЕРИИ
И КВАНТОВОЙ ГРАВИТАЦИИ

Итан Колдуэлл

Итан Колдуэлл

Как устроена реальность

«Автор»

2026

Колдуэлл И.

Как устроена реальность / И. Колдуэлл — «Автор», 2026

Итан Колдуэлл рассказывает о том, что учёные смогли установить об устройстве мира и какие вопросы современной физики пока остаются без ответа. Автор начинает с пространства, времени, движения и света, а затем постепенно переходит к квантовым явлениям, устройству Вселенной, тёмной материи и попыткам объединить квантовую теорию с гравитацией. Для чтения не нужны специальная подготовка, высшая математика или знание формул. Автор объясняет сложные идеи последовательно и простым языком, не перегружая текст специальными обозначениями и лишними терминами. Книга рассчитана на тех, кому хочется без спешки узнать больше о пространстве, времени, Вселенной, тёмной материи и самых больших нерешённых вопросах современной физики — вечером, перед сном или во время ночного прослушивания.

© Колдуэлл И., 2026

© Автор, 2026

Содержание

Часть I. Как мы узнаём то, чего не видим	6
Глава 1. Как узнать то, чего нельзя увидеть	6
Что осталось в детекторе	6
Что стоит за зарегистрированным сигналом	7
От сигнала — к источнику	7
Почему модель не делает результат произвольным	8
Успешная модель не обязательно буквально описывает	9
фундаментальное устройство мира	
Почему одного совпадения мало	10
Теория — не синоним догадки	10
Как объяснения проверяют по наблюдениям	11
Не увидеть — не значит не знать	11
Глава 2. Почему ньютоновская механика остаётся точным	13
приближением	
Точность меняет вопрос	13
Новая теория должна сохранить старый успех	13
Приближение — не признание поражения	14
Как устанавливают область применимости	14
Граница редко похожа на стену	15
За пределами проверенного начинается новый вопрос	15
Границу нельзя дорисовать после провала	16
Шире — не значит окончательно	16
Знать предел — тоже знать	17
Часть II. Как складывается современная картина мира	18
Глава 3. Что значит «одновременно»?	18
Событие и весть о нём	18
Одних часов мало	19
Вторая сеть часов	19
Разные координаты — одна структура	20
Причина не может стать следствием	20
Часы, которым это нужно на практике	21
Что осталось от общего «сейчас»	21
Глава 4. Почему в свободном падении исчезает вес	22
Карандаш, который больше не падает на пол	22
Увеличим кабину	23
Кривизна начинается с того, что нельзя убрать	23
Свободное движение без невидимых рельсов	24
Как гравитация влияет на сравнение хода часов	24
Какие эксперименты подтверждают геометрическое	24
описание гравитации	
Граница, которая не является стеной	26
Что на самом деле восстановил ЕНТ	26
Горизонт — ещё не сингулярность	27
Где заканчивается классический ответ	27
Глава 5. Почему одинаковый опыт даёт разные результаты	29
Один запуск и тысяча запусков	29

Почему обычных вероятностей недостаточно	30
Узор, собранный по одному событию	30
Неопределённость существует ещё до плохого прибора	31
Между подготовкой и измерением	32
Когда целое нельзя заменить списком частей	32
Можно ли объяснить всё заранее согласованными локальными ответами	33
Корреляция без сверхсветового телефона	33
Вероятность как закон, а не отсутствие закона	34
Глава 6. Почему частиц недостаточно	35
Когда список участников меняется	35
Частица появляется как состояние	36
Конец ознакомительного фрагмента.	37

Итан Колдуэлл

Как устроена реальность

Часть I. Как мы узнаём то, чего не видим

Глава 1. Как узнать то, чего нельзя увидеть

14 сентября 2015 года два детектора LIGO зарегистрировали короткий согласованный сигнал. На экране не появилась фотография далёкого объекта. Приборы не выдали готовую надпись: «столкнулись две чёрные дыры». Они записали изменение величины, для измерения которой были построены, — относительную деформацию (strain).

И всё же после проверки данных исследователи смогли сказать о далёком источнике гораздо больше, чем содержала сама запись прибора.

Разница между утверждениями «детектор зарегистрировал сигнал» и «мы узнали, что произошло далеко от Земли» показывает, как устроен переход от результата измерения к физическому выводу.

Как из записи прибора возникает знание о том, чего никто не видел непосредственно? Где кончается измерение и начинается вывод? Почему модель, участвующая в анализе, не превращает результат в произвольную догадку? И сколько оснований нужно, чтобы перейти от «это хорошо описывает данные» к более сильному утверждению о природе?

Эти вопросы важнее любого отдельного эксперимента. Мы будем встречать их снова, когда речь пойдёт о пространстве-времени, квантовых состояниях, тёмной материи и истории Вселенной. Но начать удобнее с одного сигнала — и разобрать последовательность действий, которая связывает зарегистрированный сигнал с научным выводом о его источнике.

Что осталось в детекторе

Любой прибор устроен для определённой работы. Термометр реагирует на температуру, фотоприёмник — на падающий свет, весы позволяют определить массу в заданных условиях. Даже самый сложный детектор не измеряет «реальность вообще». Он даёт данные о конкретной величине через конкретную измерительную процедуру.

У LIGO такой величиной служит очень малое относительное изменение длины двух длинных перпендикулярных плеч. Чтобы получить физически осмысленную запись, одного электрического отклика аппаратуры недостаточно. Нужно знать, как установка реагирует на воздействие, откалибровать этот отклик и понимать точность полученного результата.

Слово «неопределённость» здесь легко услышать неправильно. В быту оно часто значит: «мы не уверены» или «мы плохо знаем». В измерениях смысл точнее. Результат измерения обычно представляет собой не одно абсолютно точное число, а значение с указанной неопределённостью. Мы хотим знать не только полученное значение, но и насколько точно измерительная система позволяет его установить в данных условиях.

Это не слабость измерения. Число без сведений о его точности часто сообщает меньше, чем результат с честно указанной неопределённостью. Если длина стола известна с точностью до миллиметра, это не означает, что длина стола неизвестна. Наоборот, теперь известно, в каком диапазоне неопределённости находится измеренная длина.

То же относится к гораздо более сложным приборам. Их отклик калибруют, переводят в нужную физическую величину, проверяют состояние установки. Всё это ещё может оставаться

частью измерения, если мы по-прежнему говорим именно о той величине, которую определяет прибор.

Но интерес физика почти никогда не заканчивается на этом месте.

Детектор записал сигнал. Что его вызвало?

Вот здесь начинается следующий шаг.

Что стоит за зарегистрированным сигналом

Представим, что на записи появился необычный всплеск. Возможностей много. Это может быть интересующее физическое событие. Может быть помеха. Может быть особенность работы аппаратуры. Может оказаться случайным совпадением нескольких фоновых процессов.

Поэтому исследователи не просто смотрят на красивую кривую и выбирают наиболее впечатляющее объяснение. Они спрашивают, насколько зарегистрированный сигнал статистически отличается от ожидаемого фона, согласуются ли записи разных детекторов, нет ли известных инструментальных или внешних причин, способных породить похожий эффект.

Именно так проверяли GW150914. В данных обоих детекторов появился согласованный по времени сигнал. Далее последовал анализ: сравнение с ожидаемыми формами сигнала, оценка фоновых совпадений, проверка состояния детекторов и возможных помех.

Полученный результат уже не был просто строкой измерительного канала. Это был **вывод из данных**.

Разница принципиальна, но она не делит науку на «надёжные измерения» и «сомнительные выводы». Хороший вывод может быть чрезвычайно надёжным. Просто в нём появляется больше звеньев, а значит, мы должны понимать, какие именно.

Можно проверить калибровку прибора. Можно проверить процедуру отбора данных. Можно отдельно исследовать шум. Можно посмотреть, сохраняется ли результат при разумном изменении методов анализа. Чем яснее описаны переходы от отклика прибора к откалиброванным данным, а затем от данных к физическому выводу, тем легче проверить каждый этап анализа.

Косвенность сама по себе ничего не говорит о качестве знания.

Мы постоянно узнаём о вещах по их следам. Врач судит о процессах внутри организма по снимкам и анализам. Астроном — о звезде по пришедшему свету. Геолог — о прошлом Земли по слоям пород. В каждом случае важен не физический доступ человека к самому объекту, а связь между наблюдаемым следом и заключением.

В науке эту связь стараются сделать проверяемой. Какие данные получены? Как они обработаны? Что могло дать похожий сигнал? Какие предположения понадобились для следующего шага? Что изменится, если предположение оказалось неверным?

Поэтому «косвенно» и «ненадёжно» — не синонимы. Иногда длинная цепочка независимых проверок даёт основания для гораздо большей уверенности, чем непосредственное человеческое впечатление.

От сигнала — к источнику

Предположим, анализ дал серьёзные основания не сводить необычную запись к исследованным вариантам случайного или инструментального шума. Мы всё ещё не получили автоматически свойства далёкого источника.

Чтобы их восстановить, данные приходится сравнивать с моделями возможных сигналов. Для GW150914 именно так оценивали характеристики системы, породившей зарегистрированный отклик. Это уже реконструкция: в ней участвуют данные, физические модели, принятые в анализе предположения и статистическая процедура.

Поэтому свойства источника не были отдельными цифрами, которые прибор «прочитал» непосредственно.

Детектор дал измерительный сигнал.

Анализ позволил оценить, насколько уверенно этот сигнал можно отличить от изученных вариантов шума.

Сопоставление данных с моделями позволило реконструировать свойства источника — не как абсолютно точные значения, а как оценки с диапазонами, зависящие от данных и условий анализа.

Три шага связаны, но не одинаковы.

Это различие не уменьшает силу результата. Скорее оно объясняет, откуда эта сила берётся. Если бы всё скрывалось за одной фразой «учёные увидели», проверить её было бы трудно. Когда цепочка разобрана, вопросы можно задавать каждому звену отдельно.

Что именно измерил прибор?

Как проверяли шум?

Какие предположения понадобились для реконструкции?

Насколько результат устойчив к их разумным изменениям?

Какие другие данные способны поддержать или ограничить вывод?

Научное знание часто оказывается надёжным не потому, что между нами и объектом нет посредников, а потому, что посредники известны и проверяемы.

