



Шон Кэрролл

# КВАНТОВЫЕ МИРЫ

И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

THE NEW  
YORK TIMES:  
ПОСТОЯННЫЙ  
БЕСТСЕЛЛЕР

SCIENCE NEWS:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА  
2019 ГОДА

AMAZON:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА,  
ВЫБОР РЕДАКТОРОВ

**Шон Кэрролл**  
**Квантовые миры**  
*и возникновение пространства-времени*

Права на издание получены по соглашению с Brockman Agency. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Серия «New Science»

Перевел с английского О. Сивченко

© 2019 by Sean Carroll

© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2022

© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2022

© Серия «New Science», 2022

\* \* \*

# ОТЗЫВЫ

Захватывающее повествование о величайшем интеллектуальном достижении человечества — квантовой механике. Со смелой ясностью Кэрролл разоблачает квантовую таинственность, чтобы показать нам странную, но совершенно удивительную реальность.

*Брайан Грин, профессор физики и математики, директор  
Центра теоретической физики при Колумбийском  
университете, автор книги «Элегантная Вселенная»*

Бесконечно приятная книга Шона Кэрролла «Квантовые миры и возникновение пространства-времени» позволяет читателю лицом к лицу встретиться с фундаментальной квантовой запутанностью Вселенной — или, правильнее сказать, «вселенных»? Дочитав книгу, вы, возможно, поймаете себя на мысли, что квантовые странности не такие уж странные.

*Джордан Элленберг, профессор математики в  
Мэдисоновском университете Висконсина, автор книги  
«Как не ошибаться»*

Шон Кэрролл всегда пишет доходчиво и интересно, для читателя — одно удовольствие; при этом сам текст у него необычайно глубокий. Он выступает за принятие квантовой механики в ее самой минимальной, чистой, можно сказать, первозданной (и именно этим привлекательной) формулировке. Таким образом, он полностью отбрасывает привычные представления о реальности, выводя им на смену крайне сюрреалистическую многомировую интерпретацию. Шон приглашает нас вступить в битву между простой реальностью и множеством реальностей, хотя человеческого разума хватает лишь на самое приблизительное постижение такой многомировой картины. Он приобщает нас и к философским идеям, на основе

которых зарождается революция. Это увлекательная и важная книга.

*Ханна Левин, профессор физики и астрономии в колледже Барнарда, автор книги «Блюз черных дыр»*

Шон Кэрролл прекрасно разъясняет суть споров, касающихся основ квантовой механики, отстаивая при этом самый элегантный и смелый подход: поразительную многомировую интерпретацию. Его комментарии о достоинствах и недостатках этой концепции – ясные, беспристрастные и потрясающие с философской точки зрения.

*Стивен Строгац, профессор математики в Корнельском университете, автор книги *Infinite Powers**

Кэрролл позволяет, словно из первых рядов партера, познакомиться с развитием новых представлений о физике: это картина, объединяющая наш повседневный опыт с головокружительно устроенной Вселенной, напоминающей лабиринт отражений, где приходится усомниться даже в привычных представлениях о собственном «я». Эта увлекательная идея – как раз такая, в которой могут таиться ключи к гораздо более глубокой реальности.

*Кэти Мак, астрофизик-теоретик из Университета Северной Каролины, автор готовящейся книги *The End of Everything**

Я не смог сдержать слез радости, убедившись, что множество фундаментальных проблем объяснены в этой книге лучше, чем когда-либо ранее. «Квантовые миры» – это шедевр, стоящий в одном ряду с книгой Фейнмана «КЭД» как одна из двух лучших научно-популярных книг по квантовой механике, какие я когда-либо видел. Если же считать, что «КЭД» писалась с другой целью, то перед нами попросту лучшая книга по популяризации квантовой механики – и точка.

*Скотт Ааронсон, профессор информатики в Техасском университете, город Остин, и директор Центра квантовой информации при Техасском университете*

Не оторваться, читать — одно удовольствие. Хотя эта книга и посвящена одной из глубочайших тайн современной физики, она также рассказывает и о метафизике. Кэрролл помогает нам не только задуматься об истинной, скрытой природе реальности, но и найти в ней смысл. Мне эта книга очень понравилась.

*Приямвада Натараян, астрофизик-теоретик из Йельского университета, автор книги *Mapping the Heavens**

# Пролог

## *Не бойтесь*

Посвящается мыслителям всех времен, не  
напрасно державшим порох сухим

Квантовая механика выглядит пугающе даже для тех, кто ничего не понимает в теоретической физике. Но все не так страшно.

Это может показаться странным. Квантовая механика – это лучшая из имеющихся у нас теорий об устройстве микромира. Она описывает, как на уровне фундаментальных сил природы взаимодействуют атомы и частицы, с невероятной точностью прогнозируя исход любого эксперимента. Следует признать, что за квантовой механикой закрепилось своеобразное реноме чего-то сложного, таинственного, сравнимого чуть ли не с магией. Однако из всех людей именно физики должны быть удовлетворены подобной теорией: они постоянно заняты нетривиальными вычислениями, в которых учитываются квантовые феномены, и сооружают огромные приборы, предназначенные строго для проверки результатов этих вычислений. Надеюсь, никто всерьез не считает, что все это время они просто «создают видимость»?

Нет, о «создании видимости» речь не идет, но и друг с другом физики в данном случае не вполне честны. С одной стороны, квантовая механика – это сердце и душа современной физики. Астрофизики, специалисты по физике частиц, физики-атомщики, физики-ядерщики – все они постоянно пользуются квантовой механикой, причем пользуются мастерски. Таким образом, это не какие-нибудь элитарные исследования: квантовая механика применяется в современных технологиях повсеместно. Полупроводники, транзисторы, микрочипы, лазеры, компьютерная память – все это работает на основе квантовой механики. Если уж на то пошло, то квантовая механика необходима для понимания основополагающих свойств окружающего мира. В принципе, вся химия – это прикладная квантовая механика. Чтобы понять, как светит солнце или почему столы твердые, нужна квантовая механика.

Представьте, что вы закрыли глаза. Становится довольно темно, не так ли? Это кажется логичным, ведь свет не проникает сквозь веки. Однако все не совсем так: инфракрасный свет с длиной волны чуть больше, чем у видимого света, постоянно излучается любыми теплыми объектами, в том числе человеческим телом. Если бы наши глаза были столь же восприимчивы к инфракрасному спектру, как и к видимому свету, то инфракрасный свет слепил бы нас даже при закрытых веках – ведь инфракрасное излучение исходит и от глазных яблок. Однако палочки и колбочки – светочувствительные рецепторы у нас в глазах – воспринимают только видимый свет, но не инфракрасный. Как это удается? В конечном итоге ответ на этот вопрос лежит в области квантовой механики.

Квантовая механика – это не магия. Это глубочайшее и наиболее исчерпывающее из имеющихся у нас представление о реальности. Насколько нам сегодня известно, квантовая механика – это не аппроксимация истины, а истина в чистом виде. Это мнение может измениться, если появятся неожиданные экспериментальные результаты, но до сих пор не наблюдается даже намек на подобные сюрпризы. Разработка квантовой механики пришлась на начало XX века и проходила с участием таких великих ученых, как Планк, Эйнштейн, Бор, Гейзенберг, Шрёдингер и Дирак. В результате к 1927 году было вполне понятно, что квантовая механика – одно из величайших интеллектуальных достижений в истории человечества. У нас есть все основания ею гордиться.

С другой стороны, вспомним знаменитую цитату Ричарда Фейнмана: «Думаю, я смело могу сказать, что квантовую механику никто не понимает». Квантовая механика *используется* для проектирования новых технологий и прогнозирования результатов экспериментов. Однако честные физики признаются, что мы по-настоящему *не понимаем* квантовую механику. У нас есть метод, которым можно уверенно пользоваться в заданных условиях, и этот метод дает умопомрачительно точные прогнозы, триумфально подтвержденные экспериментальными данными. Но если мы захотим копнуть глубже и разобраться, что же на самом деле происходит, – окажется, что мы этого просто не знаем. Физики привыкли относиться к квантовой механике как к безмозглому роботу, с помощью которого



решаются определенные задачи, а не как к любимому другу, интересной личности.

Подобное отношение со стороны профессионалов влияет и на то, как квантовую механику объясняют широкой аудитории. Нам бы хотелось представить полностью сформированную картину Природы, но сделать это мы не в силах, так как среди самих физиков нет согласия в том, что же на самом деле сообщает квантовая механика. Напротив, в научно-популярных трактовках обычно подчеркивается, что квантовая механика таинственная, обескураживающая, непостижимая. Такой посыл противоречит основополагающим принципам науки, в частности идее о том, что мир принципиально познаваем. Подступаясь к квантовой механике, мы натываемся на своеобразный ментальный блок, и, чтобы преодолеть его, нужна небольшая «квантовая терапия».



На лекциях по квантовой механике для студентов мы начинаем со списка правил. Некоторые из этих правил формулируются узнаваемо: существует математическое описание квантовых систем плюс объяснение того, как такие системы эволюционируют. Однако далее следует набор дополнительных правил, не имеющих аналогов ни в одной другой физической теории. Дополнительные правила описывают, что происходит, когда мы *наблюдаем* квантовую систему, и в такой ситуации ее поведение полностью отличается от поведения в ситуации, когда никто ее не наблюдает. Что же, черт возьми, это значит?

В принципе, есть два варианта ответа на данный вопрос. Первый – история, которую мы излагаем нашим студентам, удручающе неполна, и для того, чтобы квантовая механика могла считаться разумной теорией, нам необходимо понять, что такое «измерение» или «наблюдение» и почему в ситуации наблюдения и ненаблюдения поведение системы кажется настолько разным. Второй – квантовая механика разительно противоречит всем привычным нам представлениям о физике и требует отказаться от мира, где объект существует объективно и независимо от того, как мы его

воспринимаем, приняв вместо этого картину мира, в которой наблюдение каким-то образом вплетено в фундаментальную природу реальности.

Как бы то ни было, есть все основания подробно исследовать в книгах по физике эти варианты и признать, что при всей супер-успешности квантовой механики, мы не можем утверждать, что ее разработка завершена. В книгах этого нет. Как правило, описанная проблема в книгах просто замалчивается, а физики предпочитают оставаться в собственной зоне комфорта, предлагая студентам решать очередные уравнения.

Это никуда не годится. И положение ухудшается.

Можно подумать, что в такой ситуации стремление понять квантовую механику, должно быть, является величайшей из целей в масштабах всей физики. Миллионы долларов грантовых денег поступают в распоряжение научных сотрудников различных квантовых фондов, ярчайшие умы привлекаются ради решения этой задачи, наиболее важные открытия вознаграждаются премиями и приносят славу.

Университеты соперничают за право принять на работу выдающихся представителей данной дисциплины, предлагая им баснословные жалованья и пытаясь переманить их таким образом у конкурентов.

К сожалению, все совсем не так. Мало того что попытки осмыслить квантовую механику не считаются в современной физике «статусной» специализацией; во многих институтах она почти не пользуется уважением, а то и активно принижается. На большинстве физических факультетов нет никого, кто занимался бы этой проблемой, а на тех, кто все-таки за нее берется, смотрят с подозрением. (Недавно, готовя заявку на грант, я получил совет сосредоточиться на описании моих работ по гравитации и космологии – эти дисциплины считаются серьезными – и умолчать о моих трудах над основами квантовой механики, поскольку при их упоминании меня начнут воспринимать менее серьезно.) За последние 90 лет ученые значительно продвинулись вперед. Но, как правило, это были целеустремленные одиночки, вопреки отношению коллег считавшие, что исследуемые проблемы действительно важны. Либо же это были студенты, которые

не подозревали о предосудительности этого направления и впоследствии отказывались от него.

В одной из басен Эзопа Лиса нашла сочную виноградную гроздь, но все ее прыжки с целью достать ягоды не увенчались успехом. Тогда она разочарованно заявляет, что виноград, вероятно, кислый и не очень-то его и хотелось. В нашем случае в роли Лисы выступают физики, а в роли винограда – «понимание квантовой механики». Многие исследователи решили, что изначально было не так уж и важно понимать, как именно устроена природа; куда важнее умение делать конкретные прогнозы.

Ученых приучают ценить осязаемые результаты, будь то замечательные экспериментальные находки или количественные теоретические модели. Потратить время на понимание уже имеющейся теории без гарантии получения новых технологий и прогнозов – идея совсем не привлекательная. Похожее напряжение внутри сообщества было показано в одном из эпизодов телесериала «Прислушка», где группа сыщиков несколько месяцев упорно трудилась, собирая доказательства, чтобы выстроить дело против могущественного наркокартеля. Тем временем их начальству не хватало терпения на такой «безответственный» пошаговый подход. Им необходимо было что-то предъявить на ближайшей пресс-конференции, поэтому полицейских вынуждали биться головой о стену и совершать показушные аресты. Научные фонды и кадровые комитеты ведут себя в точности как это начальство. В мире, где любые стимулы полагаются только за конкретные, измеримые результаты, менее срочные проблемы, связанные с «общей картиной», можно отложить, чтобы не отвлекаться от гонки к следующей непосредственной цели.



У этой книги три основных посыла. Во-первых, квантовая механика должна быть понятной – даже если до этого пока еще далеко, – и достижение такого понимания должно быть одной из самых приоритетных целей современной науки. Квантовая механика занимает уникальное место среди физических теорий, так как в ней проводится явное отличие между тем, *что мы видим*, и тем, *что есть*

на самом деле. Здесь возникает особый интеллектуальный вызов для ученых (а также для всех остальных), привыкших относиться к наблюдаемому миру как к очевидной «реальности» и объяснять все феномены в соответствии с этой реальностью. Однако этот вызов не является непреодолимым: если мы освободимся от некоторых устаревших и «интуитивных» способов мышления, то обнаружим, что в квантовой механике нет ничего безнадежно мистического или необъяснимого. Это просто физика.

Второй посыл заключается в том, что мы добились реального прогресса в понимании квантовой механики. Я сосредоточусь на описании подхода, который кажется мне наиболее многообещающим – это эвереттовская, или многомировая, интерпретация квантовой механики. Многомировая (эвереттовская) интерпретация была с энтузиазмом воспринята многими физиками, но пользуется неоднозначной репутацией среди тех, кому не нравится идея пролиферации новых реальностей, копирующих друг друга. Если вы один из таких скептиков, то я хочу по крайней мере убедить вас, что многомировая интерпретация – это *самый последовательный* способ осмысления квантовой механики. Именно к нему мы придем, если двинемся по пути наименьшего сопротивления, всерьез воспринимая квантовые феномены. В частности, картина с множеством миров прогнозируется на основе уже состоявшегося формализма, а не подгоняется вручную. Однако многомировая интерпретация – не единственный авторитетный подход, и мы поговорим о некоторых из важнейших его альтернатив (в этом я берусь быть честным, хотя и не обещаю соблюдать баланс). В данном случае важно, что каждый из подходов – это хорошо сформулированная научная теория, из которой проистекают потенциально разные экспериментальные следствия, а не просто эфемерные «интерпретации», о которых можно подискутировать за сигарами и коньяком, после того как настоящая работа уже закончилась.

Третий посыл – в том, что все это важно, и не только для целостности науки. Достигнутые к настоящему времени успехи имеющейся (адекватной, но не до конца последовательной) системы квантовой механики не должны затмевать того факта, что в определенных обстоятельствах для решения поставленной задачи подобный подход просто не годится. В частности, для понимания

природы пространства-времени как такового, а также происхождения и конечной судьбы Вселенной критически необходимо разбираться в основах квантовой механики. В этой книге я сформулирую несколько новых, захватывающих и, признаться, гипотетических предложений, позволяющих проследить провокационные связи между квантовой запутанностью и тем, как изгибается и искривляется пространство-время, – речь о феномене, известном нам с вами как гравитация.

Поиск полной и убедительной теории квантовой гравитации уже давно признан работой по достижению важной научной цели (престиж, премии, попытка переманить преподавателя и вот это вот все). Возможно, секрет в том, чтобы не начинать с гравитации и не пытаться ее «квантовать», а податься в самые глубины квантовой механики и обнаружить, что именно на этом пути нас и поджидает гравитация.

Мы не можем говорить об этом с уверенностью. В этом и заключается захватывающая и беспокойная сторона ультрасовременных исследований. Однако пришло время всерьез отнестись к фундаментальной природе реальности, то есть встретиться с квантовой механикой лицом к лицу.

# Часть I

## Жуть

# 1

## Что происходит *Заглянем в квантовый мир*

Именно Альберт Эйнштейн, который со словами обращался столь же умело, как с уравнениями, навесил на квантовую механику ярлык, от которого ей не удастся избавиться до сих пор: речь о немецком эпитете *spukhaft*, который обычно переводится на русский язык как «жуткий». Как бы то ни было, именно «жутковатое» впечатление остается от большинства публичных дискуссий, посвященных квантовой механике. Нам говорят, что эта область физики неотделима от чего-то мистического, сверхъестественного, диковинного, непознаваемого, странного, обескураживающего. Жуткого.

Непостижимость бывает привлекательной. Подобно таинственному обворожительному незнакомцу, квантовая механика соблазняет нас наделять ее всевозможными качествами и возможностями, даже если не обладает ими на самом деле. Беглый поиск по книгам со словом «квантовый» в заглавии дает следующий список «возможных» применений квантовой механики:

*Квантовый успех*

*Квантовое лидерство*

*Квантовое сознание*

*Квантовое прикосновение*

*Квантовая йога*

*Квантовое питание*

*Квантовая психология*

*Квантовый разум*

*Квантовая слава*

*Квантовое всепрощение*

*Квантовая теология*

*Квантовое счастье*

*Квантовая поэзия*

*Квантовая педагогика*

*Квантовая вера*

## *Квантовая любовь*

Весьма впечатляющее резюме для физической дисциплины, которую зачастую характеризуют как применимую лишь на уровне микроскопических процессов с участием субатомных частиц.

Честно говоря, квантовая механика – или «квантовая физика», или «квантовая теория» (все эти названия синонимичны) – важна не только в микромире. Она описывает весь мир, от нас с вами до звезд и галактик, от недр черных дыр до истоков Вселенной. Но явная странность квантовых феноменов становится совершенно очевидной, только если рассматривать мир в максимальном приближении.

Одна из идей этой книги посвящена тому, что квантовая механика не заслуживает «пугающей» коннотации и не является каким-то невыразимым таинством, непостижимым для человеческого разума. Квантовая механика *поразительна* своим новаторским, глубоким, невероятным представлением о реальности, весьма отличающимся от привычного нам. Да, порой наука бывает такой. Однако если тема кажется сложной или вгоняет в ступор, наука в ответ стремится решить проблему, а не притворяться, будто ее нет. Есть все основания полагать, что квантовая механика в этом плане похожа на любую другую физическую теорию: такой подход к ней тоже должен сработать.

Многие описания квантовой механики строятся по типичному шаблону. Сначала указывают на какой-нибудь парадоксальный квантовый феномен. Далее рассказчик недоуменно признает, что мир, вероятно, может быть устроен именно так, и отчаивается найти в этом какой-либо смысл. Наконец (если повезет), вам попытаются дать некое объяснение.

В этой книге мы стремимся к ясности, а не к таинственности, поэтому я не стану брать на вооружение такую стратегию. Я хочу представить квантовую механику максимально понятно с самого начала. То, что я расскажу, покажется странным, но такова уж природа этой дисциплины. Зато, надеюсь, нам удастся избежать неясности и не запутаться еще больше.

Я постараюсь придерживаться исторической хронологии. В этой главе мы рассмотрим базовые экспериментальные факты, которые требует признать квантовая механика, а затем поговорим о



многомировой интерпретации, чтобы осмыслить эти наблюдения. В следующей главе мы перейдем к полуисторическому описанию открытий, которые сподвигли ученых размышлять над такой принципиально новой разновидностью физики. И тогда мы по-настоящему поймем, насколько драматичны некоторые следствия квантовой механики.

Закончив с подготовкой, в оставшейся части книги мы возьмемся за решение увлекательной задачи – разберемся, к чему же все это нас ведет, и развеем таинственность, окружающую некоторые наиболее загадочные свойства квантовой реальности.



Физика – это одна из базисных естественных наук и одно из основополагающих человеческих начинаний. Мы осматриваемся в мире и видим, что он полон материи. Что это за материя и каковы ее свойства?

Человек стал размышлять над такими вещами с тех самых пор, как у него вообще появились вопросы. В Древней Греции физика считалась общим учением о переменах и движении, касалась как живой, так и неживой материи. Аристотель говорил о физике в терминах причин – материальных, активных и целевых. То, как движется и меняется тело, можно объяснить исходя из его внутренней природы и воздействующих на него внешних сил. Например, типичные тела могут по природе своей тяготеть к нахождению в покое; чтобы они пришли в движение, что-то должно на них подействовать и сообщить им такое движение.

Все изменилось благодаря умному пареньку по имени Исаак Ньютон. В 1687 году он опубликовал книгу «Начала математики», важнейшую работу в истории физики. Именно в ней были изложены основы так называемой классической, или попросту ньютоновской, механики. Ньютон смахнул, словно пыль, все эти древние разговоры о природе и целях, явив то, что скрывалось под ними: ясный и строгий математический аппарат, которым преподаватели и по сей день продолжают пытаться студентов.