Физическое объяснение самого GW150914 нам понадобится позже, когда речь пойдёт о пространстве-времени и гравитации. Сейчас важен другой вывод: из одного эксперимента можно получать выводы с разной степенью зависимости от обработки данных и моделей; поэтому называть их все одним словом «наблюдали» неточно.

Почему модель не делает результат произвольным

На этом месте возникает естественное возражение.

Если для перехода от сигнала к источнику понадобилась модель, не значит ли это, что ответ заранее вложили в расчёт?

Нет. Но и относиться к модели как к прозрачному окну, через которое мы без всяких условий смотрим на природу, тоже не стоит.

Модель — способ представить те стороны системы, которые нужны для определённого вопроса. В ней выделяют необходимые величины, задают связи между ними и формулируют предположения, а затем получают результат, который можно сравнить с данными.

Само слово иногда сбивает с толку. Детская модель самолёта — уменьшенная копия настоящего самолёта. Научная модель не обязательно является такой копией. Её могут использовать, чтобы рассчитать траекторию, описать изменение сигнала, связать наблюдаемые величины или проверить следствие теории.

Поэтому научную модель оценивают не по внешнему сходству с предметом, а по тому, насколько точно она связывает заданные физические величины и воспроизводит или предсказывает наблюдаемые результаты в заявленных условиях.

Представим две модели одного процесса. Пока обе дают одинаковый ответ там, где у нас есть данные, опыт может не позволять выбрать между ними. Но если в новых условиях их предсказания расходятся, появляется возможность проверки. По наблюдениям нельзя заранее определить, какая модель «красивая» или «глубокая». Зато можно проверить, какая из них выдерживает конкретное испытание.

Модель не остаётся свободной историей: её предсказания сопоставляют с результатами измерений.

Кроме того, существенные предположения модели стараются не прятать. Тогда можно спросить, насколько от них зависит результат. Если небольшое разумное изменение предпосылки разрушает вывод, это важная информация. Если вывод сохраняется, наше доверие к нему растёт.

Но фраза «модель работает» всё равно неполна.

Работает для чего?

Какой результат она должна воспроизводить?

С какой точностью?

При каких проверенных условиях?

Вопрос о границах применимости мы подробно разберём дальше. Здесь достаточно заметить одну вещь: успешная проверка обосновывает применение модели только к тем величинам и условиям, которые были проверены или надёжно связаны с проверенными режимами.

Успешная модель не обязательно буквально описывает фундаментальное устройство мира

Теперь можно сделать ещё один шаг — и именно на нём научно-популярные рассказы часто становятся слишком смелыми.

Допустим, модель раз за разом успешно предсказывает результаты экспериментов. Следует ли отсюда, что каждый объект и каждый элемент математического описания обязательно существует в природе буквально в той форме, в какой мы его представили?

Такое утверждение требует собственных оснований.

Это не призыв считать модели фикциями. Между «модель полезна» и «модель буквально тождественна устройству мира» есть множество более содержательных возможностей.

Иногда объект, введённый в теорию, получает поддержку из разных независимых экспериментов, и наши основания говорить о нём становятся всё сильнее. Иногда разные математические описания приводят к одним и тем же проверяемым результатам. Иногда модель превосходно решает практическую задачу, но вопрос о физической природе одного из её элементов остаётся открытым.

Лучше не пытаться решить всё одним словом.

Сначала спросить: **что именно подтверждено опытом?**

Потом: **что мы выводим с помощью модели?**

И лишь затем: **какое более сильное утверждение о природе мы хотим сделать — и достаточно ли оснований именно для него?**

Эта последовательность особенно понадобится во второй половине книги. Там появятся идеи, обладающие серьёзной математической структурой, но ещё не подтверждённые как описание нашего мира.

Математически возможное не становится реальным только потому, что оно допускается уравнениями.

Но и отсутствие подтверждения нельзя автоматически превращать в опровержение. Иногда эксперимент действительно исключает конкретный вариант. Иногда ограничивает лишь часть возможных параметров. Иногда проверка пока недостаточно чувствительна.

Научная осторожность здесь — не привычка говорить уклончиво. Она нужна, чтобы не делать из данных более сильный вывод, чем позволяют сами измерения, процедура анализа и использованные предположения.

Почему одного совпадения мало

Предположим, модель хорошо описала один набор данных. Это хороший знак, но сам по себе ещё не идеальная проверка.

Особенно ценны ситуации, когда разные эксперименты проверяют разные следствия одной и той же модели или теории. Тогда объяснению приходится выдерживать не одно удачное совпадение, а несколько независимых требований.

Есть и обратная сторона. Если две идеи дают одинаковые наблюдаемые последствия во всех доступных нам экспериментах, имеющихся данных недостаточно, чтобы различить их. Иногда честный итог проверки именно таков: несколько вариантов пока остаются наблюдательно неразличимыми.

Поэтому научный спор — в лучшем случае не соревнование красноречия. Он постепенно превращается в вопрос: **какое наблюдение могло бы показать разницу?**

Хорошее объяснение должно допускать проверки, исход которых не предрешён самим объяснением. Его предсказания должны иметь возможность не сбыться.

Именно поэтому проверка альтернатив так важна в истории GW150914. Одной формы сигнала было недостаточно, чтобы принять весь рассказ о его происхождении. Исследователи проверяли, не связан ли результат с известными особенностями детекторов и окружающей среды, оценивали фон и сравнивали данные с моделями. Каждый шаг сужал пространство допустимых объяснений.

Не одним чудесным доказательством, а последовательностью проверок.

Теория — не синоним догадки

Есть несколько слов, которые в популярных разговорах почти гарантированно создают путаницу. Одно из них — «теория».

В быту мы можем сказать: «У меня есть теория, куда исчезли ключи», имея в виду догадку. В науке одного ярлыка «теория» недостаточно, чтобы узнать степень уверенности, но речь обычно идёт о гораздо более развитой системе идей, которая связывает явления и позволяет получать проверяемые следствия.

Поэтому вопрос «это факт или всего лишь теория?» часто поставлен плохо. Конкретная теория может иметь огромный массив экспериментальной поддержки в определённой области. А отдельное утверждение внутри большой теоретической программы может оставаться непроверенным.

Слово **гипотеза** обычно обозначает более конкретное предполагаемое объяснение или утверждение, которое нужно проверять. Но и оно ничего не гарантирует само по себе: гипотеза может получить поддержку, быть ограничена данными или оказаться несостоятельной.

Интерпретация отвечает на другой тип вопроса — как понимать физический смысл формализма и результатов. Позже это станет особенно важно в квантовой физике, где разные интерпретации могут разделять значительную часть одних и тех же проверенных предсказаний.

Нам не нужен идеальный словарь, одинаковый для всех наук. Нужна более простая привычка: не судить о надёжности идеи по названию категории.

Что именно она утверждает?

Что из этого проверялось?

Какие наблюдения отличают её от конкурирующих вариантов?

Вот где появляется содержательная разница.

Как объяснения проверяют по наблюдениям

Вернёмся к сигналу, с которого начали.

Представим, что для него есть несколько возможных причин. Как выбрать между ними?

Не голосованием и не красотой рассказа.

Если одна версия требует неисправности прибора, состояние прибора можно проверить. Если другая предполагает внешний источник помех, можно искать его следы. Если две модели дают различные формы наблюдаемого сигнала, эти различия можно сопоставить с данными.

Хорошая проверка устроена так, чтобы возможный результат имел последствия для наших объяснений.

Но здесь есть ловушка. Если один вариант не выдержал проверки, это ещё не делает автоматически истинным любой другой.

Предположим, исследователи исключили известную инструментальную помеху. Они получили основание отвергнуть именно эту причину в исследованных условиях. Чтобы перейти к более сильному выводу о происхождении сигнала, нужны соответствующие дополнительные данные и модели.

По той же причине фраза «не нашли» может означать очень разные вещи. Не нашли при какой чувствительности? В каком диапазоне? Какой именно вариант проверяли? Что осталось за пределами поиска?

Сила научного метода не в том, чтобы мгновенно выдавать окончательное «да» или «нет». Последовательные проверки исключают объяснения, несовместимые с измерениями, и оставляют меньше вариантов, согласующихся со всеми результатами.

Сначала исчезают варианты, несовместимые с измерением.

Потом дополнительные проверки отделяют похожие объяснения друг от друга.

Новые эксперименты могут ещё сильнее ограничить оставшиеся возможности.

Иногда после нескольких независимых проверок остаётся одно объяснение, которое согласуется со всеми доступными классами наблюдений. Иногда несколько вариантов продолжают давать одинаковые наблюдаемые следствия — и тогда честным ответом остаётся: пока различить их не удалось.

Не увидеть — не значит не знать

Теперь вернёмся к вопросу, с которого действительно стоит начинать эту книгу.

Как мы можем делать надёжные выводы о том, чего не наблюдаем непосредственно?

Потому что прямой взгляд — лишь один из способов получать сведения о мире и далеко не всегда лучший.

Надёжность возникает из другого.

Прибор измеряет определённую величину, а не «истину целиком».

Мы знаем, как этот результат получен и насколько он точен.

Если из данных делается дополнительный вывод, можно назвать необходимые шаги и предположения.

Если используется модель, её предсказания сравнивают с наблюдениями и проверяют там, где варианты расходятся.

Если хочется сделать более сильное утверждение о физической природе, для него нужны достаточно сильные основания.

В случае GW150914 путь от сигнала детектора к реконструкции далёкого источника был длиннее одного шага. Но длина цепочки сама по себе не превращает её в слабое место. Важно, доступны ли её звенья проверке и согласуются ли разные проверки между собой.

Это и будет одним из главных правил всей книги: **не спрашивать только, насколько необычно звучит утверждение; спрашивать, какие измерения, процедуры обработки, модели и предположения связывают исходные данные с этим утверждением.**

Иногда такая цепочка вывода коротка.

Иногда проходит через сложную модель.

Иногда приводит к очень надёжному выводу.

Иногда заканчивается честным «мы пока не знаем».

Именно поэтому в физике можно одновременно быть уверенным в одних вещах, осторожным в других и серьёзно обсуждать третьи, не смешивая всё в две корзины — «доказано навсегда» и «просто догадка».