Какие бы воспоминания у вас ни сохранились о школьных и университетских домашних заданиях про маятники и наклонные плоскости, базовые идеи классической механики в принципе очень просты. Рассмотрим тело – например, камень. Абстрагируемся от всех его свойств, которые могут быть интересны геологу; так, нас не интересует его цвет и состав. Не будем учитывать и того, что базовая структура камня может измениться, например, если разбить его на кусочки молотком. Сведем наше представление об этом камне к максимально абстрактной форме: камень – это тело, занимающее *положение в пространстве*, причем это положение *меняется со временем*.

Классическая механика в точности описывает, как именно положение<sup>[1]</sup> камня изменяется со временем. Такая картина мира для нас абсолютно привычна, поэтому стоит лишний раз поразмыслить над тем, насколько она впечатляющая. Ньютон вручил нам не какие-нибудь зыбкие банальности об общих тенденциях к более или менее активному движению камней тем или иным образом. Он сообщает нам точные и нерушимые правила того, как всё во Вселенной движется в ответ на всевозможные воздействия, – правила, которые применимы и на Марсе, чтобы, например, ловить там бейсбольные мячи или управлять марсоходами.

Вот как это работает. В любой момент камень обладает некоторой координатой и скоростью. Согласно Ньютону, если на камень не воздействуют никакие силы, то он продолжит движение по прямой с постоянной скоростью. (Одно это – серьезное отступление от Аристотеля, который сказал бы, что любые тела необходимо постоянно толкать, чтобы они оставались в движении.) Если сила действительно воздействует на камень, то он будет перемещаться с ускорением. Ускорение – это изменение скорости камня, приводящее к тому, что он начинает двигаться быстрее или медленнее или просто меняет направление движения: прямо пропорционально той силе, которая к нему приложена.



В принципе, вот и все. Чтобы я мог полностью рассчитать траекторию камня, вы должны описать мне его координату, скорость и воздействующие на него силы. Остальное сообщат уравнения Ньютона. В таких взаимодействиях могут участвовать, например, сила тяготения, сила вашей руки (если вы подберете камень и бросите его), а также сила трения, воздействующая на камень в момент приземления. Эта идея в равной степени применима и к бильярдным шарам, и к космическим кораблям, и к планетам. Проект физики, в соответствии с такой классической парадигмой, в сущности, заключается в следующем: выяснить, из каких материалов состоит Вселенная (камни и пр.) и какие силы на них воздействуют.

Классическая физика предлагает стройную картину мира, однако прежде чем ее удалось сформулировать, было пройдено несколько критически важных этапов. Обратите внимание, насколько щепетильно приходится отбирать информацию, на основе которой мы определяем, что произойдет с камнем: его координата, скорость и то, какие силы на него воздействуют. Можно считать эти силы элементами внешнего мира, а существенная информация о самом камне сводится к значениям его собственных координаты и скорости. Напротив, ускорение камня в любой момент времени – это не та величина, которую требуется указать; именно эту информацию позволяют вычислить законы Ньютона, если известны данные о положении и скорости камня.

Вместе координата и скорость характеризуют *состояние* любого физического тела в классической механике. Если мы имеем дело с системой, в которой находится множество движущихся элементов, то

классическое состояние системы – это просто список состояний всех ее отдельных частей. Так, в объеме воздуха, заполняющего обычную комнату, содержится около  $10^{27}$  молекул различных типов, и состояние этого объема можно представить как список значений координат и скоростей для каждой из этих молекул. (Строго говоря, физики предпочитают оперировать импульсом каждой частицы, а не ее скоростью, однако на уровне классической ньютоновской механики импульс каждой частицы равен всего лишь произведению ее массы и скорости.) Набор всех возможных состояний, которые могут сложиться в системе, называется *фазовым пространством* системы.

Французский математик Пьер Симон Лаплас отметил важный подтекст, свойственный образу мышления в духе классической механики. Выходит, что бесконечно мощный разум мог бы знать состояние буквально каждого объекта во Вселенной, на основании чего был бы способен логически вывести все, что произойдет в будущем, равно как и все, что происходило в прошлом. Демон Лапласа – это мысленный эксперимент, а не реалистичный проект амбициозного ученого-информатика, но из этого эксперимента проистекают глубочайшие следствия. Ньютоновская механика описывает детерминистскую Вселенную, устроенную как часовой механизм.

Аппарат классической физики так красив и убедителен, что стоит ее усвоить, и она начинает казаться почти безальтернативной. Многие великие мыслители, жившие после Ньютона, были убеждены, что в общем виде суперструктура физики уже разгадана и дальнейшее развитие науки заключается в уточнении того, какое именно воплощение классической физики (на уровне сил, на уровне частиц) подходит для описания Вселенной в целом. Даже теория относительности, которая по-своему преобразила мир, является вариацией на тему классической механики, а не заменой оной.

Но вот появилась квантовая механика, и все изменилось.



Изобретение квантовой механики наряду с ньютоновской формулировкой классической механики представляет собой еще одну

великую революцию в истории физики. Квантовая теория, в отличие от всего, что было до нее, не предлагает конкретную физическую модель в рамках базового аппарата классической физики; она полностью отказывается от этого аппарата, заменяя его чем-то совершенно иным.

Фундаментально новый элемент квантовой механики, то, что делает ее принципиально отличной от своей предшественницы, классической физики, заключается в вопросе, что значит *измерить* что-либо, касающееся квантовой системы. Что такое измерение, и что происходит, когда мы что-то измеряем, и что это нам говорит о реально происходящих событиях. Совокупность этих вопросов образует так называемую квантовомеханическую *проблему измерения*. Несмотря на ряд перспективных идей, ни в физике, ни в философии нет абсолютно никакого согласия по поводу того, как решать проблему измерения.

Попытки подступить к проблеме измерения привели к появлению так называемой *интерпретации квантовой механики*, хотя этот термин не совсем точен. «Интерпретации» применимы в работах на темы литературы и искусства, где возможны различные трактовки одного и того же базового объекта. В квантовой механике складывается несколько иная ситуация: здесь конкурируют поистине разные научные теории, не совместимые друг с другом варианты представления физического мира. Именно поэтому современные ученые, работающие в этой дисциплине, предпочитают называть ее «основаниями квантовой механики». Тема квантовых оснований — часть науки, а не ее критика в буквальном смысле.

Никому никогда не приходило в голову рассуждать об «интерпретациях классической механики» — классическая механика совершенно прозрачна. Существует математический аппарат, описывающий координаты, скорости и траектории, и да, смотрите: вот камень, который фактически может двигаться под действием законов, предписываемых этим аппаратом. В классической механике не существует проблемы измерения как таковой. Состояние системы описывается ее координатами и скоростью, и если мы хотим измерить эти показатели — то просто берем и измеряем. Естественно, измерить показатели системы можно небрежно или грубо, и в результате получить неточные результаты либо изменить саму систему. Однако это отнюдь не данность: достаточно проявить аккуратность — и мы точно измерим все, что можно узнать о системе, не изменив ее каким-

либо заметным образом. Классическая механика подразумевает ясные и недвусмысленные отношения между тем, что мы видим, и тем, что описывает теория.

Квантовая механика, при всей ее успешности, ничего подобного не предлагает. Загадку, скрытую в самом сердце квантовой реальности, можно резюмировать так: то, что мы *видим*, наблюдая мир, похоже, фундаментально отличается от *реального* положения дел.

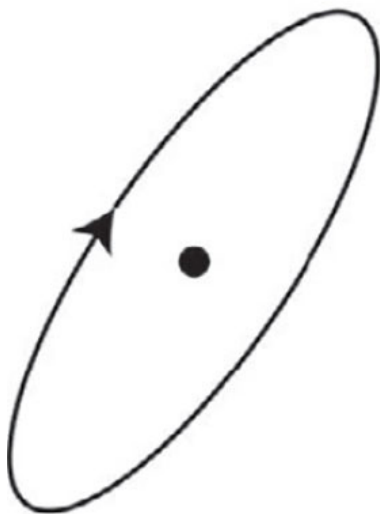


Поговорим об электронах – элементарных частицах, обращающихся вокруг атомного ядра. Именно из их взаимодействий складывается вся химия и, следовательно, практически все интересное, что происходит вокруг вас в настоящий момент. Как и в случае с камнем, можно игнорировать некоторые конкретные свойства электрона, например его спин и тот факт, что у него есть электрическое поле. (В самом деле, мы могли бы даже продолжить пример с камнем – ведь камень является квантовой системой в той же степени, что и электрон, – однако, переходя к примеру с субатомной частицей, проще учитывать, что характерные отличительные черты квантовой механики со всей ясностью просматриваются именно при изучении сверхмалых объектов.)

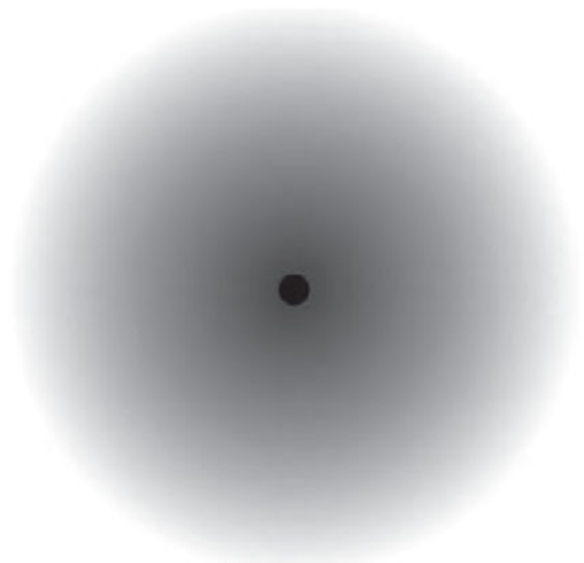
В отличие от ситуации с классической механикой, где состояние системы можно описать в контексте ее координаты и скорости, природа квантовой системы куда менее конкретна. Рассмотрим электрон в его «естественной среде обитания», то есть когда он обращается вокруг атомного ядра. При слове «обращается» вы, вероятно, вспомните одно из тех наглядных пособий, которые, несомненно, не раз вам попадались, где орбита электрона изображается более или менее похожей на планетарную орбиту в Солнечной системе. У электрона (могли бы подумать вы) есть координата, скорость, и с течением времени он носится вокруг ядра, расположенного в центре атома, по круговой или, может быть, эллиптической орбите.

Квантовая механика подсказывает, что все несколько иначе. Можно *измерить* значения координаты или скорости электрона (но только по

отдельности), и если мы окажемся по-настоящему аккуратными и талантливыми экспериментаторами, то получим ответы. Но то, что предстанет перед нами в результате такого измерения, не есть точное, полное, объективное состояние электрона. Действительно, те конкретные результаты измерений, которые мы получим, нельзя предсказать с полной уверенностью, и в этом отношении квантовая механика разительно отличается от классической. Лучшее, что получится сделать, это предсказать, *с какой вероятностью* мы увидим электрон в любом конкретном месте или двигающимся с конкретной скоростью.



Классическое  
представление  
орбиты  
электрона

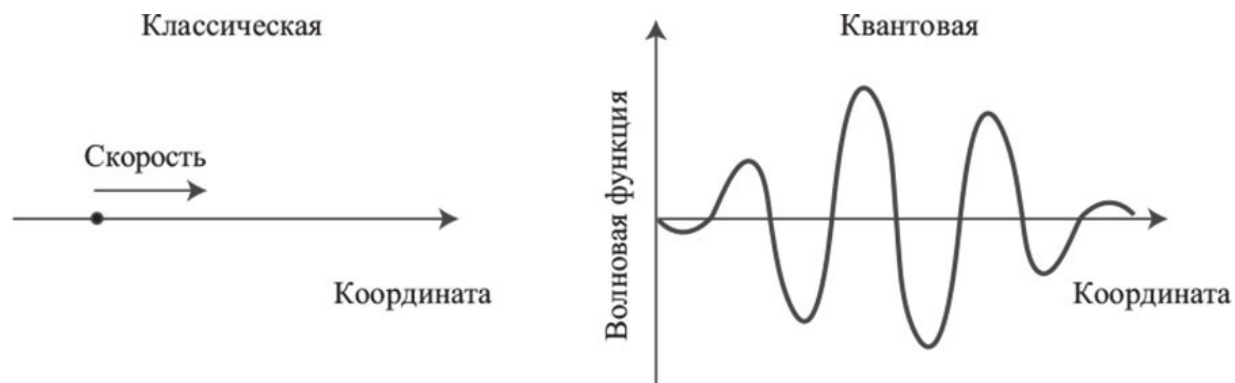


Квантовая  
волновая  
функция  
электрона

Следовательно, классическое представление о состоянии частицы, «ее координате и скорости» в квантовой механике заменяется чем-то совершенно не вписывающимся в наш обыденный опыт: облаком вероятностей. Для электрона в атоме это облако более плотное ближе к центру и рассеивается по краям. В максимально плотной области вероятность встретить электрон является наивысшей: там, где облако

становится разреженным практически до полного исчезновения, вероятность встретить электрон также исчезающе мала.

Такое облако часто называют *волновой функцией*, поскольку оно может колебаться подобно волне, по мере того как со временем изменяется наиболее вероятный результат измерения. Волновая функция обычно обозначается греческой буквой «пси» ( $\Psi$ ). Для каждого возможного результата измерения, например координаты частицы, волновая функция позволяет присвоить конкретное число, называемое *амплитудой*, связанной с данным результатом. Так, амплитуда, с которой частица может оказаться в конкретной точке  $x_0$ , будет записываться как  $\Psi(x_0)$ .



Вероятность получить такой результат при измерениях равна квадрату амплитуды.

$$\text{Вероятность конкретного результата} = |\text{Амплитуда данного результата}|^2$$

Это простое отношение называется правилом Борна в честь физика Макса Борна<sup>[2]</sup>. Часть стоящей перед нами задачи – разобраться, откуда в мире взялось такое правило.

Совершенно определенно следующее: мы не утверждаем, что есть электрон, обладающий некоторой координатой и скоростью; мы попросту не знаем этих значений, и эта наша неосведомленность как раз заключена в волновой функции. В этой главе мы ничего не говорим о том, что «есть», а отмечаем лишь то, что мы наблюдаем. В следующих главах я вообще стану упирать на то, что волновая



функция – это и есть истинная сумма свойств реальности, а такие идеи, как скорость и координата электрона, – всего лишь характеристики, которые мы в силах измерить. Но не все разделяют эту точку зрения, поэтому пока постараемся сохранять беспристрастность.



Давайте сопоставим правила классической и квантовой механики и сравним их. Состояние классической системы описывается координатами и скоростью всех движущихся в ней элементов. Чтобы проследить ее эволюцию, представим себе примерно следующую процедуру:

### **Правила классической механики**

1. Подготавливаем систему, фиксируя конкретные координаты и скорость для каждой из ее частей.
2. Следим за эволюцией системы в соответствии с ньютоновскими законами движения.

Вот и все. Дьявол, естественно, в деталях. В некоторых классических системах движущихся элементов очень много.

В свою очередь, в типичном учебнике по квантовой механике описание правил дается в двух частях. В первой части имеем структуру, строго эквивалентную той, что представлена в классическом случае. Квантовые системы описываются волновыми функциями, а не координатами и скоростями. Точно как в классической механике ньютоновские законы движения управляют эволюцией состояния системы, в квантовой системе есть уравнение, описывающее, как эволюционирует волновая функция. Оно называется уравнением Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера можно сформулировать так: «Скорость изменения волновой функции пропорциональна энергии квантовой системы». Чуть более строгая формулировка такова: волновая функция может описывать состояния с

различными энергиями, и, согласно уравнению Шрёдингера, высокоэнергетические части волновой функции эволюционируют стремительно, а низкоэнергетические – очень медленно. Что, если подумать, вполне логично.

Для наших целей важно лишь то, что существует уравнение, позволяющее спрогнозировать, как волновые функции гладко<sup>[3]</sup> эволюционируют с течением времени. Эта эволюция столь же неизбежна и предсказуема, как и движение тел в соответствии с законами Ньютона в классической механике. Пока – ничего экстраординарного.

### **Правила квантовой механики (часть первая)**

1. Подготавливаем систему, фиксируя конкретную волновую функцию  $\Psi$ .
2. Далее система эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера.

Пока все нормально – эти элементы квантовой механики строго соотносятся с их классическими предшественниками. Вот только правила классической механики на этом заканчиваются, а в игру вступают дополнительные правила квантовой.

Все эти дополнительные правила связаны с измерением. Измеряя, например, спин или координату частицы, мы, согласно квантовой механике, в любом случае получим лишь определенные, возможные в данном случае результаты. Конкретный результат спрогнозировать не выйдет, но можно рассчитать вероятность получения каждого из возможных результатов. После того как измерение будет выполнено, волновая функция *коллапсирует*, превращаясь в совершенно новую функцию, в которой все вероятности сконцентрированы вокруг именно того результата, который вы только что получили. Таким образом, измеряя квантовую систему, максимум, на что вы можете рассчитывать – это возможность спрогнозировать вероятность различных ее результатов. Но если вы сразу повторите измерение той же самой величины, то раз за разом будете получать один и тот же результат – волновая функция сколлапсировала в него.

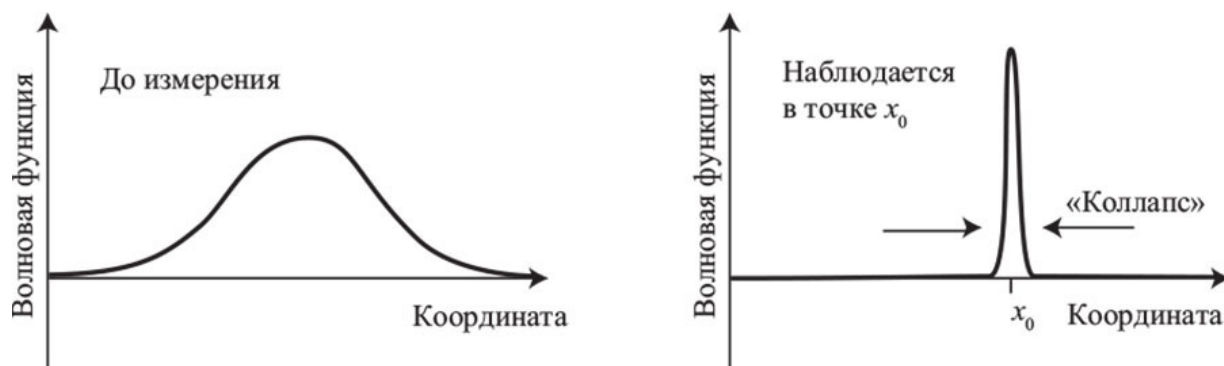
И вот самый сок нашего разбора.

### Правила квантовой механики (часть вторая)

3. Существуют определенные наблюдаемые величины, которые по желанию можно измерить, – например координата частицы. По итогам измерения ее координаты мы получим вполне определенный результат.

4. Вероятность получения любого конкретного результата вычисляется исходя из волновой функции. Волновая функция связывает амплитуду с каждым из возможных результатов измерения; вероятность любого результата есть квадрат амплитуды волновой функции.

5. После измерения волновая функция коллапсирует. Как бы ни был широк разброс ее значений изначально, после измерения все ее значения концентрируются в области того результата, который мы получили при измерении.



В рамках современного университетского курса студенты при первом знакомстве с квантовой механикой изучают ту или иную версию пяти этих правил. Идеология, лежащая в основе такой подачи материала, – считать измерение фундаментальным процессом, полагая, что коллапс волновой функции происходит вместе с актом наблюдения, и не задавать вопросов о том, что при этом происходит «за кулисами». Такой подход иногда называют *копенгагенской интерпретацией* квантовой механики. Но ученые, в том числе копенгагенские физики, предположительно сформулировавшие такую

интерпретацию, расходятся во мнениях о том, что же на самом деле должно обозначаться этим термином. Так что мы можем считать копенгагенскую интерпретацию просто «хрестоматийной трактовкой квантовой механики».

Стоит ли говорить, что идея, будто эти правила и отражают истинное устройство реальности, кажется возмутительной.

Что именно понимается под «измерением»? Из чего именно состоит «измеритель»? Тождествен ли такой «измеритель» человеку, то есть обязательно ли наличие сознания, чтобы он сработал, либо достаточно всего лишь способности кодировать информацию? Либо «измеритель» просто должен быть макроскопическим и если так – то насколько? Когда именно происходит акт измерения и насколько быстро? Почему мир устроен так, что волновая функция коллапсирует настолько резко? Если бы волновая функция была распределена в очень большом объеме пространства, то могла бы она сколлапсировать быстрее скорости света? А что происходит со всеми теми возможностями, которые, казалось бы, допускаются волновой функцией, но которых мы не наблюдаем? Они что, вообще не существовали или исчезли, превратившись в ничто?

Сформулирую предельно кратко: почему квантовые системы эволюционируют гладко и детерминированно, по уравнению Шрёдингера, *пока мы на них не смотрим*, но при взгляде на происходящее со стороны сразу коллапсируют? Как они узнают о наблюдении и почему наблюдение в данном случае так важно? (Не волнуйтесь, на все эти вопросы мы попробуем ответить.)



Большинство из нас полагает, что наука стремится понять окружающий мир. Мы наблюдаем, что происходит вокруг нас, а наука пытается дать объяснение происходящему.

Квантовая механика, если понимать ее в современной академической формулировке, в этом не преуспела. Мы не знаем, что происходит; по крайней мере, в сообществе профессиональных физиков согласия по этому вопросу нет. Вместо этого у нас есть готовый *рецепт*, который мы снова и снова записываем в своих

учебниках, предлагая его студентам. Исаак Ньютон, зная координату и скорость камня, подброшенного вверх в гравитационном поле Земли, мог бы сказать вам, по какой траектории полетит этот камень. Аналогично, если у нас есть квантовая система, подготовленная определенным образом, правила квантовой механики подскажут нам, как будет меняться волновая функция с течением времени и какова будет вероятность получить при измерениях те или иные результаты, если мы решим эту функцию наблюдать.

Тот факт, что квантовый подход дает нам лишь вероятности, но не определенности, может кого-то раздражать, но с этим можно научиться жить. По-настоящему нас беспокоит (или должно беспокоить) то, что мы понятия не имеем, что именно происходит.

Представьте себе, что некий коварный гений выяснил все законы физики, но не стал открывать их всему миру, а запрограммировал компьютер, чтобы тот отвечал на вопросы по конкретным физическим задачам, после чего этот гений создал интерфейс для работы с программой через веб-страницу. Каждый заинтересованный пользователь может просто перейти на сайт, ввести хорошо сформулированный вопрос по физике и получить верный ответ.

Естественно, такой программой активно пользовались бы ученые и инженеры. Но доступ к этому сайту не означает, что мы понимаем законы физики. У нас есть оракул, задача которого – давать ответы на конкретные вопросы, но сами мы лишены даже малейшего представления об основополагающих правилах этой игры. Все остальные ученые в мире, у которых в распоряжении оказался бы такой оракул, не спешили бы заявлять о победе: они продолжали бы упорно работать, выясняя, каким именно законам подчиняется природа.

Квантовая механика в той форме, в которой она сегодня дается в учебниках по физике, – это оракул, а не по-настоящему понятая наука. Мы можем ставить конкретные задачи и находить на них ответы, но, честно признаться, не можем объяснить, что происходит «за кулисами». Что у нас действительно есть – так это ряд хороших идей о том, что бы это могло быть, и физическому сообществу давно пора бы начать относиться к ним серьезно.

## Смелая формулировка

### *Аскетичная квантовая механика*

Отношение к проблеме, которое насаждается на страницах современных учебников по квантовой механике, емко сформулировал физик Н. Дэвид Мермин: «Заткнись и считай!» Сам Мермин не отстаивает такую позицию, чего не скажешь о других. Каждый уважающий себя физик проводит немало времени за математическими расчетами, как бы он ни относился к основам квантовой механики. Так что предыдущее назидание можно сократить до «Заткнись!»<sup>[4]</sup>.

Так было не всегда. На то, чтобы собрать квантовую механику по кусочкам, ушли десятилетия: свою современную форму она обрела примерно в 1927 году. Тогда в Бельгии прошел V Международный Сольвеевский конгресс, на котором собрались ведущие физики мира, чтобы обсудить статус и значение квантовой теории. К тому времени экспериментальные доказательства уже были ясны, и физикам не терпелось дать количественную формулировку правил квантовой механики. Пришло время закатать рукава и выяснить, что же служит причиной именно такого устройства этого безумного нового мира.

Дискуссии, проходившие на этой конференции, помогают понять контекст, но мы здесь не ради исторического экскурса. Мы хотим понять физику. Поэтому наметим логический путь, который приведет нас к полноценной научной теории квантовой механики. Никакого зыбкого мистицизма, никаких, казалось бы, взятых с потолка правил. Лишь простой набор предположений, которые приведут нас к впечатляющим выводам. Если держать в уме такую картину, то многие вещи, которые в иной ситуации показались бы зловеще таинственными, начинают обретать смысл.



Сольвеевский конгресс вошел в историю как мероприятие, с которого началась знаменитая серия дебатов между Альбертом Эйнштейном и Нильсом Бором относительно того, как следует воспринимать квантовую механику. Бор – датский физик, обосновавшийся в Копенгагене, по праву считается крестным отцом квантовой теории. Он отстаивал примерно такой подход, который принят в современных учебниках: использовать квантовую механику для расчета вероятностей тех или иных результатов измерений, но не требовать от нее ничего более. В частности, не следует слишком серьезно задумываться о том, что происходит «за кулисами». Бор, заручившись поддержкой более молодых коллег, Вернера Гейзенберга и Вольфганга Паули, настаивал, что в уже имеющемся виде квантовая механика – это совершенно нормальная теория.

Эйнштейн с ним решительно не соглашался. Он был глубоко убежден, что долг физики – досконально во всем разобраться и что состояние квантовой механики в 1927 году и близко не позволяло дать удовлетворительное описание природы. Эйнштейн, у которого также нашлись сочувствующие, например Эрвин Шрёдингер и Луи де Бройль, призывал рассматривать проблему глубже, попытаться расширить и обобщить квантовую механику настолько, чтобы она превратилась в удовлетворительную физическую теорию.



Участники Сольвеевского конгресса 1927 года. Наиболее известные участники обозначены цифрами: 1. Макс Планк, 2. Мария Кюри, 3. Поль Дирак, 4. Эрвин Шрёдингер, 5. Альберт Эйнштейн, 6. Луи де Бройль, 7. Вольфганг Паули, 8. Макс Борн, 9. Вернер Гейзенберг и 10. Нильс Бор (фото из «Википедии»)

Эйнштейн и его единомышленники имели основания для осторожного оптимизма и полагали, что такая «новая улучшенная теория» вот-вот будет открыта. Всего несколькими десятилетиями ранее, в конце XIX века, физики разработали теорию статистической механики, описывавшую принципы движения больших групп атомов и молекул. Ключевым шагом в развитии этих исследований, которые проводились под эгидой классической механики (в то время квантовая механика еще не вышла на сцену), стала идея о том, что можно осмысленно рассуждать о поведении большой совокупности частиц, даже если мы в точности не знаем координаты и скорости каждой из них в отдельности. Все, что требуется знать – *распределение вероятностей*, описывающее, с какой вероятностью частицы могут повести себя тем или иным образом.



Иными словами, в статистической механике предполагается, что существует некое конкретное классическое состояние всех частиц, но мы этого состояния не знаем. Все, что у нас есть – это распределение вероятностей. К счастью, для описания довольно большого количества полезных физических явлений этой информации достаточно, так как она фиксирует определенные свойства системы, например температуру и давление. Но распределение не является полным описанием системы; это просто отражение того, что мы знаем (или чего не знаем) о ней. Чтобы обозначить это различие с помощью философских терминов, отметим, что распределение вероятностей является *эпистемологическим* феноменом, описывающим состояние наших знаний, а не *онтологическим*, который описывал бы некоторое объективное свойство реальности. Эпистемология – это учение о знаниях; онтология – учение о том, что реально существует.

В 1927 году естественно было полагать, что и к квантовой механике разумно подходить с подобных позиций. В конце концов, к тому моменту ученые уже выяснили, что волновые функции используются для расчета вероятности любого конкретного результата измерения. Конечно, разумно было предположить, что сама природа доподлинно знает, каков будет этот результат, но формальный аппарат квантовой теории просто не позволяет получить это знание и, следовательно, нуждается в улучшении. Согласно такой трактовке, волновая функция – это еще не всё; существуют еще какие-то «скрытые переменные», фиксирующие, какими именно должны быть результаты конкретного измерения, даже если мы не знаем (и пожалуй, даже не можем определить до акта измерения), каковы их значения.

Может быть. Но в последующие годы удалось получить ряд результатов, среди которых особого внимания заслуживают те, к которым пришел физик Джон Белл, подразумевающих, что самые простые и прямолинейные попытки следовать этим путем обречены на провал. Попытки были – де Бройль даже выдвинул особую теорию, которая в 1950-х была повторно открыта и расширена Дэвидом Бомом, а Эйнштейн и Шрёдингер спорили, перебрасываясь идеями. Однако по теореме Белла предполагается, что любая такая теория требует наличия «дальнодействия», то есть феномена, при котором акт измерения в одной точке может сразу же повлиять на состояние Вселенной в сколь угодно отдаленной точке. Казалось, что это по духу,

если не по букве, противоречит теории относительности, согласно которой объекты не могут перемещаться, а действия – распространяться быстрее скорости света. Подход, предусматривающий существование «скрытых переменных», по-прежнему активно прорабатывается, но все попытки такого рода довольно неуклюжи, и их сложно примирить с современными теориями, например со стандартной моделью физики частиц, не говоря уже о спекулятивных идеях о квантовой гравитации; их мы обсудим позже. Пожалуй, именно поэтому Эйнштейн, основоположник теории относительности, так никогда и не сформулировал собственной удовлетворительной теории.

Принято считать, что Эйнштейн проиграл дебаты с Бором. Нам рассказывают, что Эйнштейн, в молодости отличавшийся творческим и революционным мышлением, состарился и стал консервативен и поэтому не смог ни принять, ни даже понять важности следствий из новой квантовой теории. (Во времена Сольвеевского конгресса Эйнштейну было сорок восемь.) Далее физика развивалась без его участия, и великий человек сошел со сцены, погрузившись в собственные причудливые поиски единой теории поля.

Все эти измышления крайне далеки от истины. Хотя Эйнштейну и не удалось сформулировать полное и убедительное обобщение квантовой механики, его уверенность в том, что физика нуждается в более разумном подходе, чем «заткнись и считай», была более чем справедливой. Полагать, будто он не понимал квантовой теории, – полное безумие. Эйнштейн понимал ее столь же хорошо, как и все остальные, и продолжал вносить фундаментальный вклад в эту тему – в частности, он продемонстрировал важность квантовой запутанности, которая играет центральную роль в наших наилучших современных представлениях о том, как именно устроена Вселенная. Чего ему не удалось, так это убедить коллег-физиков в несостоятельности копенгагенского подхода и в важности поиска самых основ квантовой теории.



Если мы хотим продолжить амбициозные стремления Эйнштейна к созданию полной, недвусмысленной и реалистичной теории естественного мира, но нас удручают сложности, связанные с применением новых скрытых переменных к квантовой механике, остается ли в нашем распоряжении еще какая-нибудь стратегия?

Один из вариантов – забыть о новых переменных, отбросить все сомнительные идеи, связанные с измерением, очистить квантовую механику до самых ее основ и задаться вопросом: что происходит? Что собой представляет самая простая, обедненная версия квантовой теории, которую мы могли бы изобрести в надежде, что, опираясь на нее, по-прежнему сможем объяснять экспериментальные результаты?

Любая версия квантовой механики (коих существует множество) использует волновую функцию или некий эквивалентный феномен и постулирует, что волновая функция подчиняется уравнению Шрёдингера, по крайней мере в большинстве случаев. Эти составляющие должна включать любая теория, которую стоит воспринимать всерьез. Давайте посмотрим, удастся ли нам применить подобный упрямый минимализм, и попробуем рассуждать, не добавляя почти ничего к квантовому формализму.

У такого минималистического подхода есть два аспекта. Во-первых, мы серьезно воспринимаем волновую функцию, считая ее непосредственным отражением реальности, а не просто «учетным инструментом», с помощью которого удобно упорядочивать наши знания. Мы считаем ее онтологической, а не эпистемологической. Это самая аскетичная из возможных стратегий, поскольку в любой другой формулировке над волновой функцией будут надстраиваться какие-то вышестоящие структуры. Но такой шаг по-своему рискован, поскольку волновая функция сильно отличается от того, что мы наблюдаем в окружающем мире. Мы видим не волновые функции, а результаты измерений – например, координату частицы. Но теория, по-видимому, требует, чтобы центральная роль в ней отводилась волновой функции. Итак, давайте посмотрим, как далеко можно зайти, предположив, что квантовая волновая функция является точным описанием реальности.

Во-вторых, если волновая функция обычно эволюционирует гладко, в соответствии с уравнением Шрёдингера, то предположим, что именно таковы ее свойства в любой ситуации. Иными словами, давайте полностью избавимся от всех этих дополнительных правил,

касающихся измерений по «квантовому рецепту», и вернемся к жесткой простоте классической парадигмы: есть волновая функция, она эволюционирует по детерминистскому правилу, и на этом все. Можем назвать такую версию «аскетичной квантовой механикой», или, для краткости, АКМ. Такая формулировка контрастирует с хрестоматийным описанием квантовой механики, сторонники которого делают отсылку к коллапсу волновых функций, вообще избегая разговоров о фундаментальной природе реальности.

Смелая стратегия. Но с ней сразу же возникает проблема: явно *создается впечатление*, что волновые функции коллапсируют. Измеряя квантовую систему с распределенной волновой функцией, мы получаем конкретный ответ. Даже если представить, что волновая функция электрона – это диффузное облако, в центре которого находится ядро, в попытках рассмотреть электрон мы увидим вовсе не облако, а точечную частицу в конкретном месте. Если же мы незамедлительно снова посмотрим на электрон, то увидим его практически на том же месте. Поэтому у первопроходцев квантовой механики были весьма серьезные основания полагать, что волновые функции коллапсируют, – ведь именно так все и выглядит.

Но вполне вероятно, что мы просто спешим с выводами. Вместо того чтобы исходить из увиденного и сразу пытаться изобрести теорию, начнем с аскетичной квантовой механики (описывающей лишь гладкую эволюцию волновых функций) и зададимся вопросом: что должны испытывать люди, живущие в мире, описываемом такой теорией?

Подумайте о том, что бы это могло значить. В предыдущей главе мы с осторожностью говорили о волновой функции как о некоем математическом черном ящике, из которого можно извлекать предсказания результатов экспериментов: волновая функция присваивает каждому конкретному результату амплитуду, и вероятность получить данный результат равна квадрату этой амплитуды. Макс Борн, предложивший данное правило, присутствовал на Сольвеевском конгрессе в 1927 году.

Теперь мы говорим о чем-то более глубоком и одновременно простом. Волновая функция – это не инструмент учета, а точное представление квантовой системы, как если бы набор координат и скоростей был бы представлением классической системы. Мир – это *и*

есть волновая функция. Термин «квантовое состояние» можно использовать в качестве синонима «волновой функции», точно так же как набор координат и скоростей можно называть классическим состоянием.

Это очень серьезное утверждение, касающееся природы реальности. В обычной беседе, даже среди седовласых ветеранов квантовой физики, принято обсуждать такие понятия, как «координата электрона». Но предлагаемая точка зрения, при которой «всё есть волновая функция», подразумевает, что подобные разговоры уводят от сущности, причем в одном из основополагающих вопросов. Нет такой вещи, как «координата электрона». Есть только волновая функция электрона. Квантовая механика подразумевает принципиальное отличие между «тем, что мы можем наблюдать» и «тем, что есть на самом деле». Наши наблюдения не открывают ранее существовавшие факты, о которых мы просто не знали; в лучшем случае они дают крошечный срез гораздо более масштабной, фундаментально неизмеримой реальности.

Задумайтесь об идее, которую вам часто озвучивали: «Атомы почти полностью состоят из пустоты». Если взять за основу картину мира АКМ – это вопиюще неверное утверждение. Оно проистекает из упрямого стремления считать электрон крошечным классическим шариком, который носится кругами в волновой функции, а не признавать, что электрон – это *и есть* волновая функция. В АКМ ничего нигде не носится: есть только квантовое состояние. В атомах нет пустоты; они описываются волновыми функциями, каждая из которых целиком заполняет атом.

Способ вырваться из наших «интуитивных» классических представлений – решительно отвергнуть идею о том, что электрон действительно имеет какую-то конкретную координату. Электрон находится в *суперпозиции* всех возможных координат, в которых мы можем его увидеть, и не привязан ни к какому конкретному местоположению до того самого момента, пока мы его там не увидим. С помощью термина «суперпозиция» физики подчеркивают, что электрон существует в комбинации всех координат, каждой из которых соответствует конкретная амплитуда. Квантовая реальность – это волновая функция; координаты и скорости, как в классической физике

— лишь то, что мы можем наблюдать, когда исследуем эту волновую функцию.



Итак, согласно аскетичной квантовой механике, реальность квантовой системы описывается волновой функцией или квантовым состоянием, которое можно считать суперпозицией всех возможных результатов любого возможного наблюдения, которое мы могли бы провести. Как от этого перейти к досадной реальности, где кажется, что волновые функции коллапсируют, когда мы делаем такие измерения?

Для начала давайте немного внимательнее разберемся с утверждением «мы измеряем координату электрона». Что на самом деле включает в себя такой процесс измерения? Предположительно, нам понадобится некоторое лабораторное оборудование и чуточку экспериментаторской сноровки, но частности нас не волнуют. Всё, что нужно знать — есть некоторый измерительный прибор (камера или что-то еще), который каким-то образом взаимодействует с электроном, а затем позволяет считывать, где именно мы увидели электрон.

Вот и все, что позволяет нам узнать эксперимент, описываемый в учебнике по квантовой механике. Некоторые из ученых, первыми испробовавших этот подход, в том числе Нильс Бор и Вернер Гейзенберг, были готовы зайти немного дальше, говоря о том, что измерительный прибор следует считать классическим объектом, пусть даже наблюдаемый с его помощью электрон является квантово-механическим. Такое разграничение между элементами реальности, одни из которых приходится рассматривать с классической, а другие — с квантовой точки зрения, иногда называется «разрез Гейзенберга». Вместо признания, что квантовая механика фундаментальна, а классическая механика в подходящих условиях просто является хорошим приближением квантовой, в учебниках по квантовой механике классический мир ставится во главу угла как наиболее верный подход в рассуждениях о людях, камерах и других макроскопических объектах, взаимодействующих с

микроскопическими квантовыми системами.



Не очень-то внушает доверие. В первую очередь следовало бы предположить, что граница между квантовым и классическим миром придумана нами для нашего же удобства, а не является фундаментальным свойством природы. Если атомы подчиняются законам квантовой механики, а камеры состоят из атомов, то следовало бы предположить, что и камеры подчиняются законам квантовой механики. Если уж на то пошло, то и мы с вами должны подчиняться законам квантовой механики. Поскольку мы с вами – громоздкие макроскопические объекты, приближение на уровне классической механики позволяет хорошо описать нашу природу, но тем не менее мы должны в первую очередь предположить, что являемся квантовыми сверху донизу.

Если все действительно так, то волновая функция есть не только у электрона. У камеры должна быть собственная волновая функция. Как и у экспериментатора. Все – квантовое.

Столь простая смена перспективы подсказывает, что на проблему измерения можно взглянуть под новым углом. Позиция АКМ такова,

что процесс измерения не должен восприниматься как нечто мистическое или даже описываемое собственным набором правил; камера и электрон просто взаимодействуют друг с другом согласно законам физики, точно так же как камень и Земля.

Квантовое состояние описывает системы как суперпозиции всех возможных результатов измерений. В принципе, исходным состоянием электрона является суперпозиция различных его положений – всех мест, где мы могли бы его увидеть, если бы посмотрели на него. Исходная волновая функция камеры может выглядеть сложно, но в целом сводится к следующему: «Это камера, еще не пронаблюдавшая электрон». Но затем электрон наблюдается через камеру, и между ними происходит физическое взаимодействие, подчиняющееся уравнению Шрёдингера. Причем после такого взаимодействия можно ожидать, что сама камера окажется в суперпозиции со всеми возможными результатами измерений, которые могла наблюдать: она зафиксировала электрон в *этой* точке или в *той* и так далее.

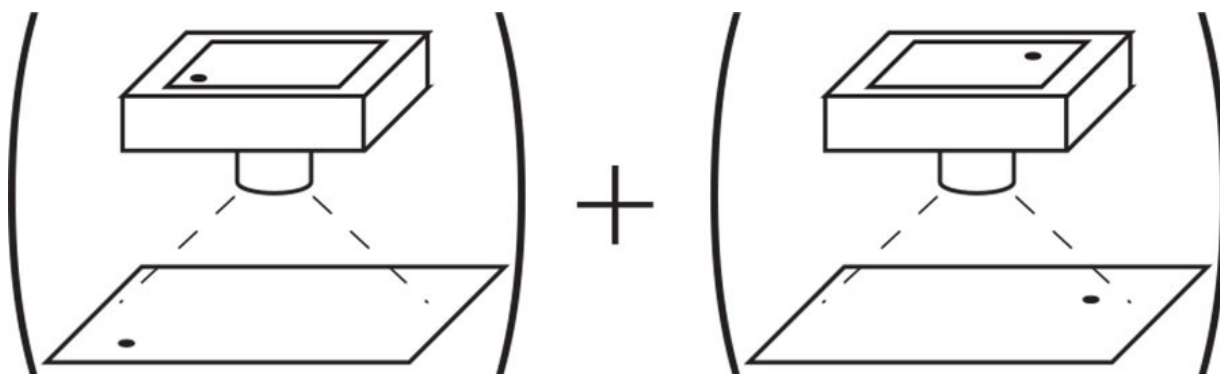
Если бы на этом все и заканчивалось, то АКМ была бы ни на что не годной мешаниной. Электроны в суперпозициях, камеры в суперпозициях – и близко не напоминает надежный, близкий к классическому восприятию мир, который мы видим вокруг.