Глава 2. Почему ньютоновская механика остаётся точным приближением

Если пересказывать историю физики одной строкой, получится что-то вроде: Ньютон описал движение, потом пришёл Эйнштейн и показал, что всё устроено сложнее.

Тогда возникает неудобный вопрос. Если теория относительности шире ньютоновской механики, почему ньютоновские законы до сих пор прекрасно работают?

Почему можно рассчитывать движение машины, мяча или механизма, не начиная каждый раз с релятивистской физики? Почему старое описание, которое оказалось не универсальным, не стало просто устаревшим?

Здесь скрыта одна из самых важных идей современной физики. Теория может быть ограниченной и при этом очень надёжной. Более широкая теория должна объяснить, почему прежняя теория давала правильные результаты в уже проверенных условиях.

Чтобы понять это, нужно отказаться от слишком грубой пары «правильно — неправильно» и задать более точный вопрос:

что именно мы хотим рассчитать, при каких условиях и насколько точно?

Точность меняет вопрос

Представим обычную задачу: нужно предсказать движение макроскопического тела при скоростях, которые малы по сравнению со скоростью света. В таких условиях ньютоновская механика даёт результаты, достаточные для огромного числа практических задач.

Слово «достаточные» здесь важнее, чем кажется.

Одна задача допускает небольшое отклонение результата. Другая требует гораздо большей точности. Описание, которое великолепно подходит в первом случае, может оказаться недостаточным во втором — хотя физическая система та же самая.

Это не значит, что истина меняется вместе с нашими желаниями.

Мы выбираем, какой результат нам нужен и какую ошибку можем допустить. Но соответствует ли расчёт реальности с такой точностью — уже не вопрос вкуса. Это проверяется сравнением с наблюдениями и измерениями.

Для задачи заранее задают требуемую точность. Затем по экспериментальным данным проверяют, остаётся ли ошибка используемого приближения меньше этой величины.

Именно поэтому фраза «теория работает» почти всегда неполна. Для какого результата? В каких условиях? С какой точностью?

Без указания условий и точности утверждение «теория работает» невозможно проверить.

Ньютоновская механика не обязана быть универсально точной, чтобы оставаться превосходным инструментом там, где её отклонения меньше того, что существенно для поставленной задачи.

И вот здесь появляется более интересный вопрос: почему теория относительности, которая описывает движение шире, не даёт в привычных условиях совершенно другие ответы?

Новая теория должна сохранить старый успех

Если прежняя теория много раз успешно описывала определённый класс явлений, более широкая теория должна согласоваться с этими успехами в тех же условиях.

Представим, что она предсказывала бы для обычного медленного движения результаты, резко отличающиеся от тех, которые давно подтверждены опытом. Тогда проблема была бы уже у нового описания: оно противоречило бы массиву известных наблюдений.

С релятивистской механикой происходит другое. В соответствующем низкоскоростном макроскопическом режиме она воспроизводит классические предсказания с требуемой точностью.

Это и объясняет, почему ньютоновская механика остаётся точным приближением в привычных условиях.

Не потому, что физики делают вид, будто Эйнштейна не было. И не потому, что существуют две независимые «правды», между которыми можно выбирать по настроению. Просто в знакомых условиях различие между более широким и более простым описанием оказывается настолько малым для нужного результата, что классическое приближение остаётся достаточным.

Поэтому инженер или физик, использующий ньютоновскую механику в подходящей задаче, не применяет «опровергнутую науку». Он пользуется описанием там, где его точность подтверждена и достаточна.

Здесь достаточно одной связи: более широкая в низкоскоростном пределе релятивистские уравнения воспроизводят классические результаты с требуемой точностью в том режиме, где они должны сохраняться. Что именно меняется в наших представлениях о пространстве и времени, когда классического описания становится мало, — отдельный вопрос.

И это конкретный пример, а не универсальная теорема о том, что любые две научные теории всегда вложены одна в другую одинаковым способом. В других областях связь между описаниями может быть устроена сложнее. Но более широкое описание всё равно должно считаться с тем, что уже выдержало опыт.

Приближение — не признание поражения

Теперь можно назвать то, чем мы только что пользовались.

Ньютоновское описание в рассматриваемых условиях работает как **приближение**.

В обычной речи слово звучит почти извинением: «примерно», «не совсем точно», «на глаз». В физике хорошее приближение может означать прямо противоположное — мы достаточно хорошо понимаем задачу, чтобы знать, какими эффектами можно пренебречь без заметного ущерба для нужного результата.

Смысл не в том, что отброшенные эффекты «не существуют». Смысл в том, что при данных условиях их вклад слишком мал, чтобы изменить ответ на требуемом уровне точности.

Возьмём совсем бытовой пример. Для одной задачи Землю достаточно считать почти шаром. Для другой нужна более подробная форма. Это не две конкурирующие Земли и не две версии истины. Просто разные задачи чувствительны к разным деталям.

В физике такая логика должна быть подкреплена гораздо строже. Нужно понимать, что именно мы рассчитываем, какие эффекты отбрасываем, насколько они способны изменить результат и насколько это изменение существенно для нашей цели.

Тогда приближение становится не жестом удобства, а частью контролируемого знания.

Одну и ту же систему можно описывать разными приближениями: более простого достаточно при одной точности и условиях, а при другой требуются дополнительные эффекты или другая теория.

Но само появление более глубокого описания не делает автоматически бесполезным всё, что было построено раньше.

Как устанавливают область применимости

У ограниченной теории должна быть граница — но слово «граница» легко представить слишком буквально.

Физики говорят об **области применимости**. Это не обязательно место в пространстве и не участок, за которым стоит невидимый забор. Речь о наборе условий, при которых конкретное описание проверено и даёт нужный результат с нужной точностью.

Для ньютоновской механики в нашем примере важны обычные макроскопические условия и скорости, малые по сравнению со скоростью света. Но даже такая формулировка ещё не заканчивает работу.

Чтобы фраза «теория применима здесь» имела научный смысл, надо понимать, что именно она должна предсказывать. Нужно знать условия задачи. Нужно заранее представлять, какая точность требуется. Нужны данные или уже проверенные связи, показывающие, что описание эту точность обеспечивает. А если мы собираемся перенести его в новый режим, надо отдельно спросить, на чём держится такой перенос.

Эти вопросы не образуют бюрократическую анкету. Они нужны потому, что без них слово «область» легко превращается в защитный ярлык.

Скажем, теория успешно предсказывает одну величину, но хуже справляется с другой. Или хорошо работает при обычной точности, но перестаёт быть достаточной для более чувствительного измерения. Тогда утверждение «теория проверена» без уточнений скрывает важную разницу.

Научная надёжность всегда относится к чему-то определённом.

Именно поэтому область применимости — не слабость теории, которую приходится стыдливо признавать. Это часть содержания того, что мы о ней знаем.

Граница редко похожа на стену

Есть ещё одна ловушка. Хочется спросить: существует ли точная граница, за которой ньютоновское приближение сразу перестаёт быть достаточным?

Такой единственной линии может не быть.

Если расхождение между более простым и более широким описанием растёт постепенно, момент, когда оно становится существенным, зависит от требуемой точности. Для грубой задачи поправка ещё незаметна. Для более точной — уже важна.

Поэтому фраза «после такой-то скорости ньютоновская механика становится неверной» без дополнительных условий может быть слишком грубой.

Обычно нет момента, в который прежнее описание внезапно становится неправильным. Скорее меняется величина эффекта, который оно не учитывает. Пока этот эффект меньше нужной точности, простое описание годится. Когда становится сравнимым с ней, приходится переходить к более широкому.

Это позволяет говорить о границах без мистики. Мы не ищем магический переключатель законов природы. Мы выясняем, в каком режиме различия между описаниями начинают иметь значение для конкретных наблюдаемых результатов.

И чем лучше мы это знаем, тем сильнее, а не слабее наше понимание.

За пределами проверенного начинается новый вопрос

Допустим, некоторое описание очень хорошо проверено в одном диапазоне условий. Можно ли применить его дальше?

Можно — например, чтобы получить новое предсказание. Но статус такого шага уже другой.

Исследователи постоянно проверяют существующие теории за пределами уже изученных режимов. Иначе новые режимы вообще невозможно было бы изучать.

Но есть принципиальная разница между двумя утверждениями:

«теория успешно работала здесь»

и

«поэтому она уже подтверждена там, где мы её ещё не проверяли».

Второе из первого не следует автоматически.

Перенос знакомого описания за пределы исследованных условий называют **экстраполяцией**. Сам по себе он не запрещён. Напротив, хорошая теория ценна в том числе тем, что позволяет делать новые предсказания.

Но подтверждение для нового режима нужно получить отдельно.

Если предсказание подтверждается — область уверенного применения расширяется. Если появляются систематические отклонения — нужно выяснять, где именно прежнее описание перестало быть достаточным и что вызывает расхождение. Если данных пока нет, честный статус таков: это перенос за пределы уже проверенного, а не ещё одно установленное достижение теории.

Так можно расширять область знания, не выдавая теоретическое ожидание за экспериментально установленный результат.

Границу нельзя дорисовать после провала

Теперь становится видно, почему опасна привлекательная фраза: «каждая теория верна в своей области».

Она похожа на то, что мы только что обсуждали, но теряет главное слово — **проверка**.

Если область можно объявить после любого неудобного результата, теория становится неуязвимой. Успех записывается ей в заслугу, а провал всегда выносится за границу задним числом.

Так научная область применимости не работает.

Предположим, описание заявлено как достаточно точное для определённого результата при определённых условиях. Проводится проверка — и расхождение оказывается больше допустимого. Нельзя просто сказать: «значит, эти условия на самом деле никогда не входили в область теории» и считать вопрос закрытым.

Возможно, границу действительно нужно пересмотреть. Но для пересмотра нужны основания: какой эффект был упущен, почему он становится существенным именно здесь, какие независимые данные это подтверждают, как изменённое описание ведёт себя в уже проверенных случаях.

Если область применимости пересматривают только после неудачного результата и без независимого физического основания, такое изменение не объясняет расхождение, а лишь исключает неудобный результат из заявленной области задним числом.

Требование заранее указывать область применимости и критерии точности не позволяет произвольно объявлять любой неудачный результат находящимся «за пределами теории».

У ньютоновской и релятивистской механики есть содержательная связь: более широкое описание воспроизводит успешный классический результат в подходящем режиме. За пределами этого режима пригодность классического описания приходится оценивать заново, а не считать подтверждённой по инерции.

Это гораздо сильнее, чем простое заявление: «у каждого своя правда».

Шире — не значит окончательно

Есть ещё один соблазн. Если релятивистская механика охватывает больше режимов, чем ньютоновская, хочется поставить точку: значит, мы добрались до окончательной фундаментальной теории природы.

Но из большего охвата это не следует.

В этой главе нам нужен гораздо более скромный и надёжный вывод: для рассматриваемого отношения релятивистское описание шире и в нужном низкоскоростном пределе сохраняет классические результаты. Это ничего не говорит само по себе о том, что любая часть математического описания обязана быть окончательной физической сущностью или что дальнейшее расширение невозможно.

Так же и с ньютоновской механикой. То, что она приближённая, не превращает её в фикцию. То, что теория относительности шире, не превращает её автоматически в последнюю возможную теорию.

Научное содержание находится между этими крайностями: мы можем очень хорошо знать, где описание работает, даже если не считаем его универсальным ответом на все вопросы.

Знать предел — тоже знать

В начале главы был парадокс: если теория относительности охватывает более широкий класс физических режимов, почему ньютоновская механика осталась необходимой частью физики?

Теперь ответ можно сформулировать без противоречия.

Ньютоновская механика надёжна там, где её предсказания проверены и дают достаточную точность для конкретной задачи. Теория относительности не стирает этот успех, а в соответствующем режиме воспроизводит его. Когда условия или требования к точности меняются настолько, что классическое приближение уже недостаточно, нужен более широкий язык.

Это не компромисс между двумя взаимоисключающими «истинами». Это два описания с разной областью применимости, связанные проверяемым образом.

Поэтому если проверенная теория перестаёт быть достаточной в определённом режиме, это не прекращает исследование. Часто наоборот: именно там начинается новый научный вопрос.

Какие допущения перестали быть безопасными? Какой эффект оказался заметным? Какое более широкое описание способно сохранить старые успехи и объяснить новые наблюдения?

Часть II. Как складывается современная картина мира

Глава 3. Что значит «одновременно»?

В двух далёких друг от друга местах происходят два коротких события — например, вспыхивают два автоматических источника света. Рядом с каждым стоят часы.

Допустим, оба циферблата в момент вспышки показывают одно и то же время. Можно ли теперь сказать, что события произошли одновременно?

Почти. Сначала нужно выяснить, на каком основании показания двух удалённых часов относятся к одной шкале времени.

Часы, стоящие рядом, легко сверить непосредственно. Но два удалённых прибора не образуют общей шкалы времени сами по себе. Между ними должно существовать правило синхронизации: способ согласовать, что означает одно и то же время в разных местах.

И здесь начинается странность.

Представим, что вдоль линии между нашими событиями расположена целая сеть часов. Они покоятся друг относительно друга и заранее синхронизированы по единой процедуре. Эта сеть приписывает обоим вспышкам одно и то же время.

Теперь мимо первой сети равномерно движется вторая сеть часов. Она устроена ничуть не хуже. Её часы тоже согласованы между собой — но уже в собственной системе отсчёта.

Когда две вспышки происходят, вторая сеть в общем случае не приписывает им одно и то же время.

По первой системе: одновременно.

По второй: нет.

Если воспринимать время как один всеобщий поток, общий для всей Вселенной, один из этих ответов обязан быть ошибочным. Специальная теория относительности утверждает другое: для **пространственно разделённых** событий сам вопрос об одновременности неполон, пока не указано, относительно какой инерциальной системы согласованы удалённые часы.

Это не спор двух людей. Не иллюзия зрения. И не ошибка приборов.

Чтобы понять, что именно изменилось, придётся внимательнее посмотреть на два вроде бы простых слова — «где» и «когда».

Событие и весть о нём

Сначала отделим происшествие от информации, которая до нас доходит.

В физике конкретное происшествие в определённом месте и в определённый момент называют **событием**. Вспышка лампы — событие. Частица прошла через датчик — событие. Два тела встретились — тоже событие.

Если свет от далёкой вспышки дошёл до приёмника позже, момент прихода света — уже другое событие.

Когда мы спрашиваем, были ли две удалённые вспышки одновременными, нельзя просто поставить человека посередине и посмотреть, какой свет пришёл раньше. Разница во времени прихода сигналов может возникнуть из-за расстояния и пути распространения. Её можно учитывать отдельно.

Относительность одновременности начинается не там, где кто-то **видит** одну вспышку раньше другой. Она остаётся после того, как время распространения сигнала учтено и мы сравниваем показания часов, назначенные самим событиями.

Поэтому человеческий наблюдатель нам вообще не нужен. Достаточно событий, часов и правил, связывающих их показания.

Одних часов мало

По показанию одного локального часа можно определить ответ на простой вопрос: какое время он показывал, когда событие произошло рядом с ним?

С удалёнными событиями задача другая. Если вспышка произошла у левых часов, а другая — у правых, нельзя поднести эти часы друг к другу после события и считать, что вопрос решён. Нужно было заранее определить, что значит «они показывают одно время» на расстоянии.

В специальной теории относительности это можно сделать с помощью обмена световыми сигналами. Техническая процедура здесь не главное. Главное — сеть удалённых часов не получает общую шкалу времени автоматически. Её строят согласованным физическим способом.

Вместе с пространственными координатами такая сеть образует **систему отсчёта**: способ приписывать событиям значения «где» и «когда».

Это не человек и не его точка зрения. Если вместо людей поставить автоматические датчики, часы и компьютеры, физическое содержание не изменится.

Нас пока интересуют **инерциальные системы отсчёта** — такие, которые движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Гравитацию и искривление пространства-времени мы здесь не включаем: следующие утверждения относятся к плоскому специальнорелятивистскому режиму, и эта область задана заранее, а не придумана после неудобного результата.

Итак, первая сеть часов синхронизирована и покоится в своей инерциальной системе. Вторая движется относительно неё равномерно и тоже синхронизирована в своей системе.

Теперь можно вернуться к двум вспышкам.

Вторая сеть часов

Пусть первая сеть приписывает левой и правой вспышке одинаковое время. Для неё события одновременны.

В момент каждой вспышки рядом оказывается также один из часов движущейся сети. Мы можем записать, какое время показывают эти часы в точке события.

И вот эти два показания в общем случае различаются.

Сначала это кажется признаком неправильной настройки. Если обе сети часов хороши, почему одна не подтверждает одновременность, установленную другой?

Потому что специальная теория относительности не сохраняет единую удалённую временную разметку при переходе от одной движущейся инерциальной системы к другой. Пространственные и временные координаты событий меняются совместно.

Набор удалённых событий, которому одна система приписывает одно и то же время, не обязан совпадать с набором событий с одинаковым временем в другой движущейся системе.

Именно этот результат называют **относительностью одновременности**.

Важно, насколько узко сформулировано утверждение. Речь о временах **удалённых** событий, назначенных в разных инерциальных системах. Речь не о произвольных ошибках часов и не о праве людей выбирать собственную реальность. И конечная скорость света не сводит результат к тому, что кто-то поздно увидел вспышку.

Различаются координатные ответы двух систем отсчёта, а переход между ними задаётся строгими правилами.

Это первый удар по привычной идее единого всеобщего «сейчас».

Но если остановиться здесь, теория относительности действительно будет звучать почти как философский релятивизм. Такое изложение легко понять как утверждение, будто у каждого наблюдателя существует своя независимая версия событий.

Поэтому следующий вопрос важнее самого эффекта:

если времена и расстояния могут различаться, о чём все системы всё-таки обязаны согласиться?

Разные координаты — одна структура

Возьмём те же два события. Первая инерциальная система назначает им определённое пространственное разделение и определённый промежуток координатного времени. Вторая получает другие числа.

Но эти изменения не независимы. Специальная теория относительности связывает их так, что определённая общая характеристика разделения между событиями остаётся одной и той же.

Эту характеристику называют **пространственно-временным интервалом**.

Формула позволила бы вычислять его, но важнее его роль. При смене инерциальной системы пространственная и временная части описания меняются не независимо: они связаны так, чтобы сохранялось определённое отношение между событиями.

Именно поэтому в релятивистской физике удобно говорить не о пространстве и времени как о двух совершенно независимых сценах, а о **пространстве-времени**.

Это слово не обозначает вещество или материальную ткань. Здесь пространство-время — геометрический способ описывать отношения между событиями так, чтобы одновременно видеть, какие координатные величины зависят от системы отсчёта и какие отношения сохраняются.

Теория относительности не заменяет объективность мнениями наблюдателей. Она требует точнее различать координатное описание и структуру, которую разные описания сохраняют.

Причина не может стать следствием

Инвариантный интервал позволяет различать пары событий по возможности причинной связи.

Представим событие А. После него световой сигнал распространяется во все стороны. Есть события, до которых этот сигнал — или любое физическое влияние, движущееся не быстрее света, — в принципе может добраться. Есть события, находящиеся слишком далеко при данном временном разделении: свет от А не успел бы достичь их.

Граница, заданная распространением света, образует то, что называют **световым конусом**. Для понимания не обязательно рисовать диаграмму. Достаточно помнить его функцию: он отделяет события, которые могут быть причинно связаны с данным событием, от тех, между которыми такая связь в специальнорелятивистской картине невозможна.

Если А может причинно повлиять на В, все инерциальные системы сохраняют этот причинный порядок. Переход к другой системе отсчёта не превращает причину в следствие.

Другая ситуация возникает у пары событий, разделённых так, что ни одно не может послать другому световой сигнал вовремя. Для такой пары одна инерциальная система может назначить событию А более раннее координатное время, другая — событию В, а в подходящей системе они могут оказаться одновременными.

Это не парадокс причинности, потому что эти события не могли быть причиной друг друга.

Вот что теряется в лозунге «всё относительно». Он смешивает две разные вещи: координатная разметка некоторых удалённых событий действительно зависит от системы отсчёта, а причинная структура — нет.

Теория относительности не разрешает произвольный порядок причин и следствий. Она жёстко отделяет то, что может зависеть от координат, от того, что сохраняется при их смене.