К счастью, можно обратиться к еще одному поразительному свойству квантовой механики: если у нас есть два разных объекта (например, электрон и камера), то они описываются не разными волновыми функциями, а *одной общей волновой функцией*, характеризующей всю интересующую нас систему, и так вплоть до «волновой функции всей Вселенной», если не мелочиться. В рассматриваемом здесь случае есть волновая функция, описывающая систему, которая состоит из электрона и камеры. Итак, на практике мы имеем суперпозицию всех возможных сочетаний «где мог оказаться электрон» плюс «где его могла пронаблюдать камера».

Хотя такая суперпозиция в принципе учитывает все возможности, большинству из вероятных исходов в квантовом состоянии присваивается нулевой вес. Облако вероятностей обнуляется для большинства возможных комбинаций расположений камеры и электрона. В частности, не может быть такого, чтобы электрон находился в одном месте, а камера зафиксировала его в другом (если,



конечно, ваша камера относительно исправна).



Такой квантовый феномен называется запутанностью. Существует единая волновая функция для комбинированной системы «электрон – камера», состоящая из суперпозиции различных возможностей вида «электрон был в данной точке, и камера пронаблюдала его именно в данной точке». Мы говорим не о том, что электрон у нас сам по себе, а камера сама по себе, – между этими системами есть связь.

Теперь заменим в вышеизложенной дискуссии камеру на вас. Мы (позволим себе это) вообразим, что не делаем снимки оптическим устройством, а обладаем настолько острым зрением, что можем рассмотреть отдельные электроны. В остальном ничего не меняется. Согласно уравнению Шрёдингера, исходная ситуация, в которой еще отсутствует запутанность – электрон находится в суперпозиции различных возможных местоположений, и вы на него еще не посмотрели, – гладко преобразуется в запутанное состояние, где есть электрон, находящийся в суперпозиции всех возможных местоположений, и вы, увидевшие его в каждом из этих мест.

Именно это и диктовали бы нам правила квантовой механики, если бы мы не заморачивались насчет всех этих дополнительных досадных деталей, касающихся процесса измерения. Может быть, все эти дополнительные правила были выдуманы напрасно. В АКМ та история, которую мы только что изложили – о постепенном запутывании между вами и электроном в суперпозицию, – это вся история. В измерении нет ничего особенного; оно просто происходит, когда две системы взаимодействуют соответствующим образом. И после этого *вы и система, с которой вы взаимодействовали,*

*оказываетесь в состоянии суперпозиции, в каждой части которой вы видели электрон в несколько ином месте.*

Но проблема в том, что эта история все еще не совпадает с тем, что вы фактически испытываете, наблюдая квантовую систему. Вы никогда не почувствуете, что в результате развития ситуации превратились в суперпозицию различных возможных результатов эксперимента; вам покажется, что вы просто увидели определенный результат, который можно спрогнозировать с определенной вероятностью. Именно поэтому с самого начала и были добавлены все эти дополнительные правила измерений. В остальном у вас есть, казалось бы, очень симпатичный и аккуратный формализм (квантовые состояния, гладкая эволюция), который просто не согласуется с реальностью.



Давайте немного пофилософствуем. Что именно означает «вы» в предыдущем разделе? Чтобы сформулировать научную теорию, недостаточно записать несколько уравнений; нужно также указать, как эти уравнения проецируются на окружающий мир. Когда речь заходит о нас с вами, нам кажется, что соотнести себя с каким-то элементом научного формализма достаточно просто. Определенно, в вышеизложенной истории, где наблюдатель измеряет координату электрона, складывается такое впечатление, будто этот человек переходит в запутанную суперпозицию различных возможных результатов измерения.

Но есть и альтернативная возможность. Перед актом измерения у нас был один электрон и один наблюдатель (или камера, если угодно: неважно, кто или что в этой ситуации взаимодействует с электроном, достаточно, чтобы он(о) был(о) большим, макроскопическим объектом). Однако после того как взаимодействие состоится, мы должны полагать, что в суперпозицию возможных состояний перешел не один наблюдатель, а что появилось *множество возможных наблюдателей*. Выбирая такую трактовку, мы, описывая состояние системы после измерения, полагаем, что у нас не один наблюдатель с множеством представлений о том, где он мог увидеть электрон, но

*много миров*, в каждом из которых есть человек, совершенно точно представляющий, где он увидел электрон.

Открою большую тайну: концепция, которую мы описали под названием аскетичной квантовой механики, более известна как эвереттовская, или многомировая, интерпретация квантовой механики, впервые предложенная Хью Эвереттом в 1957 году. Эвереттовская интерпретация возникла из-за фундаментальной неудовлетворенности всеми этими специальными правилами о проведении измерений, которыми обставляется рецепт квантового опыта в стандартном учебнике; эвереттовская интерпретация, напротив, предполагает, что есть всего один вариант квантовой эволюции. Цена, которую приходится заплатить за то, что теоретический формализм сразу становится гораздо стройнее, – это предположение, что данная теория одновременно описывает множество копий известной нам «Вселенной», и каждая из этих копий немного отличается от прочих, но в определенном смысле реальна. По поводу того, стоит ли такой порядок заплаченной цены, у ученых нет единого мнения. (Да, стоит.)

Натолкнувшись на многомировую интерпретацию, мы ни в коем случае не берем обычную квантовую механику и не применяем ее ко всему множеству Вселенных. Потенциально эти Вселенные все время «где-то рядом» – у Вселенной есть волновая функция, которая может запросто описывать суперпозиции всевозможных вещей, в том числе суперпозиции целой Вселенной. Здесь мы всего лишь подчеркнули, что этот потенциал естественным образом актуализируется в ходе обычной квантовой эволюции. Признав, что электрон может быть в суперпозиции, находясь при этом в разных местах, мы заключаем, что и человек может быть в суперпозиции, учитывающей, в каких разных точках он мог увидеть электрон. И в самом деле, вся реальность может находиться в суперпозиции, и каждое слагаемое в этой суперпозиции допустимо трактовать как отдельный «мир». Мы ничего не добавили к квантовой механике, а просто признали то, с чем имели дело все это время.

Можно по праву назвать эвереттовский подход смелой формулировкой квантовой механики. Он воплощает философию, согласно которой следует всерьез воспринимать простейшую версию основополагающей реальности, учитывающую именно то, что мы

видим, даже если такая реальность радикально отличается от нашего обычного опыта. Хватит ли нам смелости принять ее?



После такого краткого введения в многомировую интерпретацию многие вопросы остаются без ответов. В какой именно момент волновая функция распадается на множество миров? Чем один мир отделен от другого? Сколько всего миров? На самом ли деле «реальны» эти другие миры? Как мы вообще узнаем, доступны ли они для наблюдения? (И можем ли узнать?) Как все это объясняет вероятность того, что мы окажемся в одном мире, а не в другом?

На все эти вопросы есть хорошие ответы – или как минимум правдоподобные, – и значительная часть этой книги посвящена им. Но мы должны быть готовы и к тому, что вся эта картина может оказаться неверной и нам потребуется что-то совершенно иное.

В каждой версии квантовой механики фигурируют две вещи: (1) волновая функция и (2) уравнение Шрёдингера, управляющее эволюцией волновых функций во времени. Эвереттовская формулировка в ее целостном виде постулирует, что, *кроме двух этих вещей, больше ничего нет* и что этих ингредиентов достаточно, чтобы составить полное, эмпирически адекватное представление мира. («Эмпирически адекватное» – так вычурно философы выражают мысль «согласуется с экспериментальными данными».) В любом другом подходе к квантовой механике приходится или что-то добавлять к этому голому формализму, или как-то его модифицировать.

Самым поразительным следствием чистой эвереттовской квантовой механики является предполагаемое существование множества миров, поэтому целесообразно называть ее многомировой. Однако суть теории в том, что реальность описывается гладко эволюционирующей волновой функцией – и на этом все. С этой философией связаны дополнительные трудности, особенно когда речь заходит о сопоставлении необычайной простоты формализма с богатым разнообразием мира, который мы наблюдаем. Но она выигрывает в ясности и проницательности. Обратившись к квантовой теории поля и

квантовой гравитации, мы убедимся, что трактовка волновых функций как подлинных первоэлементов, не обремененных каким-либо балластом, оставшимся от нашего классического восприятия, исключительно полезна при попытках подступиться к глубинным проблемам современной физики.

Учитывая необходимость двух этих элементов (волновой функции и уравнения Шрёдингера), существует несколько альтернатив для многомировой интерпретации, которые стоят рассмотрения. Один из таких подходов – это добавление новых физических сущностей поверх волновой функции. Подобный подход приводит нас к моделям со скрытыми переменными, которые с самого начала были на уме у таких людей, как Эйнштейн. В настоящее время наиболее популярный из таких подходов называется теорией де Бройля – Бома или просто механикой Бома. Альтернативный подход – оставить волновую функцию как есть, но предположить изменения в уравнении Шрёдингера, например ввести в него реальные случайные коллапсы. Наконец, можно предположить, что волновая функция – это вообще не физическое явление, а просто способ описания того, что нам известно о реальности. Такие подходы известны под общим названием «эпистемологические модели», и в настоящее время среди них особенно популярен *кьюбизм*, он же – *квантовое байесианство*.

Все эти варианты – в том числе те, что не перечислены выше, – это поистине разные физические теории, а не просто «интерпретации» одной и той же базовой идеи. Существование множества несовместимых теорий, которые все как одна (по крайней мере, пока) выводят нас к наблюдаемым эффектам квантовой механики, – это путаница для любого, кто хотел бы поговорить об истинном смысле квантовой механики. В то время как практикующие ученые и философы пришли к единой трактовке квантового рецепта, нет общего понимания того, какова основополагающая реальность, то есть что именно означает каждый конкретный феномен.

Я отстаиваю конкретную трактовку этой реальности – многомировую интерпретацию квантовой механики, и на протяжении большей части книги я просто буду объяснять вещи в терминах этой интерпретации. Это не означает, что эвереттовская перспектива безусловно правильная. Но я надеюсь, что смогу объяснить суть этой теории и почему с высокой вероятностью разумно полагать, что она –

наилучшее из имеющихся у нас представлений о реальности. Выводы делайте сами.

## Как подобное могло кому-то прийти в голову?

### *Как возникла квантовая механика*

«Иногда я еще до завтрака успевала поверить аж в шесть невозможных вещей», – говорит Белая Королева Алисе в книге «Алиса в Зазеркалье». Подобное умение может оказаться полезным, когда приходится разбираться с квантовой механикой вообще и многомировой интерпретацией в частности. К счастью, те, казалось бы, невозможные вещи, в которые мы должны поверить, – это не причудливые логические конструкции или взрывающие мозг дзеновские коаны; это свойства мира, к признанию которых нас подталкивает опыт. Как бы мы ни сопротивлялись, нас буквально тащат в этом направлении конкретные эксперименты. Мы не выбираем квантовую механику; мы лишь выбираем, признать ее или нет.

Физика стремится выяснить, из чего состоит мир, как его части естественным образом меняются с течением времени и взаимодействуют друг с другом. Я постоянно замечаю множество различных материалов вокруг себя: бумаги и книги на столе, компьютер, чашка с кофе, мусорная корзина, два кота (один из которых крайне заинтересован в содержимом корзины), не говоря уж о более эфемерных материях – воздухе, свете, звуках.

К концу XIX века ученым удалось разложить все подобные вещества до двух основных субстанций: *частиц* и *полей*. Частицы – это точечные объекты, находящиеся в определенном месте в пространстве, а поля (например, гравитационное поле) распределены в пространстве и в каждой точке пространства принимают конкретное значение. Когда поле колеблется в пространстве и времени, в нем возникает волна. Таким образом, когда кто-то противопоставляет частицы и волны, речь на самом деле идет о частицах и полях.

Квантовая механика в конечном итоге унифицировала частицы и поля в единую сущность – волновую функцию. И толчком к этому стали два фактора: изначально физики обнаружили, что те вещи, которые казались им волнами, например электрические и магнитные поля, обладают корпускулярными<sup>[5]</sup> свойствами, а затем выяснилось,

что объекты, считающиеся частицами, например электроны, проявляют свойства, присущие полям. Чтобы решить эту головоломку, необходимо было признать, что на фундаментальном уровне мир подобен полю (речь о квантовой волновой функции), но когда мы смотрим на него, выполняя тщательное измерение, мир проявляет свойства частиц. На это потребовалось определенное время.



Кажется, что частицы — штуки совершенно незамысловатые; частица — это объект, расположенный в конкретной точке пространства.

Эта идея родилась еще во времена Древней Греции, когда члены небольшого философского кружка предположили, что материя состоит из точечных «атомов»; в переводе с греческого это слово означает «неделимый». По словам Демокрита, автора концепции атомизма, «сладкое только считается таким, горькое только считается таким, теплое только считается таким, холодное только считается таким, цвет только считается таким, в действительности же — атомы и пустота»<sup>[6]</sup>.

На тот момент не было серьезных доказательств в пользу такой гипотезы, поэтому она была отвергнута вплоть до начала XIX века, когда ученые приступили к экспериментам по количественному изучению химических реакций. Ключевую роль при этом сыграл оксид олова — соединение, состоящее из атомов олова и кислорода: выяснилось, что оно существует в двух разных формах. Английский ученый Джон Дальтон отметил, что количество олова в двух этих формах не отличается, зато количество кислорода в одной из них ровно вдвое больше, чем в другой. В 1803 году Дальтон дал возможное объяснение происходящему, предположив, что оба элемента состоят из дискретных частиц, которые он назвал древнегреческим словом «атомы». Необходимо было всего лишь представить, что в молекулах одной формы оксида олова один атом олова соединяется с одним атомом кислорода, а в другой форме на каждый атом олова приходится два атома кислорода. Дальтон предположил, что любой химический элемент состоит из атомов уникального сорта, и склонность атомов



образовывать самые разные соединения – это суть всей химии. Обобщение простое, но способное впоследствии перевернуть мир.

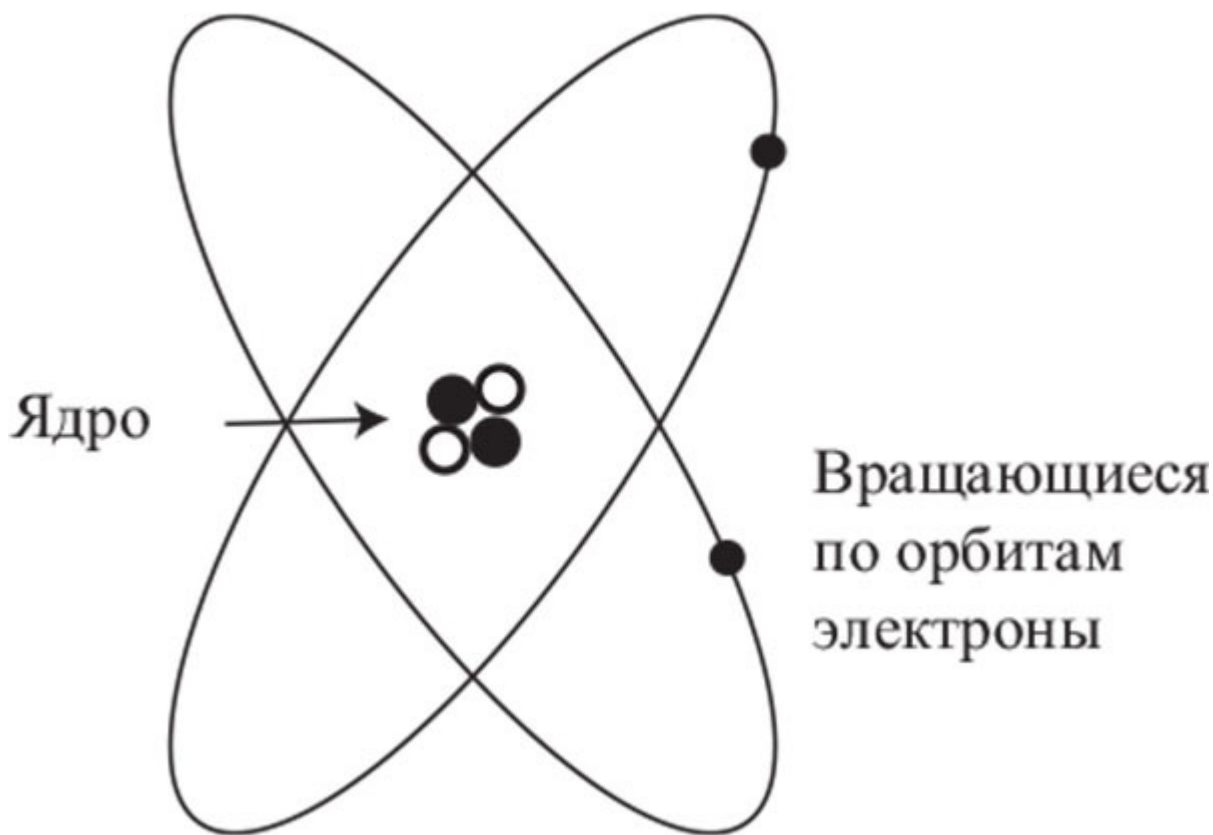
Дальтон немного опережал события с такой номенклатурой. С точки зрения древних греков, суть атомов заключалась в их неделимости, в том, что они были фундаментальными первокирпичиками, из которых состоит все на свете. Но атомы Дальтона совсем не были неделимыми – они состояли из компактного ядра, вокруг которого, как планеты по орбитам, вращались электроны. Правда, чтобы осознать это, потребовалось еще более ста лет. Сначала, в 1897 году, английский физик Дж. Дж. Томсон открыл электрон. Оказалось, что эта частица совершенно нового вида в 1800 раз легче водорода, самого легкого атома, обладающая к тому же электрическим зарядом. В 1909 году Эрнест Резерфорд, бывший студент Томсона – новозеландец, перебравшийся в Англию благодаря своим успехам в учебе, – показал, что масса атома сосредоточена в центре, в ядре, тогда как общий размер атома зависит от диаметра орбит гораздо более легких электронов, вращающихся вокруг этого ядра. Предложенная Резерфордом модель атома известна нам по рисункам, где электроны вращаются вокруг ядра почти как планеты вокруг Солнца в нашей Солнечной системе. (Резерфорд ничего не знал о квантовой механике, так что эта картинка серьезно отличается от реальной структуры атома – в этом мы вскоре убедимся.)

Дальнейшая работа, начатая Резерфордом и подхваченная другими физиками, показала, что сами ядра не являются элементарными частицами, а состоят из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов. Электрические заряды электронов и протонов равны по величине, но противоположны по знаку, поэтому атом, в котором протонов и электронов поровну (а нейтронов может быть сколько угодно) будет электрически нейтрален. Только с наступлением 1960–1970-х физики установили, что протоны и нейтроны, в свою очередь, состоят из более мелких частиц, именуемых кварками, которые удерживаются вместе благодаря глюонам – особым частицам, переносчикам сильного взаимодействия.

Можно сказать, что вся суть химии – в электронах. В ядре содержится основная масса атома, однако само ядро обычно ни в чем не участвует, не считая редких актов радиоактивного распада, реакций деления ядра или термоядерного синтеза. С другой стороны,

электроны, вращающиеся вокруг ядра, – легкие и прыгучие, и именно благодаря тому, что им не сидится на месте, жизнь наша получается такой интересной. Два или более атомов могут делиться электронами, что приводит к образованию химических связей. Если правильно подобрать условия, то электрон может «передумать», в каком атоме ему находиться, – и в таких случаях происходят химические реакции. Электрон может даже вообще вырваться из заточения в атоме, пустившись в свободный полет в окружающей среде, – так возникает явление под названием «электричество». Если же встряхнуть электрон, то он инициирует вибрацию в окружающих электрических и магнитных полях, порождая таким образом свет и другие формы электромагнитного излучения.

### Атом Резерфорда



Чтобы подчеркнуть идею о том, что частица это действительно точечный, а не просто крайне малый объект с ненулевым размером,

проводится различие между «элементарными» частицами, находящимися в конкретных точках пространства, и «составными», которые на самом деле образуются из еще более мелких составляющих. Насколько известно в настоящее время, электроны – это подлинно элементарные частицы. Теперь понятно, почему в дискуссиях о квантовой механике постоянно говорят об электронах и приводят их в качестве примеров: это простейшие фундаментальные частицы, которые можно получить, а затем манипулировать ими, и они же играют центральную роль в поведении всей материи, из которой состоим и мы, и все, что нас окружает.



К огорчению Демокрита и его друзей, физики XIX века объясняли мир в терминах не одних только частиц. Вместо этого они предположили, что нужны две фундаментальные разновидности материи: частицы и поля.