Часы, которым это нужно на практике

Можно решить, что вся проблема удалённой синхронизации нужна только для мысленных экспериментов. В действительности распределённые часы — вполне инженерный объект.

Один из ясных примеров — GPS.

Спутники и наземные системы должны поддерживать согласованную временную архитектуру и связывать показания часов с передаваемыми сигналами и координатными системами. В документированной модели GPS релятивистские эффекты движения часов, синхронизации и вращающейся системы Земли учитываются явно. Полное описание включает также гравитационные эффекты, которые выходят за рамки нашего нынешнего плоского примера.

Релятивистская организация времени здесь не словесная игра вокруг слова «одновременно», а часть рабочей архитектуры распределённой системы часов.

При этом GPS нельзя превращать в лозунг «одно устройство доказало всю теорию относительности». И речь не о единственной магической поправке. В документированном операционном режиме, если необходимые релятивистские эффекты просто отбросить и не заменить эквивалентным описанием, модель времени перестанет соответствовать требованиям навигационной работы системы.

Так вопрос синхронизации превращается из мысленного парадокса в инженерную необходимость.

Что осталось от общего «сейчас»

Вернёмся к двум вспышкам.

Если они происходят в одном месте, вопрос о том, какая случилась раньше, не требует сети удалённых часов. Но для пространственно разделённых событий утверждение «они произошли одновременно» должно быть привязано к конкретной инерциальной системе и её способу синхронизации.

Специальная теория относительности не предполагает единой удалённой временной разметки, которую все инерциальные системы просто считывают по-разному из-за ошибок или задержек сигнала.

Зато она сохраняет другую структуру. Пространственно-временной интервал и причинная классификация связывают описания разных систем. Если одно событие может физически повлиять на другое, смена инерциальной системы не обращает эту причинную связь.

Поэтому пространство и время оказываются не двумя независимыми шкалами, одна из которых остаётся общей для всех движущихся систем. Они входят в единую релятивистскую структуру, где меняющиеся координаты и сохраняющиеся отношения существуют одновременно.

Глава 4. Почему в свободном падении исчезает вес

Представим закрытую кабину лифта. Вы стоите на полу и держите в руке карандаш. Пока кабина покоится на Земле, всё привычно: пол давит на ноги, карандаш после отпускания падает вниз.

Теперь мысленно оборвём трос.

Кабина начинает падать. Вы отпускаете карандаш — и он больше не устремляется к полу. Он остаётся рядом с вами. На несколько мгновений исчезает и привычное ощущение собственного веса.

Но земная гравитация никуда не делась. Более того, именно из-за неё падают и кабина, и вы, и карандаш.

Почему привычное действие силы словно исчезает именно тогда, когда падение особенно очевидно?

В этом противоречии скрыт поворот от ньютоновской интуиции к общей теории относительности. Чтобы его увидеть, не нужно начинать с уравнений Эйнштейна или представлять Вселенную как прогнутый резиновый лист. Достаточно внимательно проследить за тем, что происходит в падающей кабине — а затем сделать её чуть больше.

Карандаш, который больше не падает на пол

Когда кабина стоит на поверхности Земли, пол мешает вам свободно падать. Он толкает вас вверх, и именно это давление вы ощущаете как вес. Карандаш, который вы отпустили, такого упора лишается и движется к полу.

В свободно падающей кабине ситуация меняется. Кабина, человек и отпущенный предмет движутся почти одинаково. Поэтому относительно стен и пола карандаш может некоторое время словно зависать рядом.

Если лаборатория достаточно мала, а время наблюдения достаточно коротко, внутри неё можно устроить обычные негравитационные эксперименты так, что их поведение будет локально таким же, как в инерциальной системе специальной теории относительности.

Слово **локально** здесь нельзя выбросить как техническую оговорку. Оно несёт сам смысл утверждения.

Свободное падение не отменяет гравитацию повсюду. Оно позволяет в достаточно малой области избавиться от той части гравитационного действия, которую можно убрать выбором свободно падающей системы отсчёта.

С этим связано одно из исходных понятий общей теории относительности. **Слабый принцип эквивалентности** утверждает, в принятом здесь тестовом смысле, что достаточно малые свободно падающие пробные тела разного состава движутся одинаково, если существенными негравитационными воздействиями можно пренебречь. Это одна часть более широкого принципа эквивалентности, а не вся теория гравитации в одной фразе.

Из определения принципа эквивалентности ещё не следует, с какой точностью соответствующее равенство выполняется в реальных экспериментах; это проверяют измерениями. Это отдельный экспериментальный вопрос. Но для нашей логики сейчас важнее другое: свободно падающая лаборатория показывает, почему обычная картина «на тело всё время действует отдельная сила вниз» недостаточно для общей теории относительности.

Тогда возникает очевидное возражение.

Если в свободном падении гравитацию можно локально убрать из движения тел, откуда вообще узнать, что она там есть?

Нужно увеличить лабораторию.

Увеличим кабину

Пусть в большой падающей кабине находятся два небольших свободных тела на некотором расстоянии друг от друга.

Если оба падают возле Земли, их траектории направлены не совершенно одинаково. Каждое движется примерно к центру планеты, поэтому линии их движения могут понемногу сближаться. Если одно тело находится выше другого, условия их движения тоже слегка различаются.

В маленькой кабине эти различия можно сделать настолько незначительными, что они не мешают локальному инерциальному описанию. Но на конечном расстоянии они остаются.

Их называют **приливными эффектами**.

Название напоминает об океанских приливах, но вода здесь ни при чём. Речь о более общем факте: соседние свободно падающие тела могут менять расстояние друг до друга, даже когда на них не действуют разные обычные силы вроде трения, тяги или давления.

Вот что нельзя убрать одним выбором свободно падающей системы отсчёта на всей протяжённой области.

В одной точке или очень маленькой лаборатории можно сделать гравитационное движение похожим на свободное инерциальное движение. Но если сравнивать соседние траектории на конечном расстоянии, остаются различия между соседними траекториями свободного падения — приливные эффекты.

Именно относительное ускорение соседних свободно падающих тел связывается в общей теории относительности с кривизной пространства-времени.

Кривизна начинается с того, что нельзя убрать

В общей теории относительности конечные различия между соседними свободными траекториями описываются через **кривизну пространства-времени**.

Это слово легко понять неправильно. Кривизна не требует, чтобы пространство-время буквально прогибалось в ещё одно обычное измерение, словно лист бумаги в комнате.

Популярная картинка с тяжёлым шаром на резиновой плёнке полезна разве что для очень ограниченной геометрической интуиции. Как объяснение гравитации она закольцовывается: шар прогибает плёнку потому, что земная гравитация уже тянет его вниз. Кроме того, плёнка показывает в основном пространственную поверхность и почти ничего не говорит о времени и причинных связях.

Нам она не нужна.

Кривизну можно распознать изнутри — по отношениям между движущимися телами и событиями. Если соседние свободные траектории систематически сближаются или расходятся так, как предсказывает геометрическая теория, это и есть наблюдаемое следствие кривизны, которое можно рассчитать и сопоставить с измерениями.

Теперь становится понятен необычный смысл фразы «гравитация — это геометрия».

Она не означает, что геометрия превратилась в материальное вещество. И не означает, что любое слово «кривизна» автоматически является наблюдаемым фактом.

В классической общей теории относительности геометрическая структура пространства-времени участвует в гравитационной динамике. Свободное движение идеальных пробных тел описывается относительно этой геометрии, а сама геометрия не остаётся неизменной сценой, на которой всё происходит.

Это уже гораздо сильнее ньютоновской картины фиксированного пространства и отдельной силы, действующей поверх него.

Свободное движение без невидимых рельсов

Для свободного тела в геометрической картине используют слово **геодезическая**.

Его иногда переводят интуитивно как «самый прямой возможный путь». Такое выражение может помочь, пока не превращается в новую картинку с невидимым рельсом.

Геодезическая — не борозда, заранее проведённая в космосе. В классической общей теории относительности это способ описать идеальное свободное движение пробного тела в заданной геометрии пространства-времени.

Если тело мало, его собственным влиянием на геометрию можно пренебречь и существенных негравитационных сил нет, его движение моделируется как движение по геодезической. Соседние геодезические, в свою очередь, могут менять взаимное положение из-за кривизны — именно так геометрический язык возвращает нас к приливным эффектам из большой кабины.

Но есть ещё один поворот. Геометрия в общей теории относительности не просто задаёт пути телам и остаётся вечной декорацией. В классической теории распределение энергии и импульса связано с геометрической структурой пространства-времени, а изменения этой структуры сами являются частью физической динамики.

Нам не нужно записывать полевое уравнение, чтобы увидеть смену ролей.

В привычной механической картине есть сцена и есть сила на сцене.

В классической общей теории относительности сама геометрия в уравнениях становится динамической величиной.

Именно поэтому гравитационное описание связано не только с траекториями тел, но и со сравнением часов и распространением сигналов.

Как гравитация влияет на сравнение хода часов

Возьмём два достаточно точных часа и сравним их частоты в разных условиях движения или на разной высоте в земном гравитационном поле.

В одном лабораторном эксперименте с оптическими часами исследователи контролируемо меняли движение и высоту одного из часов и непосредственно измеряли изменения отношения частот. Измеренная величина была именно отношением частот в конкретной установке — не показанием прибора «скорость течения времени».

Следующий шаг уже теоретически связан: наблюдавшиеся изменения согласовывались с релятивистскими зависимостями, использованными в анализе, включая гравитационный эффект для небольшой разницы высот у поверхности Земли.

Такой опыт полезен не потому, что один стол с двумя часами «доказывает геометрию». Он делает абстрактный вывод операционным: в релятивистской физике устройство пространства-времени связано с тем, как сравниваются физические часы.

Но странная картина с падающей кабиной и кривизной должна выдерживать гораздо больше одной лабораторной демонстрации.

Почему физики вообще доверяют ей?

Какие эксперименты подтверждают геометрическое описание гравитации

Чем больше независимых проверяемых следствий имеет теория, тем больше существует способов обнаружить её расхождение с наблюдениями. Общая теория относительности связывает свободное падение, движение сигналов в Солнечной системе, часы и сильные динамиче-

ские гравитационные поля. Поэтому особенно важно, что её проверяют не одним прибором и не одной разновидностью наблюдений.