Можно считать, что поля противоположны частицам, как минимум в контексте классической механики. Определяющее свойство частицы заключается в том, что она расположена в конкретной точке пространства и нигде более. Определяющее свойство поля заключается в том, что оно находится повсюду. Поле – это сущность, обладающая некоторым значением практически в любой точке пространства. Частицам нужно как-то взаимодействовать друг с другом, и это происходит благодаря воздействию полей.

Рассмотрим магнитное поле. Оно является *векторным*, то есть в любой точке пространства оно подобно маленькой стрелке с некоторой длиной (которая характеризует напряженность поля: она может быть больше или меньше, или даже точно равна нулю), а также направлением (стрелка направлена вдоль некоторой конкретной оси). Можно измерить, в каком направлении ориентировано магнитное поле – для этого достаточно взять обычный компас и посмотреть, куда указывает его стрелка. (В большинстве мест на Земле она будет указывать примерно на север, если, конечно, поблизости нет другого магнита.) В данном случае важнее всего то, что магнитное поле

незримо пронизывает все пространство, даже когда мы его не наблюдаем. То же касается и всех прочих полей.

Еще существует электрическое поле, также являющееся векторным и обладающее величиной и направлением в любой точке пространства. Если магнитное поле можно зафиксировать с помощью компаса, то, чтобы обнаружить электрическое поле, нужно взять электрон в состоянии покоя и посмотреть, будет ли он ускоряться. Чем больше будет его ускорение, тем сильнее электрическое поле<sup>[7]</sup>. Одним из триумфов физики XIX века стало объединение электричества и магнетизма в рамках единой теории, сформулированной Джеймсом Клерком Максвеллом. Он показал, что электрические и магнитные поля – это различные проявления единого электромагнитного поля.

Гравитационное поле – это еще один хорошо известный в XIX веке вид. Как учит нас Исаак Ньютон, гравитация действует даже на астрономических расстояниях. Планеты Солнечной системы испытывают гравитационное притяжение со стороны Солнца. Эта сила прямо пропорциональна массе Солнца и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. В 1783 году Пьер-Симон Лаплас показал, что ньютоновскую гравитацию можно описать как действие потенциального гравитационного поля, которое имеет определенное значение в каждой точке пространства (так же как электрические и магнитные поля).



К концу XIX века перед физиками появились четкие очертания теории, полностью описывавшей мир. Материя сделана из атомов, которые состоят из более мелких частиц; эти частицы взаимодействуют благодаря различным силам, передающимся через поля, и все это происходит по законам классической механики.

### **Из чего состоит мир (версия XIX века)**

- Частицы (точечные, из них состоит материя).

- Поля (пронизывающие пространство, порождающие взаимодействия).

В течение XX века были обнаружены новые частицы и поля, но в 1899 году были все основания полагать, что базовая картина мира уже предельно понятна. Прямо за углом таилась квантовая революция, но о ней еще никто не подозревал.

Если вы уже что-то читали о квантовой механике, то, возможно, задавались вопросом: «Электрон – это частица или волна?» Ответ таков: «Это волна, но когда мы смотрим на нее (то есть измеряем эту волну), она выглядит как частица». В этом заключается фундаментальная новизна квантовой механики. Существует всего одна сущность – квантовая волновая функция, но когда мы наблюдаем ее в определенных условиях, она кажется нам частицей.

### **Из чего состоит мир (версия XX века и далее)**

- Квантовая волновая функция.

Чтобы перейти от картины мира в представлении конца XIX века (классические частицы и классические поля) к синтезу, полученному в XX веке (единая квантовая волновая функция), необходимо было совершить несколько концептуальных прорывов. История о том, как частицы и поля оказались разными аспектами одной и той же базовой сущности, – одно из самых недооцененных свершений на пути к унификации физики.

Чтобы прийти к этому, ученые начала XX века должны были осознать две вещи: поля (например, электромагнитное) могут проявлять свойства частиц, а частицы (например, электроны) могут иметь волновые свойства.

Сначала было замечено, что поля могут проявлять свойства частиц. Любая частица, обладающая электрическим зарядом, например электрон, повсюду вокруг себя создает электрическое поле. Напряженность поля постепенно снижается по мере удаления от заряда. Если встряхнуть электрон, например в направлении вверх-вниз, то поле будет колебаться вместе с ним, образуя своеобразную

рябь, которая будет постепенно распространяться во все стороны. Это и есть электромагнитное излучение – «свет», если коротко. Всякий раз, нагрев вещество до нужной температуры, мы устраиваем в его атомах встряску электронам, и вещество начинает светиться. Такое явление называется излучением абсолютно черного тела, и любой объект, равномерно нагретый до определенной температуры, «испускает» ее в форме излучения абсолютно черного тела.

Красный свет соответствует медленно колеблющимся низкочастотным волнам, а синий – стремительно колеблющимся высокочастотным. Учитывая, что было известно физикам об атомах и электронах на рубеже XIX–XX веков, можно было вычислить, сколько излучения должно выдавать абсолютно черное тело на любой конкретной частоте – в так называемом спектре абсолютно черного тела. Расчеты физиков хорошо подтверждались на низких частотах, но становились все менее точными по мере перехода к более высоким; в конечном итоге прогнозы давали бесконечное количество излучения, которое должно испускать любое материальное тело. Позже такой феномен окрестили ультрафиолетовой катастрофой, имея в виду невидимые частоты электромагнитного излучения, даже более высокие, чем у синего и фиолетового света.

Наконец, в 1900 году немецкому физiku Максy Планку удалось вывести формулу, которая точно согласовывалась с данными. Здесь важно отметить, какой прием помог Планку: он выдвинул радикальную идею, предположив, что при излучении свет всегда поступает в виде небольших порций – «квантов» энергии, величина которых определяется частотой света. Чем быстрее колеблется электромагнитное поле, тем больше энергии будет у каждого излученного кванта.

Во время работы над этой теорией Планку пришлось постулировать существование новой фундаментальной естественной константы, которая теперь известна под названием «постоянная Планка» и обозначается буквой  $h$ . Количество энергии, содержащейся в кванте света, пропорционально его частоте, и постоянная Планка задает эту пропорциональность: энергия равна частоте, умноженной на  $h$ . Зачастую более удобно использовать усовершенствованную разновидность этой константы,  $\hbar$ , которая называется «приведенная постоянная Планка», – это попросту исходная постоянная Планка  $h$ ,

деленная на  $2\pi$ . Если в выражении фигурирует постоянная Планка – это верный признак, что в нем задействована квантовая механика.

Открыв свою постоянную, Планк подсказал новый способ понимания таких физических величин, как энергия, масса, длина или время. Например, существуют единицы для измерения энергии – эрги, джоули или киловатт-часы, а частота измеряется в единицах  $1/\text{время}$ , поскольку сообщает, сколько раз происходит то или иное событие за единицу времени. Соответственно, чтобы энергия получилась пропорциональной времени, постоянная Планка выражается в единицах, равных произведению энергии на время. Сам Планк осознал, что эту новую величину можно комбинировать с другими фундаментальными константами –  $G$  (ньютоновской гравитационной постоянной) и  $c$  – скоростью света, получая, таким образом, универсально определяемые единицы длины, времени и так далее. Планковская длина равна приблизительно  $10^{-33}$  сантиметрам, а планковское время – приблизительно  $10^{-43}$  секундам. Планковская длина – действительно очень короткое расстояние, но, предположительно, она приобретает физическую важность в тех масштабах, где одновременно действуют квантовая механика ( $\hbar$ ), гравитация ( $G$ ) и специальная теория относительности ( $c$ ).

Забавно, что Планк сразу же усмотрел в этом открытии потенциал для контакта с внеземными цивилизациями. Если мы когда-нибудь начнем общаться с инопланетянами с помощью межзвездных радиосигналов, то они не поймут, что мы имеем в виду, если скажем, что рост человека – около 2 метров. Но если инопланетяне ориентируются в физике не хуже нас с вами, то они должны знать планковские единицы. Данное предположение пока не довелось опробовать на практике, но в остальном постоянная Планка оказала на науку неизмеримое влияние.

Если задуматься, то идея о том, что свет излучается дискретными квантами, энергия которых зависит от их частоты, озадачивает. Учитывая, что мы знаем о свете, логичнее было бы предположить, что энергия света зависит от его *яркости*, а не от *цвета*. Но благодаря своей идее Планк вывел верную формулу, поэтому в каком-то отношении эта идея точно работала.

Альберту Эйнштейну оставалось лишь в присущей ему манере отбросить устоявшиеся взгляды и совершить драматический переход к

новой парадигме мышления. В 1905 году Эйнштейн предположил, что свет излучается только с конкретными значениями энергии, так как в буквальном смысле состоит из дискретных «порций», а не является непрерывной волной. Свет состоит из частиц, иными словами фотонов, как мы называем их сегодня. Именно эта идея – что свет распространяется дискретными частицеподобными квантами энергии – ознаменовала истинное рождение квантовой механики, и именно за это открытие Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии в 1921 году. (Он заслужил еще как минимум одну Нобелевскую премию – за предложенную им теорию относительности, но так ее и не получил.) Эйнштейн был умен и понимал, что квантовая механика – это серьезно; как он сказал своему другу Конраду Хабихту, гипотеза о квантах света была «очень революционной».

Обратите внимание на тонкую разницу между предположениями Планка и Эйнштейна. Планк считал, что свет с фиксированной частотой *излучается* порциями с определенной энергией, тогда как Эйнштейн полагал, что так происходит именно потому, что свет – это и *есть* дискретные частицы. Есть разница в двух следующих утверждениях: 1) сказать, что эта кофемашина готовит ровно одну чашечку кофе за прогон, и 2) сказать, что весь кофе существует только в виде одночашечных порций. Это может иметь смысл, если мы рассуждаем о частицах материи, например об электронах и протонах, но всего несколькими десятилетиями ранее Максвелл триумфально объяснил, что свет – это волна, а не частица. Утверждение Эйнштейна грозило свести этот триумф на нет. Сам Планк не хотел принимать эту безумную идею, но она объясняла полученные экспериментальные данные. А это все-таки серьезное преимущество для безумной идеи, ищущей признания.

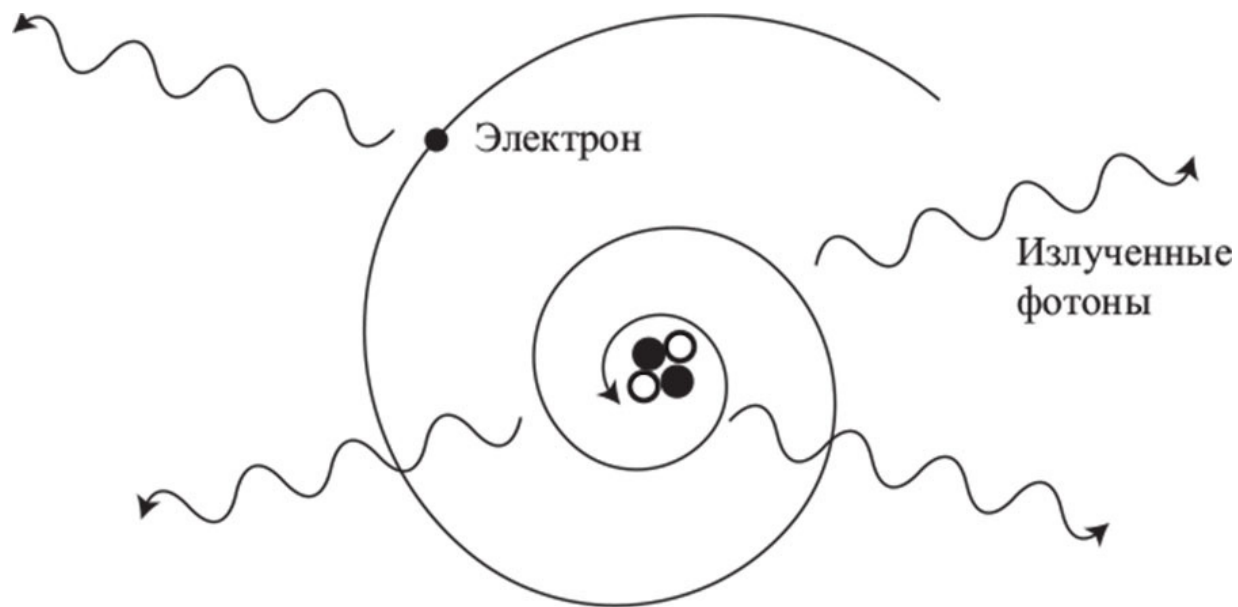


Тем временем в «частичном» отделе всей этой бухгалтерии появилась новая проблема, связанная с устройством атома в модели Резерфорда, а именно: атом состоит из электронов, вращающихся вокруг ядра, расположенного в его центре.



Как вы помните, если встряхнуть электрон, он излучает свет. Под «встряхнуть» мы в данном случае имеем в виду «ускорить каким-либо образом». Электрон должен излучать свет, если с ним происходит что-то, кроме движения по прямой с постоянной скоростью.

Исходя из Резерфордовского представления об атоме, где электроны вращаются вокруг ядра, очевидно, что траектории этих электронов – не прямые линии. Электроны должны двигаться по окружностям или эллипсам. В классическом мире это безусловно означает, что электроны движутся с ускорением и, что не менее очевидно, при этом они должны испускать свет. Каждый атом в вашем теле и все атомы в окружающем мире должны светиться, если классическая механика не врет. Таким образом, электроны должны терять энергию, отдаваемую в виде излучения, и по спирали сваливаться на ядро. В классической физике орбита электрона не может быть стабильной.



### Нестабильность классического атома Резерфорда

Возможно, все ваши атомы действительно излучают свет, просто не такой яркий, чтобы его можно было увидеть. В конце концов, ровно такая же логика применима к планетам Солнечной системы. Они должны испускать гравитационные волны – ускоряющийся массивный объект должен создавать рябь в гравитационном поле, по аналогии с

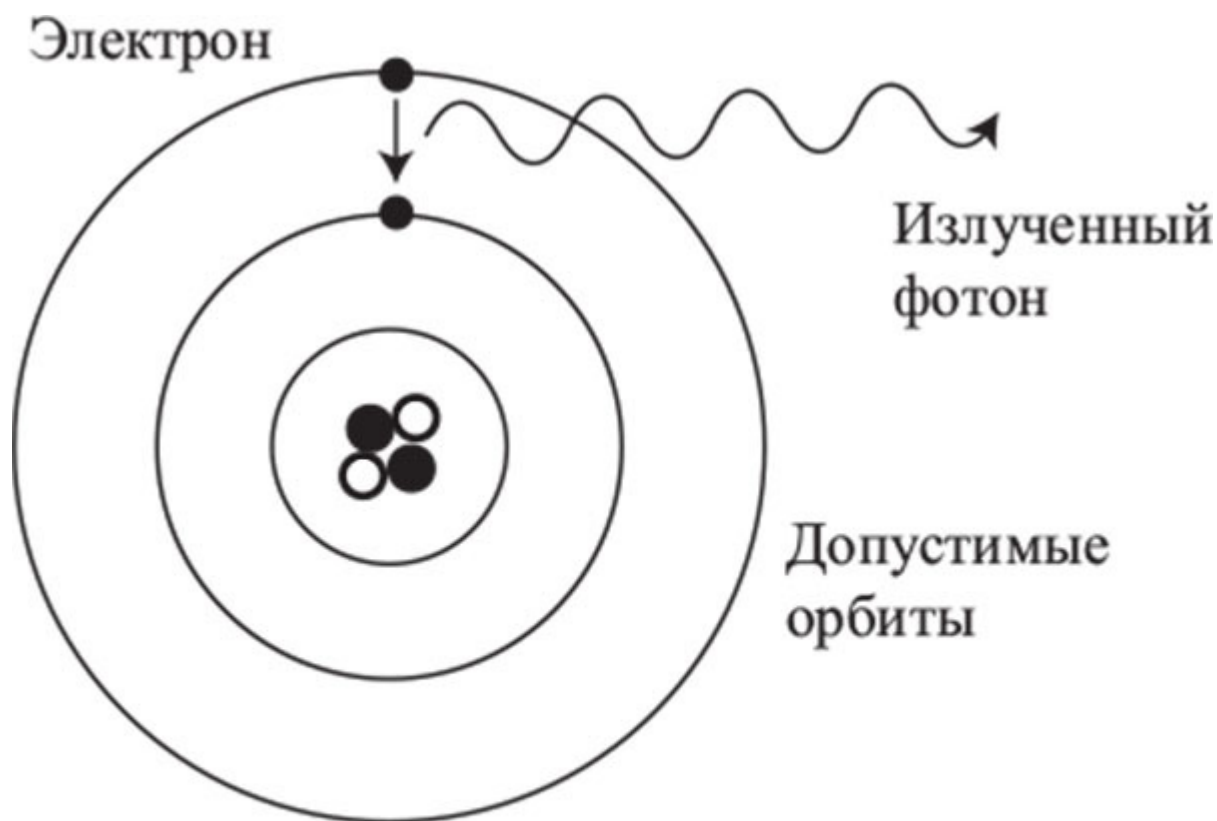
тем как ускоряющийся заряд порождает колебания в электромагнитном поле. Так оно и есть. Если в этом и были какие-то сомнения, то их не осталось в 2016 году, когда исследователи, работающие в обсерваториях *LIGO* и *Virgo*, объявили, что гравитационные волны удалось зафиксировать<sup>[8]</sup> – они образовались от столкновения двух сближавшихся по спирали черных дыр в миллиарде световых лет от нас.

Однако планеты Солнечной системы гораздо легче черных дыр и движутся медленнее, тогда как каждая из тех двух черных дыр была примерно в тридцать раз тяжелее Солнца. Поэтому гравитационные волны, испускаемые соседствующими с нами планетами, действительно очень слабые. Мощность, генерируемая в виде гравитационных волн при вращении Земли, составляет около 200 Ватт, что равно потреблению энергии нескольких лампочек и абсолютно несущественно по сравнению с другими воздействиями, например с солнечной радиацией и приливными силами. Если бы излучение гравитационных волн было единственной силой, влияющей на орбиту Земли, то потребовалось бы более  $10^{23}$  лет, чтобы она врезалась в Солнце. Так что, возможно, то же самое верно и для атомов: может быть, орбиты электронов не совсем стабильны, но их стабильность достаточна.

Это количественный вопрос, поэтому в уравнения классической электродинамики легко подставить конкретные числа и посмотреть, что получится. Ответ получается катастрофическим, потому как электроны должны двигаться гораздо быстрее планет, а электромагнетизм оказывается сильнее гравитации. Количество времени, которое потребовалось бы электрону, чтобы врезаться в ядро атома, получается равным примерно десяти пикосекундам. Это одна стомиллиардная доля секунды. Если бы обычная материя, состоящая из атомов, была столь недолговечна, кто-нибудь уже наверняка обратил бы на это внимание.

Эта проблема обеспокоила многих людей. Среди них особого упоминания заслуживает Нильс Бор, который в 1912 году какое-то время работал под руководством Резерфорда. В 1913 году Бор опубликовал серию из трех статей, позже названных просто «трилогия»: в них выдвинул одну из тех отважных, «взятых с потолка» идей, характерных для первых лет развития квантовой теории. Он

задал вопрос: что, если электроны не могут по спирали упасть на атомное ядро, так как не имеют возможности находиться на любой «желаемой» орбите, а вместо этого закреплены на конкретных, вполне определенных орбитах? В атоме будет одна орбита с минимальным уровнем энергии, следующая – с чуть более высоким уровнем энергии, и так далее. Но электроны не могут подойти к ядру ближе, чем спустившись на самую нижнюю орбиту, и между орбитами они также находиться не могут. Оказалось, что допустимые орбиты квантуются.



**В атоме Бора электроны могут перепрыгивать только с одной допустимой орбиты на другую**

Предположение Бора было не столь экзотическим, каким может показаться на первый взгляд. Физики изучали, как свет взаимодействует с различными газообразными элементами – водородом, азотом, кислородом и так далее. Они обнаружили, что свет,

пропущенный через холодный газ, частично поглощается; аналогично, если пропустить электрический ток через трубку с газом, то газ начинает светиться (именно этот принцип лежит в основе работы флуоресцентных ламп, используемых по сей день). Но газы поглощали и излучали свет лишь с определенными частотами, свободно пропуская лучи других цветов. В частности, водород, простейший элемент, в атоме которого всего один протон и один электрон, демонстрировал очень упорядоченную картину частот излучения и поглощения.

В классическом атоме Резерфорда подобное было бы nonsensом. Но в модели Бора, где электроны могут двигаться лишь по определенным орбитам, такому феномену сразу же нашлось объяснение. Хотя электроны и не могут зависать между разрешенными орбитами, они могут *перепрыгивать* с одной орбиты на другую. Электрон может упасть с высокоэнергетической орбиты на орбиту с меньшей энергией, испустив свет, обладающий энергией, равной разности энергий этих орбит, либо может перепрыгнуть на более высокоэнергетическую орбиту, поглотив необходимое количество энергии из падающего на него света. Поскольку сами орбиты оказались квантованными, то есть дискретными, мы должны наблюдать взаимодействие электронов и тех квантов света, которые обладают строго определенными энергиями. Вместе с идеей Планка о том, что частота света связана с его энергией, это позволяло объяснить, почему наблюдается излучение и поглощение света лишь определенных частот.

Сравнив свои прогнозы с эмиссией света, наблюдаемой в атоме водорода, Бор смог не просто постулировать, что для электронов допустимы лишь определенные орбиты, но и вычислить, что это за орбиты. Любой вращающейся частице свойственна величина под названием *момент импульса*, которую легко рассчитать: момент импульса равен произведению массы частицы, ее скорости и расстояния от центра до орбиты. Бор предположил, что орбита, которую может занимать электрон, должна обладать моментом импульса, кратным конкретной фундаментальной константе. А когда он сравнил ту энергию, которую электроны должны излучать при прыжке с орбиты на орбиту, с наблюдаемыми свойствами света, излучаемого атомом водорода, он понял, какая постоянная нужна для

согласования данных. Это была постоянная Планка,  $h$ . Точнее ее модифицированная версия – приведенная постоянная Планка,  $\hbar = h/2\pi$ .

Когда сталкиваешься с чем-то подобным, сразу появляется ощущение, что ты на верном пути. Бор пытался учесть поведение электронов в атоме и постулировал импровизированное правило, согласно которому они могут двигаться лишь по определенным квантованным орбитам. Чтобы это правило стало согласовываться с экспериментальными данными, к нему пришлось добавить новую естественную константу – и она оказалась равна той, которую был вынужден изобрести Планк, пытаясь объяснить поведение фотонов. Вся эта конструкция могла показаться шаткой и довольно небрежной, но вместе эти находки наводили на мысль, что в мире атомов и частиц происходит кое-что действительно важное, не желающее вписываться в священные правила классической механики. Сегодня идеи того периода иногда описываются в категориях «старой квантовой теории», которая противопоставляется «новой квантовой теории», сформулированной Шрёдингером и Гейзенбергом в конце 1920-х.



Какой бы провокационной и относительно успешной ни была старая квантовая теория, полностью она никого не устраивала. Идея Планка и Эйнштейна о квантах света помогла сориентироваться в некоторых экспериментальных данных, однако ее сложно было примирить с невероятно успешной теорией Максвелла, в рамках которой свет считался электромагнитной волной. Идея Бора о квантованных стационарных орбитах электронов помогла осмыслить принципы поглощения и излучения света атомами водорода, но казалась взятой с потолка, причем, в сущности, не работала с иными элементами, кроме водорода. Еще до того, как «старая квантовая теория» получила такое название, казалось очевидным, что она лишь намекает на нечто гораздо более глубокое.

Одним из наименее удовлетворительных аспектов модели Бора было предположение, будто электрон может «прыгать» с одной орбиты на другую. Если низкоэнергетический электрон поглощает свет, обладающий определенным количеством энергии, то логично

предположить, что он перепрыгнет на другую орбиту, только если получит ровно столько энергии, сколько для этого требуется. Но когда электрон с высокоэнергетической орбиты испустил свет, чтобы прыгнуть вниз, у него, казалось бы, должны быть варианты, на какой из нижележащих орбит очутиться. От чего зависит этот выбор? Резерфорд сам беспокоился по этому поводу и писал Бору следующее:

В связи с Вашей гипотезой я обнаружил серьезное затруднение, в котором Вы, без сомнения, полностью отдаете себе отчет; оно состоит в следующем: как решает электрон, с какой частотой он должен колебаться при переходе из одного стационарного состояния в другое? Мне кажется, Вы вынуждены будете предположить, что электрон знает заблаговременно, где он собирается остановиться.

Эта обеспокоенность электронами, «решающими», куда им податься, предвосхитила другой разрыв с парадигмой классической физики – куда более радикальный, чем могли представить ученые в 1913 году. В ньютоновской механике можно представить себе демона Лапласа, который теоретически может спрогнозировать всю дальнейшую историю мира исходя из его текущего состояния. На том этапе развития квантовой механики, о котором мы сейчас говорим, никто не мог даже помыслить, что эта модель будет полностью упразднена.

Потребовалось более десяти лет, чтобы наконец-то оформилась более полная система, «новая квантовая теория». На самом деле в то время выдвигались две конкурирующие идеи – матричная механика и волновая механика, – пока не было доказано, что с математической точки зрения это два эквивалентных представления одной и той же науки, которая сегодня называется просто «квантовая механика».

Изначально матричную механику сформулировал Вернер Гейзенберг, работавший вместе с Нильсом Бором в Копенгагене. Двое этих ученых, а также сотрудничавший с ними Вольфганг Паули дали миру копенгагенскую интерпретацию квантовой механики, однако вопросы о том, кто из них какого мнения придерживался, – предмет продолжающихся исторических и философских споров.

Предложенный Гейзенбергом в 1926 году подход демонстрирует смелость нового поколения ученых. Он заключался в следующем: отложить в сторону вопросы о том, что именно происходит в квантовой системе, и целиком сосредоточиться на объяснении того, что наблюдают экспериментаторы. Бор постулировал существование квантованных стационарных орбит электронов, не объясняя, почему одни орбиты допустимы, а другие – нет. Гейзенберг вообще избавился от орбит. Забудьте о том, что творится с электроном: нас интересует лишь то, какие его свойства мы можем наблюдать. В классической механике электрон характеризовался бы координатой и импульсом.

Гейзенберг сохранил эти термины, но не стал трактовать их как объективные свойства, существующие независимо от того, смотрим мы на электрон или нет, а решил считать их возможными результатами измерений. С точки зрения Гейзенберга, непредсказуемые скачки электрона, волновавшие Резерфорда и других, стали центральным феноменом, лучше всего иллюстрирующим природу квантового мира.

Гейзенбергу было всего двадцать четыре года, когда он представил первую формулировку матричной механики. Он, несомненно, был юным гением, но далеко не маститым представителем этой дисциплины и даже постоянный академический пост получил лишь годом позже. В письме к Максу Борну, еще одному своему наставнику, Гейзенберг сетовал, что «написал безумную статью и не решается подать ее для публикации». Однако совместно с Борном и Паскуалем Йорданом, тогда еще совсем молодым физиком, они смогли изложить матричную механику на базе четких и математически разумных оснований.

Было бы логично, если бы Гейзенберг, Борн и Йордан совместно получили Нобелевскую премию за разработку матричной механики – и действительно, Эйнштейн выдвинул на эту награду всех троих. Но в 1932 году Нобелевский комитет присудил премию единолично именно Гейзенбергу. Говорили, что включить Йордана в число лауреатов было проблематично, так как он прославился своей агрессивной ультраправой риторикой и в конечном итоге вступил в нацистскую партию, присоединившись к штурмовикам. Однако собратья-нацисты считали его ненадежным элементом, поскольку Йордан поддерживал Эйнштейна и других ученых-евреев. В итоге Йордан так и не получил Нобелевской премии. Борн также остался не у дел, но это упущение

было исправлено в 1954 году, когда он был удостоен Нобелевской премии за статистическую интерпретацию волновой функции (правило Борна). Это был последний случай присуждения Нобелевской премии за работу над основами квантовой механики.

Когда началась Вторая мировая война, Гейзенберг возглавил немецкую государственную программу по разработке ядерного оружия. Как Гейзенберг на самом деле относился к нацистам и действительно ли прилагал все возможные усилия к созданию этих вооружений — предмет некоторых исторических споров. Представляется, что Гейзенберг, как и многие другие немцы, был не в восторге от нацистской партии, но предпочитал победу Германии советской оккупации. Нет доказательств того, чтобы Гейзенберг активно саботировал разработку ядерной программы, но очевидно, что успехи его команды оказались весьма скромными. Отчасти такой итог можно объяснить тем, что очень многие блестящие физики еврейского происхождения бежали из Германии, когда к власти в стране пришли нацисты.



Какой бы впечатляющей ни была матричная механика, у нее был серьезнейший «маркетинговый» изъян: ее математический аппарат был исключительно абстрактным и сложным для понимания. Эйнштейн отреагировал на эту теорию в характерном для него стиле:

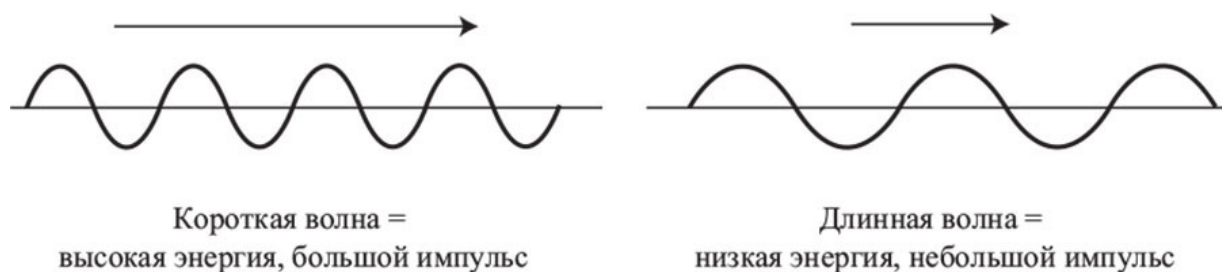
«Настоящее колдовское исчисление. Довольно остроумно и к тому же защищено от опровержения собственной сложностью». И это слова человека, предложившего описывать пространство-время в терминах неевклидовой геометрии. Волновая механика, разработанная Эрвином Шрёдингером вскоре после этого, оказалась другой формулировкой квантовой теории и оперировала концепциями, с которыми физики были уже знакомы. Это значительно ускорило темпы восприятия новой парадигмы.

К тому времени физики уже давно изучали волны, а когда Максвелл описал электромагнетизм на основе теории поля, они уже поднаторели в этом направлении. Самые ранние размышления о квантовой механике, высказанные Планком и Эйнштейном, были далеки от волн



и уводили к частицам. Но модель атома Бора подсказывала, что и частицы не то, чем кажутся.

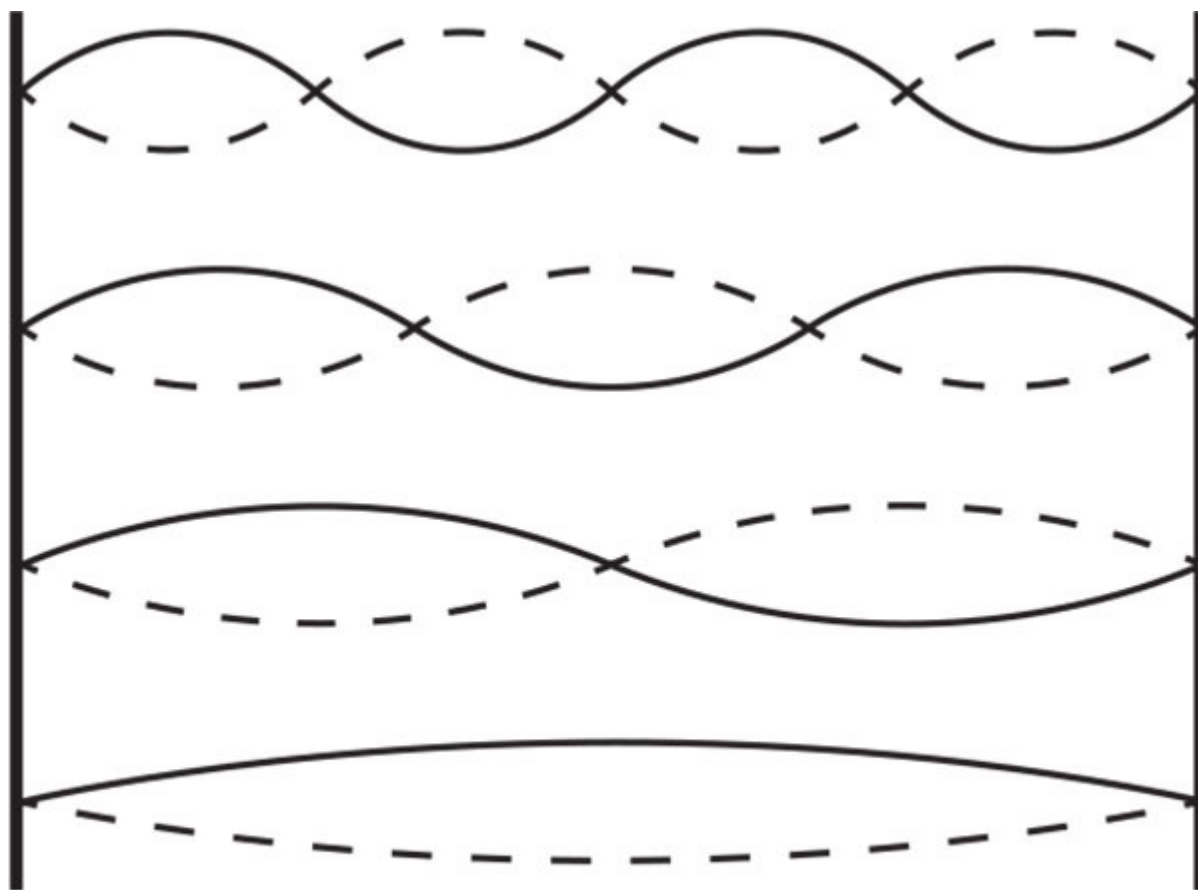
В 1924 году молодой французский физик Луи де Бройль размышлял об эйнштейновских квантах света. На тот момент соотношение между фотонами и классическими электромагнитными волнами все еще оставалось неясным. Напрашивалось предположение, что в состав света входят как частицы, так и волны: частицеподобные фотоны могли переноситься хорошо известными электромагнитными волнами. Причем, если так и было, то ничто не мешало предположить, что в подобном процессе участвуют и электроны: может быть, существует некая волноподобная материя, переносящая и их тоже. Именно эту гипотезу и выдвинул в 1924 году де Бройль в своей докторской диссертации, предложив отношение между импульсом и длиной этих «материальных волн», аналогичное планковской формуле света, где большие по величине импульсы соответствовали более коротким волнам.



Как и многие предположения того времени, гипотеза де Бройля могла показаться несколько случайной, но у нее были далеко идущие следствия. В частности, логично было спросить, какое влияние могут оказывать материальные волны на электроны, вращающиеся вокруг ядра. Напрашивался замечательный ответ: чтобы волна закрепилась в стационарной конфигурации, ее длина должна быть в точности кратна длине окружности соответствующей орбиты. Таким образом, можно было вывести квантованные орбиты Бора, а не просто заявлять о их существовании: для этого было достаточно ассоциировать волны с электронами, окружающими ядро.

Представьте себе натянутую струну с закрепленными концами, например гитарную или скрипичную. Хотя она подвижна в любой

точке и может колебаться вверх и вниз, общая динамика струны ограничена, так как она закреплена с обоих концов. В результате при вибрации струна создает волны лишь с конкретными длинами либо их комбинациями: вот почему струнные инструменты издают чистые музыкальные звуки, а не беспорядочный шум. Эти особые колебания называются *модами* струны. По сути, «квантовая» природа субатомного мира в этой картине возникает не потому, что реальность на самом деле разделена на дискретные части, а потому, что существуют естественные колебательные моды для волн, из которых состоят физические системы.



Допустимые длины волн (моды)  
струны, концы которой закреплены

Слово «квант», означающее некоторое определенное количество чего бы то ни было, может создать впечатление, что квантовая механика описывает мир дискретным и мозаичным, как экран телевизора или компьютерный монитор, если посмотреть на него вплотную. На самом деле все наоборот: квантовая механика описывает мир как гладкую волновую функцию. Однако в подходящих условиях, когда отдельные части волновой функции имеют четкую «привязку», волна выглядит как комбинация отдельных колебательных мод. Когда мы наблюдаем такую систему, то видим те самые дискретные возможности. Это верно и для орбит электронов, и это же объясняет, почему квантовые поля выглядят как наборы отдельных частиц. В квантовой механике мир принципиально волнообразен; его явная квантовая дискретность обусловлена тем, как именно способны вибрировать эти волны.

Идеи де Бройля были интригующими, однако совершенно не тянули на полноценную теорию. Сформулировал такую теорию Эрвин Шрёдингер, в 1926 году выдвинувший динамическую трактовку волновых функций: в частности, он сформулировал описывающее их уравнение, позже названное в его честь. Революции в физике, в том числе и в квантовой механике, как правило, дело молодых, но Шрёдингер явно стал исключением. Тон дискуссиям на Сольвеевском конгрессе 1927 года задавали Эйнштейн (сорок два года) и Бор (сорок четыре) – они казались величественными старцами. Гейзенбергу, как и Дираку, было двадцать пять, Паули – двадцать семь. На Шрёдингера в его зрелом возрасте тридцати восьми лет смотрели как на человека не первой молодости, который едва ли способен выдвинуть радикальную идею, подобную этой.

Обратите внимание на переход от де бройлевских «материальных волн» к шрёдингеровской «волновой функции». Хотя работы де Бройля сильно повлияли на Шрёдингера, его концепция оказалась гораздо более проработанной и заслуживает отдельного упоминания. Очевидно, что величина волны материи в любой точке выражалась некоторым вещественным числом, в то время как амплитуды, описываемые волновыми функциями, являются комплексными числами – суммой действительного и мнимого чисел.

Что еще более важно, первоначальная идея состояла в том, что каждый вид частиц будет ассоциирован с некоторой материальной

волной. Но шрёдингеровская волновая функция устроена иначе: в его трактовке существует всего одна функция, описывающая все частицы во Вселенной. Столь простой переход привел науку к революционному понятию о квантовой запутанности.



Идеям Шрёдингера сильно добавило очков уравнение, описывающее изменение волновых функций с течением времени. Хорошее уравнение – все, что нужно физике. Из красивой идеи («у частиц есть волновые свойства») оно делает строгий, бескомпромиссный инструмент. Для человека «бескомпромиссный» – не самое лучшее качество, но для научной теории – то, что нужно. Это характеристика, обеспечивающая точные прогнозы. Когда мы говорим, что в учебниках по квантовой механике много времени уделяется решению уравнений, мы в основном имеем в виду уравнение Шрёдингера.

Именно уравнение Шрёдингера решала бы квантовая версия демона Лапласа, предсказывая будущее Вселенной. И хотя исходная форма уравнения предназначалась для работы с системами, состоящими из единичных частиц, на практике оно отражает гораздо более общую идею, в равной степени применимую к спинам, полям, суперструнам или любой другой системе, которую вы можете описать с помощью квантовой механики.

В отличие от матричной механики, пользующейся языком математических концепций, с которыми не имели дел большинство физиков того времени, уравнение Шрёдингера не слишком отличалось от уравнений Максвелла, описывавших электромагнетизм и по сей день красующихся на поношенных футболках студентов физфака. Волновую функцию можно визуализировать – как минимум убедить себя в том, что вам это удалось. Физическое сообщество не вполне понимало, что делать с Гейзенбергом, но к приходу Шрёдингера физики были готовы. Копенгагенская компания – в особенности юнцы Гейзенберг и Паули – не слишком тепло восприняла конкурирующие идеи, выдвинутые непримечательным стариканом из Цюриха. Но

прошло совсем немного времени, и они стали мыслить в категориях волновых функций, как и все прочие.

В уравнении Шрёдингера присутствуют незнакомые символы, но понять его основной посыл несложно. Де Бройль предположил, что импульс волны увеличивается по мере того, как уменьшается ее длина. Шрёдингер предложил схожую вещь, но для энергии и времени: скорость изменения волновой функции пропорциональна имеющемуся у нее количеству энергии. Вот его знаменитое уравнение в самой общей форме:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} H \Psi$$

Не будем углубляться в детали, но интересно посмотреть, как физики обращаются с подобными уравнениями. Здесь не обошлось без математики, однако в конечном итоге это всего лишь символическое выражение той идеи, которую мы уже изложили словами.

$\Psi$  (греческая буква «пси») – это волновая функция. В левой части уравнения указана скорость, с которой волновая функция изменяется во времени. В правой части – константа пропорциональности, в которой учтена, в частности, приведенная постоянная Планка  $\hbar$ , фундаментальная константа квантовой механики, а также  $i$  – квадратный корень из  $-1$ . На волновую функцию  $\Psi$  воздействует так называемый *гамильтониан*, или  $H$ . Гамильтониан можно сравнить с инквизитором, который спрашивает: «Сколько у тебя энергии?» Эту концепцию в 1833 году изобрел ирландский математик Уильям Роуэн Гамильтон, пытаясь переформулировать законы движения классической системы задолго до того, как гамильтониан стал играть центральную роль в квантовой механике.

Когда ученые начинают моделировать различные физические системы, первым делом они пытаются вывести математическое выражение для гамильтониана данной системы. Стандартный способ вывода гамильтониана примерно таков: суммируем энергии всех частиц по отдельности, а затем плюсуем сюда дополнительные члены,

описывающие то, как частицы взаимодействуют друг с другом. Может быть, они отталкиваются друг от друга как бильярдные шары или оказывают друг на друга взаимное гравитационное воздействие. Для любого подобного взаимодействия существует свой особый гамильтониан. А зная гамильтониан, вы знаете и все остальное: это компактный способ выражения всей динамики физической системы.