Первый вопрос почти буквально возвращает нас в падающую кабину: **одинаково ли свободно падают тела разного состава?**

Миссия MICROSCOPE сравнивала свободное движение пробных масс на орбите. Приборы измеряли управляющие электростатические воздействия, необходимые для контроля тестовых масс; затем через калибровку, модель движения аппарата и учёт систематических эффектов из данных извлекали возможное различие ускорений.

В итоговом анализе для проверенной пары титановой и платиновой масс нарушения слабого принципа эквивалентности не обнаружили в пределах заявленной чувствительности и неопределённости.

Это важная экспериментальная проверка слабого принципа эквивалентности — того утверждения, которое использовалось в мысленном опыте со свободно падающей кабиной. Но её результат уже по формулировке ограничен: одна конкретная пара материалов, одна экспериментальная схема, определённая чувствительность. Нулевой результат не превращается в доказательство точного равенства для всех возможных тел и не исключает автоматически все мыслимые альтернативы гравитации.

Теперь сменим и прибор, и явление. **Что происходит с радиосигналом, когда его путь проходит рядом с Солнцем?**

Такую проверку дала связь с аппаратом Cassini. Здесь никто не измерял «кривизну» отдельным датчиком. Наблюдали изменения радиочастотного сигнала. Чтобы превратить их в тест гравитационной теории, требовались модель движения аппарата, учёт распространения сигнала и плазмы, а затем вывод параметра, характеризующего проверяемый сектор релятивистского описания.

Полученный результат оказался согласован с предсказанием общей теории относительности в этом секторе.

По смыслу это совсем не тот же эксперимент, что MICROSCOPE. Другой объект, другой прибор, другой наблюдаемый эффект и другой набор систематических ошибок. Именно эта непохожесть и делает согласие ценным.

Третий вопрос уводит нас ещё дальше от Земли: **может ли сама динамическая геометрия переносить возмущение?**

В классической общей теории относительности изменения гравитационного поля могут распространяться в виде **гравитационных волн**. Детекторы вроде LIGO и Virgo регистрируют не «волну геометрии» как картинку, а изменение измеряемого относительного расстояния в интерферометрах. Дальше данные сравниваются с моделями сигналов, и уже через этот анализ проверяются конкретные предсказания теории.

Особенно строгую проверку в сильном и быстро меняющемся гравитационном режиме дал очень громкий сигнал GW250114. В опубликованном анализе спектроскопические и полноволновые тесты этого события согласовались, в пределах заявленных неопределённостей и модельных условий, с проверявшимися предсказаниями вращающейся чёрной дыры в общей теории относительности.

Но даже необычайно качественный сигнал остаётся одним событием и одним набором тестов. Его согласие не превращается в универсальный вывод обо всех возможных гравитационных режимах.

MICROSCOPE, Cassini и GW250114 ценны именно потому, что проверяют разные предсказания общей теории относительности. Свободное падение тел разного состава проверяет универсальность свободного падения. Радиосвязь через окрестность Солнца — распространение сигнала в гравитационном поле. Гравитационные волны от слияния компактных объектов — динамику сильного поля.

К этому добавляются лабораторные часы, орбитальные эксперименты и другие проверки. Их приборы, наблюдаемые величины и источники систематических ошибок различаются. Поэтому согласие между такими режимами нельзя свести к тому, что одна и та же установка много раз повторила одну и ту же ошибку.

Так возникает более сильный вывод, чем «очередная проверка общей теории относительности согласовалась с данными».

Общая теория относительности получает устойчивую поддержку от разных классов проверок и считается установленным описанием гравитации в тех классических режимах, которые они действительно охватывают.

Но подтверждение ОТО в исследованных классических режимах не доказывает её применимость при произвольно больших энергиях и кривизнах. Успех возле Земли, Солнца и даже при слиянии чёрных дыр сам по себе не доказывает, что классическое описание уже отвечает на любой вопрос при любых мыслимых условиях.

Особенно ясно это становится возле чёрных дыр, где популярные картинки часто смешивают три разные вещи: горизонт, тень и сингулярность.

Граница, которая не является стеной

В классической общей теории относительности **горизонт событий** — это не материальная поверхность, которую можно потрогать или сфотографировать сбоку.

Для обычной классической картины изолированной чёрной дыры это глобальная причинная граница: существуют области пространства-времени, из которых сигнал уже не сможет выбраться наружу и достичь далёкого внешнего мира.

Слово **глобальная** существенно. Чтобы знать, что граница действительно является горизонтом событий в строгом смысле, недостаточно посмотреть на одну локальную точку и найти там особую материальную стену. Определение зависит от причинной структуры пространства-времени в целом.

Здесь можно воспользоваться уже знакомой причинной идеей без повторения всей предыдущей главы: геометрия теперь динамична, но возможность сигнала добраться из одного события к другому по-прежнему задаёт физически значимую границу.

И тут возникает почти неизбежный вопрос.

Если горизонт нельзя просто увидеть как поверхность, что тогда показало знаменитое изображение Event Horizon Telescope?

Что на самом деле восстановил ЕНТ

Название телескопа само подталкивает к фразе «мы сфотографировали горизонт событий». Но физическая цепочка интереснее — и точнее.

Телескопы сети ЕНТ регистрировали интерферометрические данные от излучения вокруг компактного объекта в центре галактики М87. Эти данные проходили калибровку. Затем несколько методов реконструкции восстанавливали распределение яркости. На полученных изображениях устойчиво появлялась кольцеобразная структура с более тёмной центральной областью.

После этого реконструкции сравнивали с геометрическими и физическими моделями излучения в сильном гравитационном поле. Именно через такое сравнение данные поддерживают интерпретацию наблюдаемой структуры как излучения вокруг тени чёрной дыры, совместимой с соответствующей релятивистской картиной.

То есть путь выглядит не так:

«телескоп увидел горизонт».

А так:

Последовательность здесь такая: сначала получают данные, затем калибруют их и реконструируют изображение. На реконструированной картине выделяют кольцо и центральное затемнение, сравнивают их с моделями и только после этого делают вывод о тени.

Тень здесь — не непосредственно зарегистрированная поверхность, а вывод, связанный с реконструированной картиной излучения и её сравнением с моделями. **Горизонт событий** — отдельная глобальная причинная граница в классической теории.

Эта разница не ослабляет результат ЕНТ. Она показывает, что именно в нём сильно: не волшебная фотография невидимой поверхности, а проверяемая цепочка от интерферометрических данных к физическому выводу.

Но горизонт часто смешивают ещё с одним словом — **сингулярность**.

Горизонт — ещё не сингулярность

У регулярной классической чёрной дыры сам горизонт событий не является местом, где кривизна обязана становиться бесконечной. Причинная граница и область, в которой классическое описание сталкивается с проблемой неполноты, — разные понятия.

Это важно хотя бы потому, что привычное выражение «сингулярность в центре чёрной дыры» мгновенно вызывает образ крошечной точки с бесконечной плотностью, которую теория будто бы предсказывает как физический объект.

Сингулярностные теоремы утверждают более аккуратную вещь.

При заданных условиях на причинную структуру и энергию, а также при условии, описывающем достаточно сильное гравитационное сжатие, классическая геометрия не может оставаться геодезически полной: некоторые соответствующие причинные геодезические нельзя продолжать сколь угодно далеко внутри этого классического описания.

Это математически сильный вывод. Но он не равен нескольким более красочным утверждениям, которые часто ставят вместо него.

Теорема сама по себе не является наблюдением внутренней точки чёрной дыры. Она не доказывает в общем случае, что плотность обязательно становится буквально бесконечной. Не всякая формулировка геодезической неполноты автоматически означает доказанную бесконечность кривизны. И из неё не следует готовый ответ о том, что физически находится «по ту сторону» границы классического описания.

Именно здесь сильная теория впервые в этой главе приводит нас не к новому подтверждению, а к точной открытой границе.

Где заканчивается классический ответ

Вернёмся к падающей кабине.

В начале казалось, что гравитация исчезла: человек и карандаш свободно падали вместе и перестали давить друг на друга. Потом мы увеличили лабораторию — и обнаружили то, что убрать нельзя: соседние свободные траектории меняют своё взаимное положение.

Эти приливные эффекты в общей теории относительности описываются кривизной пространства-времени. Из кривизны и свободного движения — геометрическая картина гравитации. С этой динамической геометрией связаны различия при сравнении часов, распространение сигналов и гравитационные волны. Разные эксперименты проверили независимые следствия общей теории относительности и вместе дали ей сильную эмпирическую поддержку в исследованных классических режимах в классических режимах.

Но тот же язык позволяет сформулировать и собственную границу.

При выполнении условий соответствующих теорем геодезическая неполнота означает, что некоторые геодезические нельзя продолжить сколь угодно далеко внутри данного классического пространства-времени. Что физически завершает такие режимы — если вообще существует более глубокое описание именно такого вида, — остаётся открытым научным вопросом.

Это не поражение общей теории относительности и не лицензия подставить на свободное место любимую гипотезу. Точнее сказать иначе: мы знаем очень много о том, где классическая геометрическая теория работает, и умеем достаточно точно назвать режимы, в которых классического описания уже недостаточно для полного ответа.

Падающая кабина показала первый неожиданный факт: иногда гравитацию легче понять не по тому, что мы чувствуем, а по тому, что невозможно устранить из отношений между свободно движущимися телами.

Именно там геометрическое описание гравитации становится необходимым. А геодезическая неполнота некоторых классических решений ставит отдельный вопрос: какое физическое описание применимо там, где классическое пространство-время нельзя продолжить в рамках ОТО.

Глава 5. Почему одинаковый опыт даёт разные результаты

Подготовим физическую систему одним и тем же способом. Выберем одно и то же измерение. Проведём опыт.

Получим один результат.

Повторим процедуру — и можем получить другой.

Ещё раз — третий. Потом снова первый. Если смотреть на отдельные запуски, возникает неприятное ощущение: где же здесь закон природы, если теория не предсказывает однозначно результат следующего запуска?

Но теперь повторим опыт много раз.

Разброс перестаёт быть бесформенным. Одни результаты встречаются часто, другие редко, некоторые при определённых условиях почти исчезают. Возникает устойчивое распределение, которое можно рассчитывать и проверять с очень высокой точностью.