Если квантовая волновая функция описывает систему с некоторым заданным значением энергии, гамильтониан просто равен этому значению, и тогда, следуя логике уравнения Шрёдингера, система продолжает делать одно и то же, поддерживая энергию на одном уровне. Но чаще, поскольку волновые функции описывают суперпозиции различных возможностей, система представляет собой комбинацию множества энергий. В данном случае гамильтониан захватывает по чуть-чуть от каждой из них. Из этого следует, что в правой части уравнения Шрёдингера содержится информация о том, сколько энергии несет каждая из составляющих волновой функции в квантовой суперпозиции: высокоэнергетические компоненты эволюционируют быстрее, низкоэнергетические – медленнее.

В данном случае действительно важен сам факт, что существует уравнение, четко определяющее динамику системы. Когда оно у нас есть, весь мир превращается в игровую площадку.



Волновая механика сильно всколыхнула науку, и в скором времени Шрёдингер, английский физик Поль Дирак и другие ученые продемонстрировали, что она, в сущности, эквивалентна матричной механике, подарив нам единую теорию квантового мира. Но почивать на лаврах было рано. Физики остались один на один с вопросом, над разрешением которого мы бьемся по сей день: что *такое* волновая функция на самом деле? Какой физический феномен она описывает, если вообще описывает?

С точки зрения де Бройля, его волны материи были нужны, чтобы направлять движение частиц, а не заменить их вообще. (Позже он развил эту идею, предложив теорию волны-пилота, которая и сегодня остается жизнеспособным подходом к объяснению основ квантовой

механики, хотя и не популярна среди практикующих физиков.) Напротив, Шрёдингер стремился полностью избавиться от фундаментальных частиц. Изначально он надеялся, что его уравнение будет описывать локализованные пучки вибраций, каждый из которых локализован в относительно небольшой области пространства и поэтому кажется частицеподобным макроскопическому наблюдателю. Тогда можно было бы считать, что волновая функция представляет распределение массы в пространстве.

Увы, стремления Шрёдингера были сведены на нет его же собственным уравнением. Если взять волновую функцию, описывающую единственную частицу, приблизительно локализованную в некоторой области пустого пространства, то уравнение Шрёдингера ясно показывает, что будет с этой частицей дальше: она быстро распространится повсюду. Предоставленные сами себе волновые функции Шрёдингера совсем не похожи на частицы<sup>[9]</sup>.

Недостающее звено оставалось за Максом Борном, коллегой Гейзенберга по матричной механике: волновую функцию следует трактовать как инструмент для расчета вероятности встретить искомую частицу в любой конкретной точке. В частности, мы должны взять как вещественную, так и мнимую часть комплексной амплитуды, возвести обе эти части в квадрат по отдельности и сложить два полученных числа. Так мы получаем вероятность наблюдения соответствующего результата. (Предположение, что речь идет именно о квадрате амплитуды, а не об амплитуде как таковой, содержится в сноске, которая была добавлена к статье Борна 1926 года в последний момент.) После того как мы пронаблюдаем волновую функцию, она коллапсирует и локализуется в той точке, где мы обнаружили частицу.

Знаете, кому не понравилась вероятностная интерпретация уравнения Шрёдингера? Самому Шрёдингеру. Он, как и Эйнштейн, ставил своей целью предоставить конкретное механистическое обоснование квантовых феноменов, а не просто создать инструмент, которым можно было бы пользоваться для расчета вероятностей. «Мне это не нравится, и я сожалею, что когда-либо имел к этому отношение», — ворчал он впоследствии. Смысл знаменитого мысленного эксперимента с котом Шрёдингера, где волновая функция кота эволюционирует (в соответствии с уравнением Шрёдингера) в суперпозицию «живого» и «мертвого», заключался не в том, чтобы

заставить людей говорить: «Ух ты, какая таинственная эта квантовая механика». Эксперимент был призван подтолкнуть людей к мысли: «Позвольте, но ведь так не бывает». Но, насколько нам известно, так оно и есть.



Обширная интеллектуальная работа была проделана за первые три десятилетия двадцатого века. В течение XIX века физики собрали многообещающую картину, отражавшую природу материи и сил. Материя состоит из частиц, а силы передаются через поля, и все они подчиняются законам классической механики. Однако, столкнувшись с экспериментальными данными, они были вынуждены выйти за рамки этой парадигмы. Стремясь объяснить исходящее от объектов излучение, Планк предположил, что свет состоит из дискретных порций энергии, а Эйнштейн развил эту идею, допустив, что свет существует в форме частицеподобных квантов. Тем временем факт стабильности атомов и наблюдение за тем, как газы излучают свет, позволили Бору предположить, что электроны могут двигаться лишь по определенным разрешенным орбитам, иногда перескакивая с одной на другую. Гейзенберг, Борн и Йордан оформили эту историю о вероятностных прыжках в полноценную теорию — матричную механику. Взглянув на нее под другим углом, де Бройль указал, что если мы будем трактовать материальные частицы, например электроны, как волны, то сумеем вывести квантованные орбиты Бора, а не просто постулировать их существование. На основании этого утверждения Шрёдингер разработал собственную полноценную квантовую теорию, в конечном итоге продемонстрировав эквивалентность матричной и квантовой механики. Несмотря на все чаяния, что волновая механика позволит избавиться от вероятностей как фундаментальной части теории, Борн показал, что правильное понимание волновой функции Шрёдингера таково: эта функция возводится в квадрат и получается вероятность наблюдать тот или иной результат измерения.

Уф! Неблизкий путь, проделанный за удивительно короткий период — от наблюдений Планка, сделанных в 1900 году, до Сольвеевского



конгресса в 1927 году, когда новая квантовая механика была конкретизирована раз и навсегда. Колоссальная заслуга физиков начала XX века заключается в том, что они были готовы работать, опираясь на экспериментальные данные, и, пойдя таким путем, полностью отбросили фантастически успешные ньютоновские представления о классическом мире.

Однако их успехи в осознании последствий собственных открытий впечатляют гораздо меньше.

## **Что не может быть познано, поскольку не существует**

### ***Неопределенность и дополнительность***

Как-то раз останавливает постовой Вернера Гейзенберга за превышение скорости.

«Вы знаете, с какой скоростью ехали?» – спрашивает офицер.

«Нет, – отвечает Гейзенберг, – но я точно знаю, где нахожусь!»

Думаю, все согласятся, что шутки физиков – самые смешные. Но физическую суть они передают не слишком точно. Этот бородатый анекдот предполагает знакомство со знаменитым принципом неопределенности Гейзенберга, который обычно объясняется так: невозможно одновременно с точностью определить и скорость объекта, и его положение в пространстве. Но реальность гораздо глубже.

Дело не в том, что мы не можем знать координату и импульс, а в том, что одновременно они даже не существуют. Лишь в крайне специфических обстоятельствах можно утверждать, что у объекта есть конкретное местоположение – когда его волновая функция полностью сконцентрирована в одной точке пространства и является нулевой где бы то ни было еще, и ровно то же самое со скоростью. А когда одна из этих величин определена, другая, если мы ее измерим, может быть абсолютно любой. Чаще волновая функция описывает разброс обеих величин – так что ни у одной из них нет одного конкретного значения.

Тогда, в 1920-х, все это было далеко не столь очевидно. Тогда было естественно полагать, что вероятностная природа квантовой механики просто указывает на неполноту теории и что более детерминистическую, напоминающую классическую картину еще только предстоит разработать. Иными словами, считалось, что волновая функция характеризует степень нашего неведения о происходящем, а не является, как мы здесь утверждаем, его истинным отражением. Узнав о принципе неопределенности, многие первым делом пытаются найти в нем лазейки. Все эти попытки провалились,

но при этом мы узнали много нового о том, в чем квантовая реальность принципиально отличается от привычного нам классического мира.

Отсутствие конкретных значений физических величин в самом сердце реальности, таких, которые более или менее прямо соотносятся с тем, что мы можем наблюдать, – одна из глубинных особенностей квантовой механики, которую непросто принять при первом знакомстве. Есть физические величины, которые не просто неизвестны, но даже не существуют, хотя нам кажется, что мы можем их измерить.

Квантовая механика вплотную подводит нас к зияющей пропасти между тем, что мы видим, и тем, что есть на самом деле. В этой главе мы рассмотрим, как этот разрыв проявляется в принципе неопределенности, а в следующей еще более ярко увидим его в феномене квантовой запутанности.



Принцип неопределенности обязан своему существованию тому факту, что отношение между координатой и импульсом (который равен произведению массы на скорость) в квантовой механике фундаментально отличается от такого же отношения в классической.

В классической механике можно представить, что мы измерим импульс частицы, отследив ее координату во времени и пронаблюдав, как быстро она движется. Но если мы имеем доступ только к одной из характеристик, то координата и импульс в данный момент времени полностью независимы друг от друга. Если я скажу вам, что в конкретный момент времени частица имеет определенную координату и более ничего, вы не будете знать, какова ее скорость, и наоборот.

Числа, которые необходимы для описания системы, физики называют степенями свободы данной системы. В ньютоновской механике, чтобы сообщить мне полную информацию о состоянии набора частиц, вы должны указать мне координату и импульс каждой из них; в данном случае степени свободы – это координаты и импульсы. Ускорение не является степенью свободы, поскольку оно может быть вычислено, когда известны все силы, воздействующие на

систему. Суть степени свободы в том, что сама она не зависит ни от чего другого.

Когда мы переходим к квантовой механике и размышляем о шрёдингеровских волновых функциях, ситуация несколько меняется. Чтобы получить волновую функцию для единственной частицы, необходимо учесть все точки, в которых потенциально может находиться эта частица, когда мы ее наблюдаем. Затем каждому из этих местоположений присвоим амплитуду, комплексное число с таким свойством: квадрат каждого такого числа равен вероятности обнаружить частицу в данной точке. Существует ограничение: сумма квадратов всех этих чисел в точности равна единице, поскольку общая вероятность найти частицу в любом конкретном месте равна единице. (Иногда вероятности выражаются в процентах, каждый процент составляет одну сотую от общей вероятности; вероятность 20 % эквивалентна вероятности 0,2.)

Обратите внимание: здесь мы не упоминаем ни скорость, ни импульс. Дело в том, что в квантовой механике нам не приходится отдельно указывать импульс, как это делалось в классической механике. Вероятность получить при измерении определенную скорость полностью определяется волновой функцией, заданной для всех возможных координат. Скорость не является отдельной степенью свободы, не зависимой от координаты. Основная причина кроется в том, что волновая функция — это, как известно, волна. В отличие от классической частицы, здесь у нас нет единственной координаты и единственного импульса, а есть функция всех возможных координат, и эта функция обычно колеблется вверх-вниз. От темпа этих колебаний зависит, что мы увидим, если попробуем измерить скорость или импульс.

Рассмотрим простую волну-синусоиду, колеблющуюся вверх и вниз регулярным образом и распространяющуюся в пространстве. Подставим такую волновую функцию в уравнение Шрёдингера и зададимся вопросом, как она будет изменяться со временем. Мы увидим, что у синусоиды есть четко определенный импульс и что чем меньше длина волны — тем выше ее скорость. Но синусоидальная волна не имеет определенного положения; напротив, она находится повсюду. Более типичная форма волны представляет собой некую смесь волнового пакета, локализованного в одной точке, и идеальной

синусоиды с четкой длиной волны, распределенной по всему пространству, и не будет соответствовать конкретной координате или конкретному импульсу, а будет представлять некую смесь обеих величин.

В этом и заключается суть дилеммы. Если мы попытаемся локализовать волновую функцию в пространстве, то ее импульс станет все более и более неопределен, а если захотим ограничить ее определенной длиной волны (и соответственно, импульсом), ее местоположение будет становиться все более размытым. Это и есть принцип неопределенности. Дело не в том, что мы не можем *знать* обе величины одновременно; это просто факт устройства волновых функций: если координата частицы сосредоточена вблизи конкретного значения, то ее импульс оказывается совершенно неопределен, и наоборот. Старые добрые классические свойства под названием «координата» и «импульс» — это не величины с реальными значениями, а возможные результаты измерений.



Иногда люди ссылаются на принцип неопределенности за пределами нашпигованных уравнениями книг по физике. Поэтому здесь важно подчеркнуть, о чем *не говорит* этот принцип. Речь не идет о том, что «вообще все неопределенно». В конкретном квантовом состоянии определенной может быть либо координата, либо импульс; а вот быть определенными одновременно они не могут.

Кроме того, принцип неопределенности не говорит, что мы непременно нарушим систему, когда проведем измерение. Если у частицы есть определенный импульс, то мы вполне можем измерить его и ничего не изменится. Суть в том, что не бывает состояний, в которых и координата, и импульс одновременно были бы определенными. Принцип неопределенности – это утверждение о природе квантовых состояний и их связи с наблюдаемыми величинами, а не о физическом акте измерения.

Наконец, этот принцип никак не характеризует ограниченность наших знаний о системе. Мы можем точно знать квантовое состояние, и это будет все, что нам нужно знать о нем, и все равно мы не сможем с абсолютной точностью предсказать результаты всех возможных будущих наблюдений. Идея о том, что «мы чего-то не знаем» при рассмотрении конкретной волновой функции, – пережиток нашей интуитивной привычки считать, что реальность действительно такова, какой мы ее наблюдаем. Квантовая механика приучает нас к иному.



Иногда высказывается следующая идея, навеянная принципом неопределенности: якобы квантовая механика *противоречит логике*. Это глупо. Логика выводит теоремы из аксиом, и полученные теоремы просто истинны. Аксиомы могут быть применимы или неприменимы в конкретной физической ситуации. Теорема Пифагора – квадрат гипотенузы прямоугольного треугольника равен сумме квадратов катетов – корректна как формальный вывод из аксиом евклидовой геометрии, хотя эти аксиомы и не соблюдаются, если говорить об искривленной поверхности, а не о плоской поверхности стола.

Идея о том, что квантовая механика противоречит логике – из того же разряда, что и мысль, будто атомы состоят в основном из пустоты (плохое соседство). Оба этих тезиса проистекают из внутреннего убеждения, что, несмотря на все, что нам удалось узнать, частицы – это все-таки точечные объекты, каждый из которых обладает некоторыми координатой и импульсом, а не распределенные волновые функции.

Рассмотрим частицу в коробке, в которой мы провели линию, разделяющую коробку на правую и левую части. У частицы есть волновая функция, распределенная по этой коробке. Сделаем предположение  $P$  – «частица находится в левой части коробки» и предположение  $Q$  – «частица находится в правой части коробки». Соблазнительно сразу признать оба этих предположения ложными, поскольку волновая функция распределена по всей коробке, от края до края. Но предположение « $P$  или  $Q$ » обязательно будет верным, так как частица находится в коробке. Классическая логика не допускает, чтобы при одновременной ложности  $P$  и  $Q$  предположение « $P$  или  $Q$ » оказалось верным. А значит, здесь что-то нечисто.

Проблема здесь не в логике и не в квантовой механике, а в нашем обычном невнимании к природе квантовых состояний при присвоении значений истинности утверждениям  $P$  и  $Q$ . Эти утверждения ни истинны, ни ложны; они просто плохо сформулированы. Нет такой вещи, как «та сторона коробки, в которой находится частица». Если бы волновая функция была полностью сконцентрирована с одной стороны коробки, а с другой стороны полностью исчезала, мы могли бы определить истинность  $P$  и  $Q$ . В таком случае одно из этих значений было бы истинно, а второе ложно и классическая логика работала бы на ура.

Несмотря на то что классическая логика совершенно справедлива во всех случаях, когда она правильно применяется, квантовая механика заложила основы более общих подходов, известных под названием «квантовая логика». Пионерами квантовой логики стали Джон фон Нейман и его коллега Гаррет Биркгоф. Исходя из логических аксиом, немного отличающихся от стандартных, можно вывести систему правил, которым подчиняются вероятности; эти правила подразумеваются квантовомеханическим правилом Борна. В этом смысле квантовая логика интересна и полезна, но ее существование не отменяет верности традиционной логики в соответствующих обстоятельствах.



Нильс Бор, в попытке подчеркнуть уникальность квантовой теории, предложил концепцию *дополнительности*. Идея заключается в том, что может быть более двух способов рассмотрения квантовой системы, и все эти способы в равной степени правомерны, но с оговоркой, что их нельзя применять одновременно. Волновую функцию частицы можно описать в терминах координаты или импульса, но не координаты и импульса одновременно. Аналогично можно считать, что электроны проявляют либо корпускулярные, либо волновые свойства, но не те и другие одновременно.

Нигде это свойство не проявляется столь ярко, как в знаменитом эксперименте с двумя щелями. На практике этот эксперимент был осуществлен лишь в 1970-е, но предложен гораздо раньше. Изначально это был не один из тех поразительных экспериментальных результатов, для понимания которых теоретикам приходится изобретать новые методы мышления, а просто мысленный эксперимент (в исходном виде сформулированный Эйнштейном во время дебатов с Бором, а позже популяризованный Ричардом Фейнманом в его курсе лекций для студентов Калифорнийского технологического института), призванный проиллюстрировать поразительные следствия квантовой теории.

Смысл эксперимента в том, чтобы указать на разницу между частицами и волнами. Начнем с источника классических частиц — здесь подойдет обычный дробовик, дробь из которого разлетается в несколько непредсказуемом направлении. Выстрелим из дробовика сквозь узкую щель и отметим попадания дроби на экране, расположенном за щелью. Большинство частиц пролетит сквозь щель, за исключением тех немногих, которые слегка изменят направление, ударившись о края. Таким образом на экране-детекторе мы увидим узор из отдельных точек, более или менее соответствующий очертаниям щели.

То же самое можно проделать и с волнами, например поместив мембрану с щелью в ванну с водой и создав волны, проходящие сквозь нее. Пройдя через щель, волны распространяются полукругом, прежде чем достичь экрана. Конечно, мы не увидим точек, подобных частицам, когда волна попадает на экран, но давайте представим, что у нас есть специальный экран, который загорается с яркостью, зависящей от амплитуды, которой волны достигают в любой

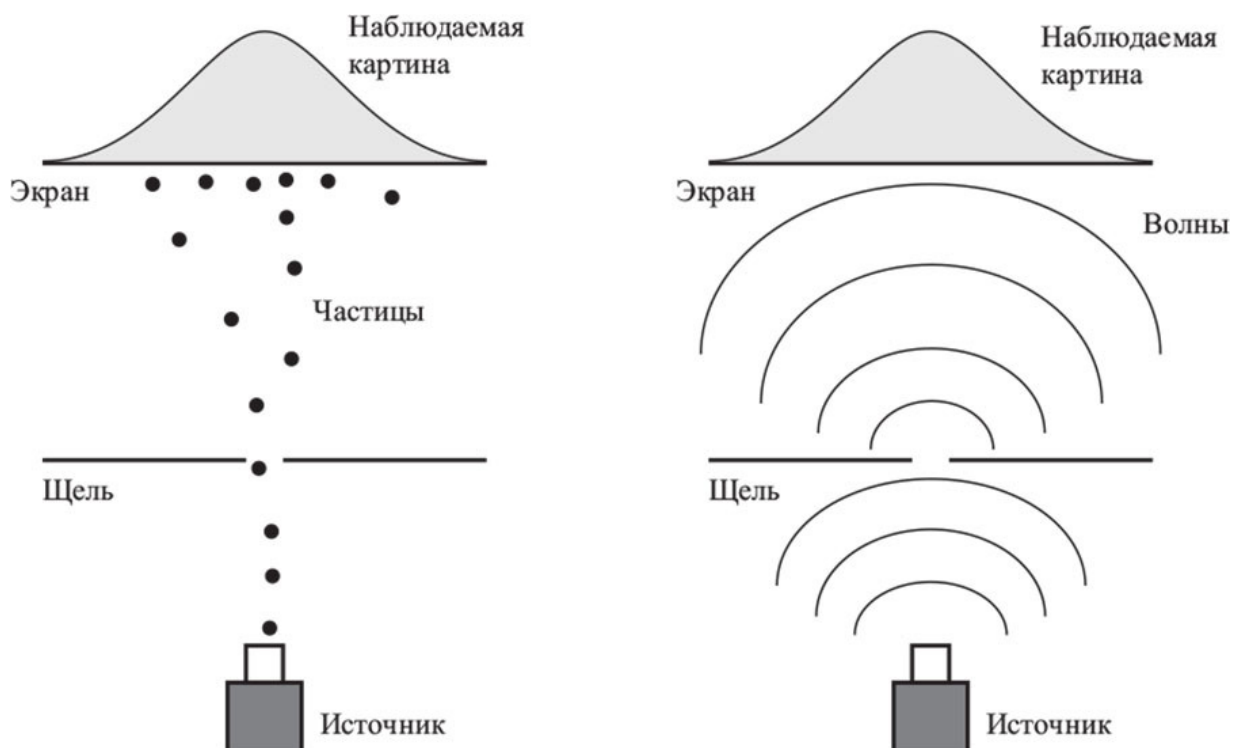


конкретной точке. Подсветка будет наиболее яркой в той точке на экране, которая расположена ближе всего к щели, и постепенно угаснет при удалении в стороны.