В этом и состоит первый квантовый поворот. Фундаментальный закон может не определять единственный исход отдельного запуска, но при этом задавать точные вероятности разных исходов и строгие проверяемые предсказания для серии повторений.

Из этого не следует, что квантовое описание сводится к обычному броску монеты. Квантовые вероятности устроены не как обычное незнание о заранее выбранном варианте. Чтобы увидеть разницу, нужно начать с самого простого: что именно готовят, что измеряют и что теория должна предсказать.

Один запуск и тысяча запусков

В эксперименте сначала выполняют **подготовку**: воспроизводимую процедуру, которая приводит систему в нужные условия перед измерением. Затем выбирают, что именно будут измерять, и получают один зарегистрированный **исход**.

Один запуск даёт один исход. Серия одинаково организованных запусков даёт распределение исходов.

Это различие кажется почти очевидным, но на нём держится значительная часть квантовой логики. Прибор не выдаёт нам «вероятность». Он регистрирует конкретное событие. Вероятности появляются в теоретическом описании и проверяются по статистике многих событий.

Нужен объект, который связывает подготовку с возможными будущими результатами. В стандартной квантовой механике эту роль играет **квантовое состояние**.

Состояние — не ещё один результат измерения и не скрытая фотография того, что прибор якобы увидел внутри системы. Это элемент теоретического описания, с помощью которого рассчитывают распределения результатов заданных измерений.

В нерелятивистской квантовой механике состояние часто представляют **волновой функцией**. Название легко заставляет вообразить материальную волну, похожую на рябь на воде. Но само слово ничего такого не доказывает. Волновая функция здесь прежде всего способ представить состояние в формализме.

Связь между состоянием и вероятностями задаёт **правило Борна**. На нужном нам уровне его смысл прост: когда известно квантовое состояние и указано измерение, теория даёт вероятности возможных результатов.

Получается последовательность:

Последовательность такова: подготовка эксперимента задаёт квантовое состояние, теория связывает его с вероятностями возможных исходов, а измерение даёт конкретные зарегистрированные результаты.

Эта схема уже необычна. Но пока она могла бы напоминать обычную ситуацию незнания. Мы ведь постоянно используем вероятности, когда не знаем всех деталей: не можем предсказать конкретный бросок монеты, но умеем рассчитывать статистику множества бросков.

Квантовая теория делает следующий шаг. В ней не всегда можно представить дело так, будто система заранее выбрала один из обычных классических вариантов, а мы просто не знаем какой.

Почему обычных вероятностей недостаточно

Представим установку, в которой к одному и тому же будущему результату могут вести два альтернативных пути.

В классической вероятностной задаче мы могли бы рассуждать так: система пошла либо по первому пути, либо по второму. Мы не знаем, какой вариант реализовался, поэтому вычисляем вероятность результата для каждого пути и складываем эти вероятности.

В квантовой механике такая операция в общем случае даёт неправильный ответ.

Теория сначала сопоставляет альтернативам не вероятности, а **амплитуды**. Амплитуды можно складывать, и у них есть относительная **фаза**. Из-за этой фазы две альтернативы способны усиливать вклад друг друга для одних результатов и ослаблять для других. Только после сложения амплитуд получается итоговая вероятность.

Именно здесь появляется **суперпозиция**. Она означает, что допустимые альтернативные компоненты входят в квантовое состояние так, что совместно определяют будущие вероятности.

Это нельзя без потерь перевести как «объект просто был либо там, либо здесь, а мы не знали где». Обычная смесь заранее выбранных классических вариантов складывает вероятности. Когерентная квантовая суперпозиция складывает амплитуды, и результат зависит от их относительной фазы.

Разница становится экспериментально видимой в **интерференции**.

Если условия двух альтернатив меняют их относительную фазу, меняется и распределение последующих исходов. Там, где вклады усиливают друг друга, событий становится больше. Там, где они взаимно ослабляются, — меньше.

При этом один отдельный запуск всё равно заканчивается одним зарегистрированным результатом. Интерференционный рисунок возникает не как фотография «раздвоенного объекта», а как структура распределения, накопленного из множества отдельных событий.

Квантовая теория требует именно этого странного сочетания: каждый запуск даёт конкретный результат, а статистика многих запусков несёт след амплитуд и фаз, которых нельзя заменить простой классической лотереей.

Узор, собранный по одному событию

Эту логику проверяют не только на самых простых микроскопических системах.

В одном хорошо контролируемом эксперименте исследователи подготовили крупные органические молекулы, провели их через интерференционную установку и зарегистрировали распределение попаданий. Из накопленных данных получались интерференционные полосы.

Это прямой экспериментальный слой: конкретная подготовка, конкретная установка, зарегистрированные события и полученное из них распределение.

Следующий этап анализа состоит в сравнении измеренной интерференционной картины с количественным квантовым расчётом для конкретной установки. Экспериментаторы сравнивали наблюдавшуюся интерференционную структуру с расчётом для квантовой модели с учётом свойств установки и возможных источников потери когерентности. Согласие поддер-

живает описание испытанных молекулярных состояний через когерентную суперпозицию и ограничивает некоторые модификации динамики в этом режиме.

Но оно не превращает интерференционную картину в фотографию волновой функции. И не выбирает автоматически единственное объяснение того, чем квантовое состояние является «на самом деле».

Сила эксперимента в другом. Система, которую уже трудно интуитивно считать почти безразмерной частицей, всё равно даёт распределение, для которого существенна квантовая амплитудная структура. Квантовые правила работают здесь как проверяемый способ связать подготовку с наблюдаемыми исходами.

Теперь можно вернуться к вероятности.

В классической лотерее вероятность часто означает: вариант уже определён, но мы его не знаем. Квантовая интерференция показывает, что стандартный аппарат предсказаний нельзя в общем случае свести к такой картине. Если заменить когерентную суперпозицию обычной смесью заранее выбранных путей, исчезает фазовая зависимость, а вместе с ней меняется наблюдаемое распределение.

Отсюда, однако, не следует готовый ответ на философский вопрос, является ли квантовая случайность фундаментальной. Теория и эксперимент устанавливают структуру предсказаний гораздо надёжнее, чем единственное толкование того, почему отдельный исход оказался именно таким.

Есть ещё одна известная квантовая черта, которую по той же причине легко понять неправильно.

Неопределённость существует ещё до плохого прибора

Представим, что мы много раз готовим одну и ту же квантовую систему и каждый раз измеряем её положение. Результаты образуют распределение с некоторым разбросом.

Теперь приготовим систему тем же способом много раз заново и измерим импульс. Получим другое распределение и другой разброс.

Для положения и импульса стандартная квантовая механика связывает эти два разброса: нельзя выбрать состояние, в котором оба распределения одновременно становятся сколь угодно узкими.

Это **соотношение неопределённостей** для положения и импульса.

Важно, к чему именно оно относится. Не к небрежности экспериментатора. Не к тому, что прибор обязательно грубо толкнул частицу и испортил заранее существовавшие точные значения. И не к универсальному лозунгу «в квантовом мире ничего нельзя знать».

Речь о распределениях результатов для подготовленного состояния. Даже в идеализированном пределе совершенных приборов квантовое описание не позволяет сделать оба соответствующих распределения произвольно узкими одновременно.

При этом теория прекрасно допускает очень точные предсказания других величин и других состояний. Неопределённость — количественная структура конкретной пары величин, а не лицензия на туманность.

Это хорошо возвращает нас к началу главы. Квантовая вероятность — не отсутствие закона. Напротив, теория ограничивает даже то, **как именно** могут быть устроены вероятностные распределения.

Но пока мы обсуждали главным образом связь подготовки с результатами. Что происходит со состоянием между этими моментами?

Между подготовкой и измерением

Если квантовая система в рассматриваемом интервале считается замкнутой или достаточно хорошо изолированной от окружения, стандартная теория задаёт правило, по которому её состояние меняется со временем.

Такое изменение называют **унитарной эволюцией**.

Для понимания важна не формула, а функция этого правила. Заданное состояние не просто остаётся неизменной записью до следующего измерения. Оно закономерно меняется, сохраняя структуру, необходимую для расчёта последующих вероятностей. Именно поэтому фаза может эволюционировать, суперпозиции могут приводить к меняющимся интерференционным распределениям, а подготовка в один момент позволяет рассчитывать статистику будущего измерения.

Квалификация «замкнутая или эффективно изолированная система» здесь существенна. Реальная система может взаимодействовать с окружением, и тогда описание её одной как изолированной системы становится недостаточным.

Остаётся отдельная проблема. Правило непрерывной эволюции состояния и вопрос о том, почему конкретное измерение заканчивается конкретным исходом, — не одно и то же утверждение.

Стандартный формализм даёт чрезвычайно успешные правила для эволюции состояния и вероятностей результатов. Но из самого существования унитарной динамики нельзя вывести, что одна определённая интерпретация квантовой механики уже доказана экспериментально. Вопрос о физическом смысле отдельного исхода требует отдельного разговора.

До него нам понадобится ещё одна особенность квантовых состояний. Она возникает, когда система состоит из частей.

Когда целое нельзя заменить списком частей

Пусть у нас есть две квантовые подсистемы. Иногда совместное состояние можно описать как обычную статистическую смесь состояний первой и второй части: каждая имеет своё локальное состояние, а корреляция между ними сводится к распределению таких пар.

Но не всякое квантовое совместное состояние допускает такое разложение.

Если состояние двух частей нельзя представить как такую сепарабельную смесь независимых состояний подсистем, его называют **запутанным**.

Запутанность — свойство совместного квантового состояния. Уже это отличает её от бытовой картинки двух предметов, которым заранее положили в коробки совпадающие инструкции. В обычной классической корреляции можно вообразить, что оба результата были заранее согласованы общей причиной. Для квантовых корреляций вопрос сложнее: достаточно ли вообще некоторого широкого класса локальных заранее согласованных моделей, чтобы воспроизвести наблюдаемую статистику?

Именно здесь появляется теорема Белла.

Она важна не потому, что слово «запутанность» само по себе звучит загадочно. Белл превратил вопрос о возможных объяснениях корреляций в экспериментальную проверку.

Можно ли объяснить всё заранее согласованными локальными ответами

Представим два далеко разнесённых измерительных пункта. В каждом независимо выбирают одну из нескольких настроек прибора и получают локальный результат. После множества запусков результаты двух сторон сравнивают и вычисляют корреляции.

Рассмотрим определённый класс моделей. В них обе стороны могут иметь общую заранее существующую информацию, но результат на каждой стороне при заданной этой информации зависит только от локальной настройки, а распределение общей информации не подстраивается под будущий выбор настроек. Для такого класса совместные вероятности имеют локально факторизуемую структуру.

Эти предпосылки приводят к ограничениям на возможные корреляции — **неравенствам Белла**.

Если эксперимент устойчиво даёт корреляции за пределами таких ограничений, нельзя просто заключить: «значит, мы увидели сигнал, мгновенно летящий от одной частицы к другой». Такой эксперимент позволяет проверить определённую модельную структуру. Поэтому сначала нужно честно поставить сам тест.

Выбор настроек должен быть организован так, чтобы не разрушить проверяемую независимость. Разнесение и время измерений должны мешать обычному причинному обмену сигналами использоваться как простое объяснение корреляций внутри теста. Потери и отбор зарегистрированных событий тоже не должны искусственно создавать нарушение.

В 2015 году были опубликованы несколько экспериментов, устроенных так, чтобы одновременно закрыть ключевые экспериментальные лазейки, которые долго мешали одному тесту сделать всё сразу. Один использовал электронные спины в разнесённых установках. Два независимых эксперимента использовали фотоны и высокоэффективную регистрацию.

В этих реализациях наблюдавшиеся корреляции нарушали соответствующие неравенства Белла и позволили отвергнуть проверявшиеся классы локальных моделей в смысле Белла в рамках заявленных предпосылок и статистической процедуры.

Три статьи здесь не означают три разных закона природы. Существенное другое: разные реализации — электронные спины и фотоны, разные установки и источники систематических ошибок — пришли к совместимому выводу о проверяемом классе моделей.

Это сильный результат. Но его сила как раз требует точно сказать, чего он не означает.

Корреляция без сверхсветового телефона

Допустим, две стороны проводят измерения запутанной пары далеко друг от друга. Совместная статистика может нарушать неравенство Белла. Однако человек на одной стороне не может выбрать настройку так, чтобы тем самым управляемо изменить распределение результатов, которое другая сторона видит локально.

В стандартной квантовой механике локальное распределение на одной стороне не зависит от того, какую настройку выбрали на другой стороне. Поэтому одних запутанных Bell-корреляций недостаточно, чтобы передать управляемое сообщение быстрее света.

Именно так выглядит практический смысл запрета на управляемую передачу сигнала.

Он не говорит, что квантовые корреляции «на самом деле обычные и локальные». И не решает, какой онтологический рассказ о них правильный. Он утверждает более конкретную вещь: наблюдаемая Bell-корреляция и возможность контролируемой передачи информации — разные физические вопросы.

Так же аккуратно нужно обращаться и с другим популярным выводом: будто Bell-тесты просто «опровергли детерминизм» или доказали одну выбранную интерпретацию квантовой механики.

Проверяемый класс локальных моделей в смысле Белла включает определённую структуру локальных ответов и предпосылку о независимости настроек от общей скрытой информации. Нарушение неравенств отвергает этот класс в пределах эксперимента. Модель, в которой одна из этих предпосылок не принимается, уже не относится к проверенному классу, но само это отличие ещё не является положительным свидетельством в её пользу.

И тем более из Bell-результатов не следует автоматическая победа копенгагенской, эвереттовской, бомовской или любой другой интерпретации. Разные интерпретации могут разделять одни и те же проверенные вероятностные предсказания, одновременно по-разному отвечая на вопрос о том, что считать физической реальностью между измерениями.

Вероятность как закон, а не отсутствие закона

Вернёмся к нашему первому эксперименту.

Мы одинаково организуем подготовку и измерение, а отдельный исход заранее не обязан повторять предыдущий. В классической интуиции это хочется принять за неполноту описания: если бы мы знали ещё несколько скрытых деталей, следующий результат обязательно стал бы определённым.

Квантовая теория устроена осторожнее и сильнее одновременно.

Она даёт состояние как инструмент для расчёта вероятностей. Правило Борна связывает состояние с распределением исходов. Амплитуды и их фазы объясняют интерференцию, которую нельзя получить простым сложением классических вероятностей. Соотношение неопределённостей ограничивает возможные разбросы определённых распределений. Унитарная эволюция задаёт изменение состояния для замкнутой или эффективно изолированной модели. Запутанные совместные состояния приводят к корреляциям, способным нарушать границы локальных моделей в смысле Белла, при этом не превращаясь в управляемый сверхсветовой канал связи.

Это не набор уступок незнанию. Это система ограничений и предсказаний, которые многократно можно сталкивать с экспериментом.

И всё же здесь остаётся вопрос, который намеренно нельзя закрыть одним красивым опытом.

Что именно представляет квантовое состояние в физической реальности? Почему отдельное измерение даёт один конкретный исход? Следует ли считать вероятности фундаментальными или они получают другой смысл в более полном толковании? Bell-эксперименты резко ограничивают допустимые объяснительные схемы, однако их результаты не позволяют выделить единственную интерпретацию квантовой механики.

В начале казалось, что разные результаты одинаково организованного опыта означают недостаток закона. К концу картина переворачивается: квантовая теория задаёт строгую структуру вероятностей, интерференции, неопределённостей и корреляций — и именно эту структуру проверяет эксперимент.

Открытым остаётся не вопрос, существуют ли квантовые правила. Открыт вопрос о том, какой физический смысл следует приписать некоторым элементам этих правил и отдельному исходу измерения.

Глава 6. Почему частиц недостаточно

Представим столкновение в ускорителе. До встречи в область взаимодействия летит один набор частиц. После неё детекторы регистрируют другой.

Некоторые участники исходного состояния больше не появляются среди конечных продуктов. Зато возникают частицы, которых во входящем наборе не было.

Если представлять мир как коллекцию крошечных неразрушимых шариков, возникает почти бухгалтерская проблема. Где до столкновения прятались будущие частицы? Куда делись те, что были вначале? Можно ли вообще считать число частиц фундаментальным списком того, «что существует» в процессе?

В современной квантовой теории поля ответ устроен неожиданно. Сохраняющиеся величины по-прежнему жёстко ограничивают возможный исход, но число частиц определённого вида не обязано оставаться тем же. Чтобы описывать такие процессы, квантовой теории нужен язык, в котором ноль частиц, одна частица, две или больше могут быть разными состояниями одной и той же физической системы.

Этим языком стала квантовая теория поля.

Она не отменяет частицы. Напротив, именно с её помощью физики чрезвычайно точно рассчитывают столкновения и связывают расчёты с тем, что регистрируют детекторы. Но она меняет роль частицы: частица перестаёт быть обязательным неизменным объектом, существование которого требуется сохранять от начала процесса до его конца.

Чтобы понять, что приходит ему на смену, полезно начать не со списка элементарных частиц, а с того, почему такой список сам по себе оказался слишком бедным.

Когда список участников меняется

В обычной механике удобно считать тела постоянными участниками истории. Мяч, планета или спутник могут менять скорость и направление, сталкиваться и обмениваться энергией, но мы продолжаем следить за теми же объектами.

В релятивистской квантовой физике этого недостаточно. Один набор частиц может переходить в другой. Поэтому вопрос «по какой траектории всё время летела каждая будущая частица?» иногда просто предполагает то, чего теория не обязана содержать: готовый заранее набор неизменных объектов.

Нужна более гибкая структура. Она должна допускать квантовые состояния с разным числом частиц и одновременно сохранять уже установленные квантовые правила: состояние, вероятность, суперпозицию, квантовую эволюцию.

Именно здесь появляются **квантовые поля**.

Слово «поле» опасно своей привычностью. Оно подталкивает вообразить невидимую среду, разлитую по пространству, а частицы — как маленькие капли или рябь на её поверхности. Иногда такая картинка помогает на несколько секунд, но как объяснение она быстро начинает врать.

В квантовой теории поля поле прежде всего задаёт тип квантовых степеней свободы, из которых строятся состояния системы. Теория описывает, какие состояния возможны, как они меняются и как взаимодействуют. В этом пространстве состояний естественно существуют варианты с разным числом частиц.

Это главное, что нам сейчас нужно от слова «поле». Оно называет элемент теоретического каркаса, который способен пережить ситуацию, где сам список частиц меняется.

Успех такого описания не превращает поле автоматически в доказанную материальную субстанцию. Прибор не выдаёт на экран «квантовое поле как оно есть». Он регистрирует кон-

кретные физические события. Связь между этими событиями и полевым описанием строит теория — и именно эту связь затем проверяют экспериментом.

Но тогда откуда в полевой картине снова берутся частицы?

Частица появляется как состояние

Начнём с самого спокойного случая — свободного поля, а также с тех стадий до и после взаимодействия, где входящие и выходящие частицы можно достаточно хорошо рассматривать как свободные.

У такого описания есть опорное состояние, которое называют **вакуумом**. Здесь вакуум — не философское «абсолютное ничто». Это определённое состояние квантовой полевой системы, относительно которого строятся другие состояния.

Из него формализм позволяет получить одночастичное состояние, затем двухчастичное и так далее. На этом уровне появляется точный смысл популярной фразы: **частица — возбуждение квантового поля**.

Но к ней нужно сразу прикрепить ограничение.

В свободном режиме и для хорошо определённых входящих и выходящих частиц такое описание особенно чисто. Оно не даёт права представлять любую частицу в любой ситуации как маленький материальный бугорок на невидимом океане. В сильно взаимодействующих системах, при конфайнменте, для нестабильных состояний и в других сложных режимах простой одночастичный образ может работать хуже или требовать более осторожного языка.

Поэтому полезнее думать так: частица — это определённый тип квантового состояния, который полевой формализм позволяет выделить в подходящем режиме.

Это не делает частицу «ненастоящей». Детекторы действительно регистрируют события, которые физики описывают как появление электронов, фотонов и других частиц. Просто современная теория не обязана считать каждый такой объект неизменным кирпичиком, существующим в одном и том же виде на всём протяжении процесса.

И это возвращает нас к столкновению из начала главы. Входящие и выходящие частицы могут быть разными, потому что полевой язык описывает не путешествие фиксированного списка объектов, а переход одного квантового состояния полей в другое.

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.