Теперь давайте сделаем похожий эксперимент, но уже с двумя щелями, а не с одной. Случай с частицей здесь будет почти как в первом опыте: если наш источник частиц дает достаточный разброс, а частицы пролетают через обе щели, то на экране мы увидим две линии точек, по одной напротив каждой из щелей (или одну толстую линию, если щели расположены достаточно близко друг к другу). Но случай с волнами интересным образом изменится. Волны могут колебаться как вверх, так и вниз, и две волны, колеблющиеся в противоположных направлениях, будут гасить друг друга – этот феномен называется «интерференция». Итак, волны проходят через обе щели сразу, расходятся в стороны полукругами, но затем образуют интерференционную картину за мембраной. Таким образом, наблюдая на экране за щелями амплитуду результирующей волны, мы увидим не просто две линии, а яркую линию по центру (ровно посередине между щелями) с перемежающимися темными и светлыми участками, расходящимися в обе стороны и постепенно тускнеющими.

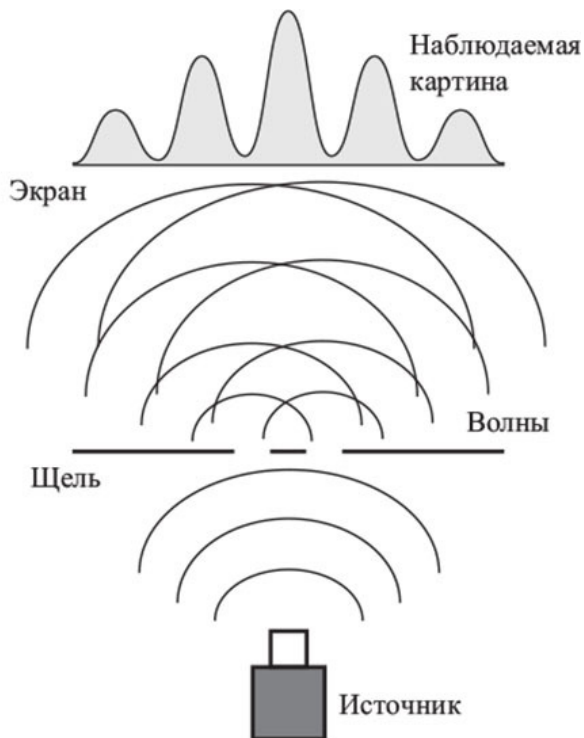
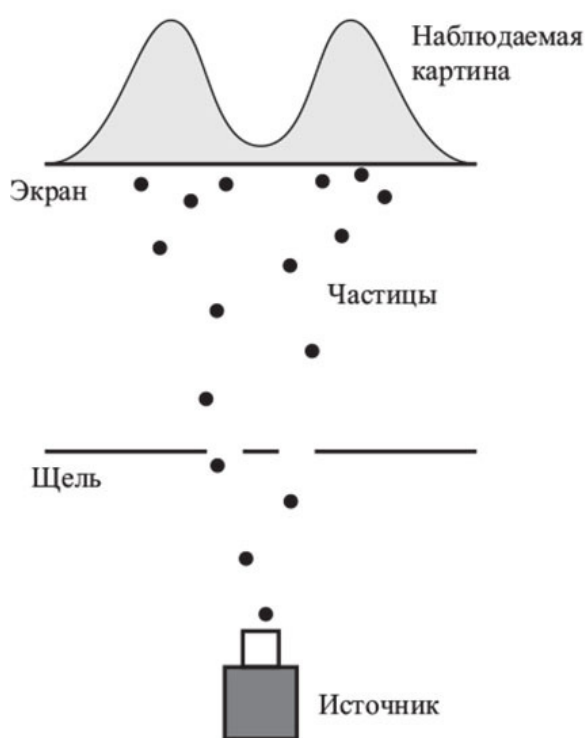
Пока речь идет о старом любимом классическом мире, где частицы и волны – это разные объекты, то и отличить их не составляет труда. А теперь давайте заменим наш дробовик или волновую машину источником электронов во всей их квантовомеханической красе. В этой установке есть несколько любопытных «наворотов», каждый из которых имеет провокационные последствия.

Сначала рассмотрим случай с единственной щелью. В данном случае электроны ведут себя в точности как классические частицы. Они пролетают через щель, затем фиксируются на экране с другой стороны: каждый электрон оставляет одну частицеподобную точку. Если пропустить через щель множество электронов, то они образуют на экране рассеянный узор напротив щели. Пока ничего интересного.



Теперь перейдем к случаю с двумя щелями (щели должны располагаться очень близко друг к другу – и это одна из причин, почему прошло так много времени, прежде чем эксперимент был проведен на практике). И снова электроны проходят сквозь щели и оставляют отдельные метки на экране с другой стороны. Но при этом они не образуют двух линий, как в случае с классической дробью. Вместо этого появляется ряд линий: одна жирная в середине, а в стороны от нее расходятся параллельные линии с постепенно уменьшающимся количеством отметин. Между этими линиями остаются темные области, в которых отметин почти нет.

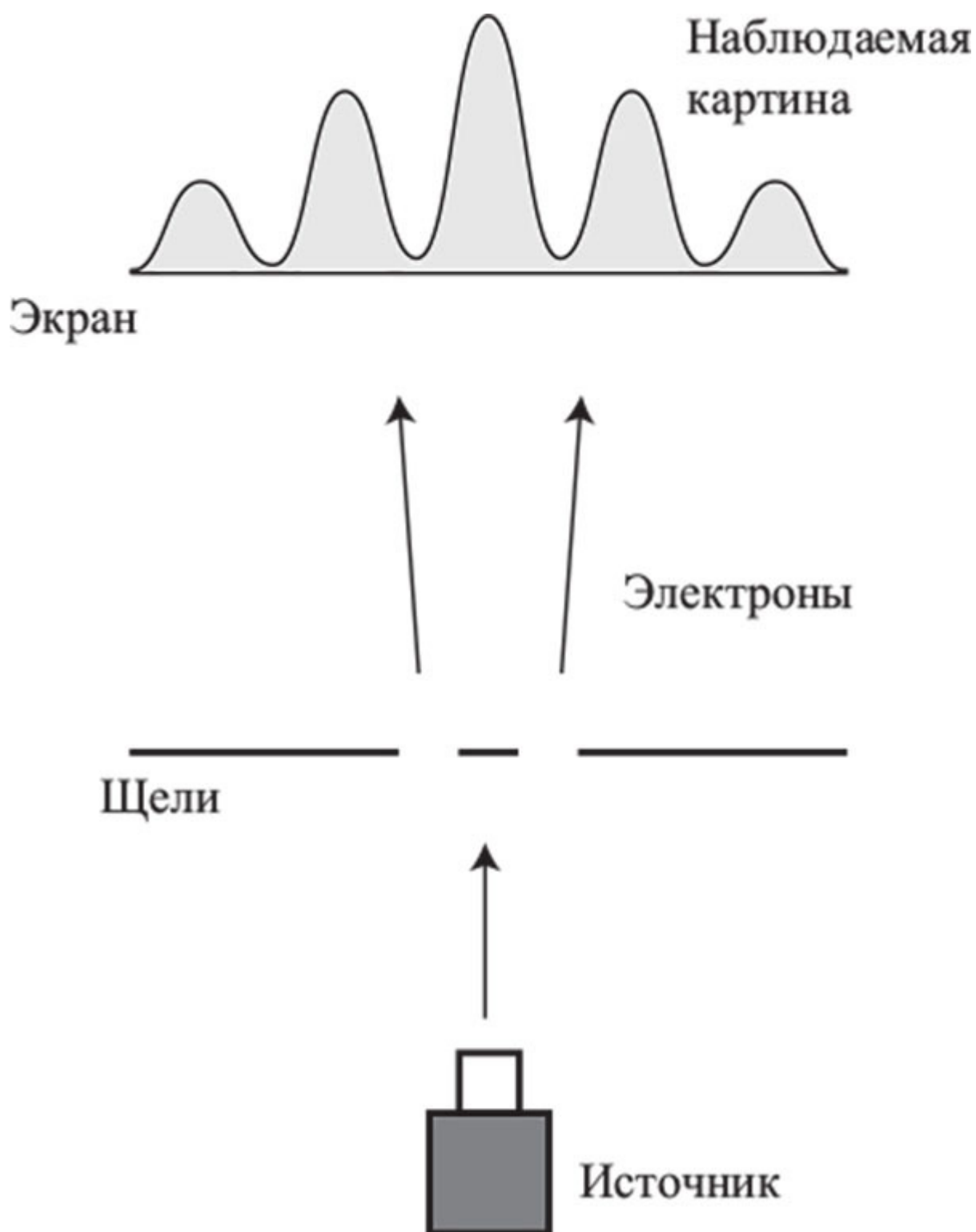
Иными словами, проходя через две щели, электроны оставляют безошибочно узнаваемый интерференционный узор, подобно волнам, и одновременно отдельные метки, подобно частицам. Этот феномен породил массу бесплодных дискуссий о том, чем же «на самом деле» являются электроны – частицами или волнами или же иногда они подобны частицам, а в другое время – волнам. Так или иначе, что-то, бесспорно, проходило через обе щели, когда электроны летели к экрану.



В данный момент нас это уже не удивляет. Электроны, проходящие сквозь щели, описываются волновой функцией, которая очень похожа на классическую волну, проходящую через обе щели и колеблющуюся вверх и вниз. Поэтому логично, что мы наблюдаем интерференционную картину. Затем, когда электроны достигают экрана, мы можем наблюдать их в виде точечных частиц.

Теперь добавим еще один нюанс. Допустим, что рядом с каждой из щелей мы установили маленькие детекторы, с помощью которых сумеем определить, прошел ли электрон через щель. Так мы разберемся с безумной идеей, будто электрон может пройти через обе щели сразу.

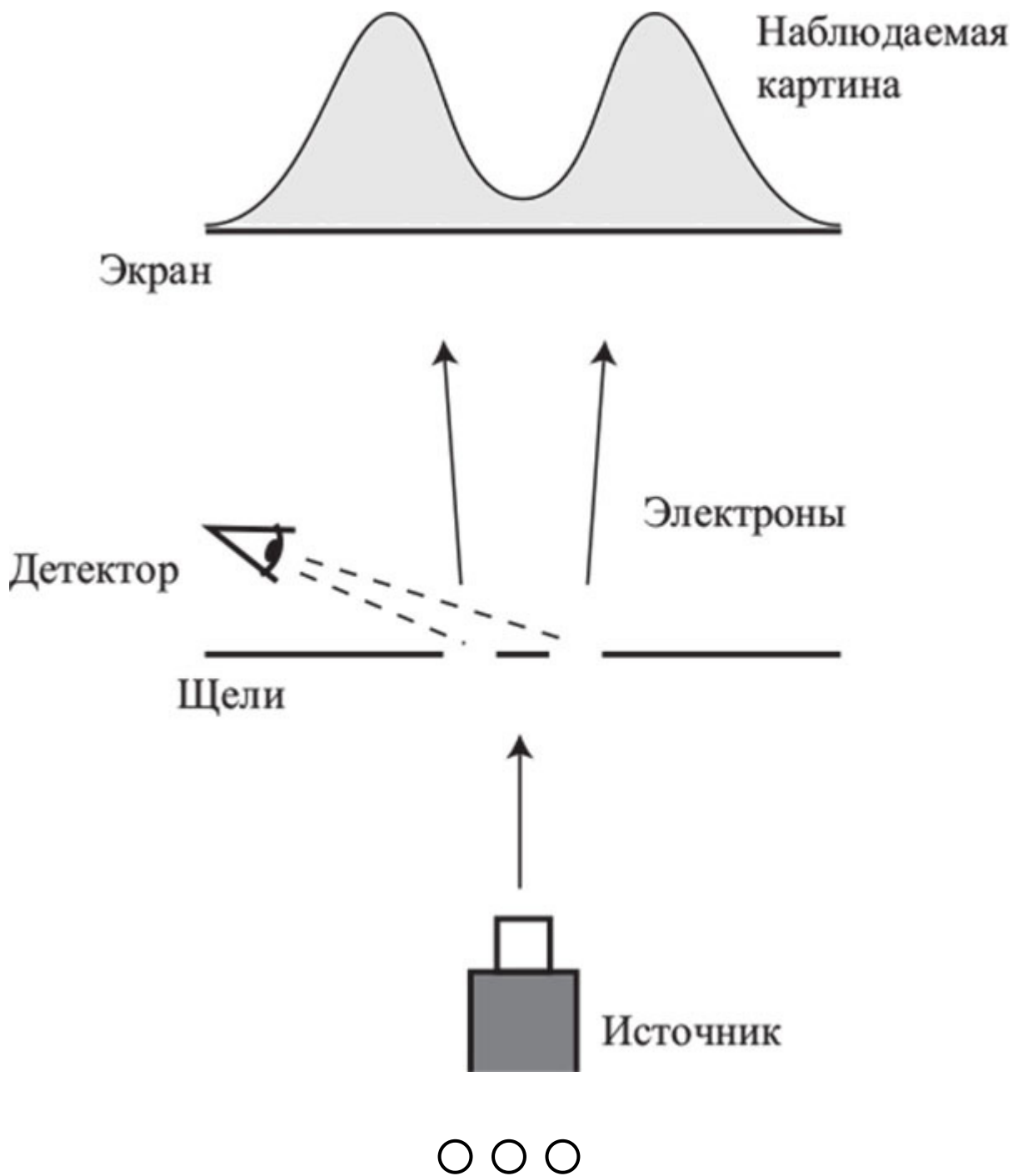
Должно быть, вы догадываетесь, что мы увидим. Детекторы не покажут, что половина электрона прошла через одну щель, а вторая половина — через другую; каждый раз детектор у одной из щелей зафиксирует целый электрон, а детектор у второй не зафиксирует ничего. Дело в том, что детектор действует как измерительный прибор, а при измерении электронов мы наблюдаем их как частицы.



Но это не единственное следствие наблюдения за тем, как электрон проходит через щели. Интерференционный узор на экране исчезнет, и мы вновь увидим две полосы отметок, оставленных обнаруженными

электронами, – по одной напротив каждой из щелей. Когда детектор работает, волновая функция коллапсирует в момент прохода электрона сквозь щели, и поэтому мы не видим интерференционной картины от волны, проходящей через обе щели сразу. Когда на электроны смотрят, они ведут себя как частицы.

Эксперимент с двумя щелями мешает цепляться за убеждение, что электрон подобен отдельной классической точке, а волновая функция просто отражает наше незнание о том, где эта точка находится. Из-за незнания не возникает интерференционных картин. Волновая функция реальна.

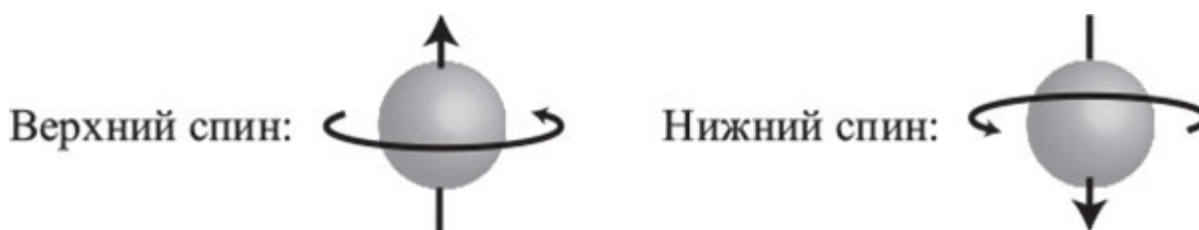


Возможно, волновые функции и реальны, но весьма абстрактны, и как только мы пытаемся рассмотреть более одной частицы одновременно, визуализировать их становится сложно. По мере того как мы будем продвигаться вперед, рассматривая на практике все более тонкие квантовые явления, нам очень пригодится простой, легко

усваиваемый пример, к которому мы сможем обращаться снова и снова. *Спин* частицы – еще одна степень свободы наряду с ее координатой и импульсом – именно то, что нам надо. Давайте ненадолго поломаем голову над тем, что означает спин в квантовой механике, но, когда мы с ним разберемся, станет гораздо проще.

Сам феномен спина понять не сложно – это всего лишь вращение вокруг оси, подобно вращению Земли или балерины, выполняющей пируэт. Но как и в случае с энергиями электрона, вращающегося вокруг атомного ядра, в квантовой механике при измерении спина частицы мы можем получить лишь определенные дискретные значения.

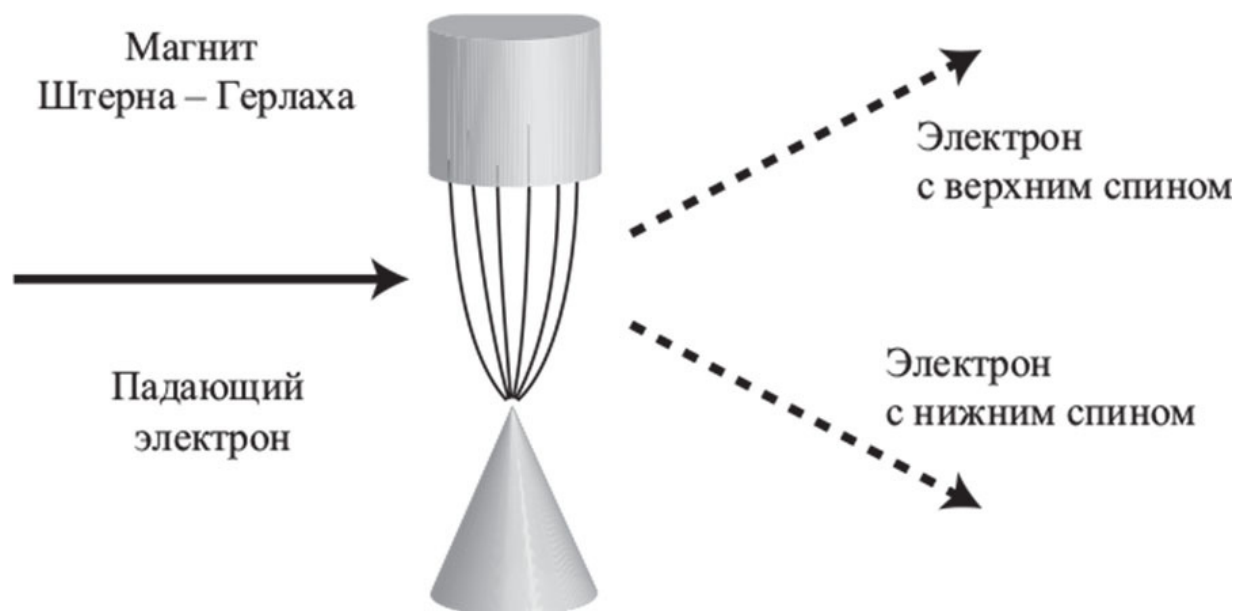
Например, для электрона существует всего два возможных результата измерения спина. Сначала выберем ось, вдоль которой будем измерять спин. При взгляде вдоль этой оси мы в любом случае обнаружим, что электрон вращается либо по часовой стрелке, либо против нее, причем всегда с одинаковой скоростью. Такие спины принято называть «верхним» и «нижним». Помните о «правиле правой руки» (правиле буравчика): если сжать четыре пальца правой руки в направлении вращения, то отставленный большой палец будет направлен вдоль соответствующей вращению вертикальной оси.



Вращающийся электрон подобен крошечному магниту, у которого, как и у Земли, есть северный и южный магнитные полюса; ось спина указывает на северный полюс. Один из способов измерить спин конкретного электрона – пропустить его через магнитное поле, которое немного отклонит электрон в зависимости от того, как ориентирован его спин. (Техническая деталь: чтобы это сработало, магнитное поле должно быть правильным образом сфокусировано: в одних местах напряженность поля должна быть более высокой, а в других – более низкой<sup>[10]</sup>.)

Если я скажу вам, что электрон имеет определенный суммарный спин, то для данного эксперимента вы можете сделать следующий прогноз: электрон будет отклоняться вверх, если ось его спина ориентирована строго по внешнему полю, и отклоняться вниз, если ось спина ориентирована строго в противоположном направлении, а также отклоняться на некоторый промежуточный угол, если его спин будет ориентирован как-то иначе. Но в реальности мы наблюдаем другое.

Такой эксперимент был впервые проведен в 1922 году немецкими физиками Отто Штерном (ассистентом Макса Борна) и Вальтером Герлахом еще до того как идея спина была четко сформулирована. То, что они увидели, было поразительно. Электроны действительно отклоняются, проходя через магнитное поле, но либо строго вверх, либо строго вниз, без всяких промежуточных вариантов. Если вращать магнитное поле, то электроны по-прежнему отклоняются в направлении того поля, через которое проходят, либо против него, но по-прежнему никаких промежуточных значений. Как и энергия электрона, вращающегося вокруг атомного ядра, измеренный спин оказывается квантованным<sup>[11]</sup>.



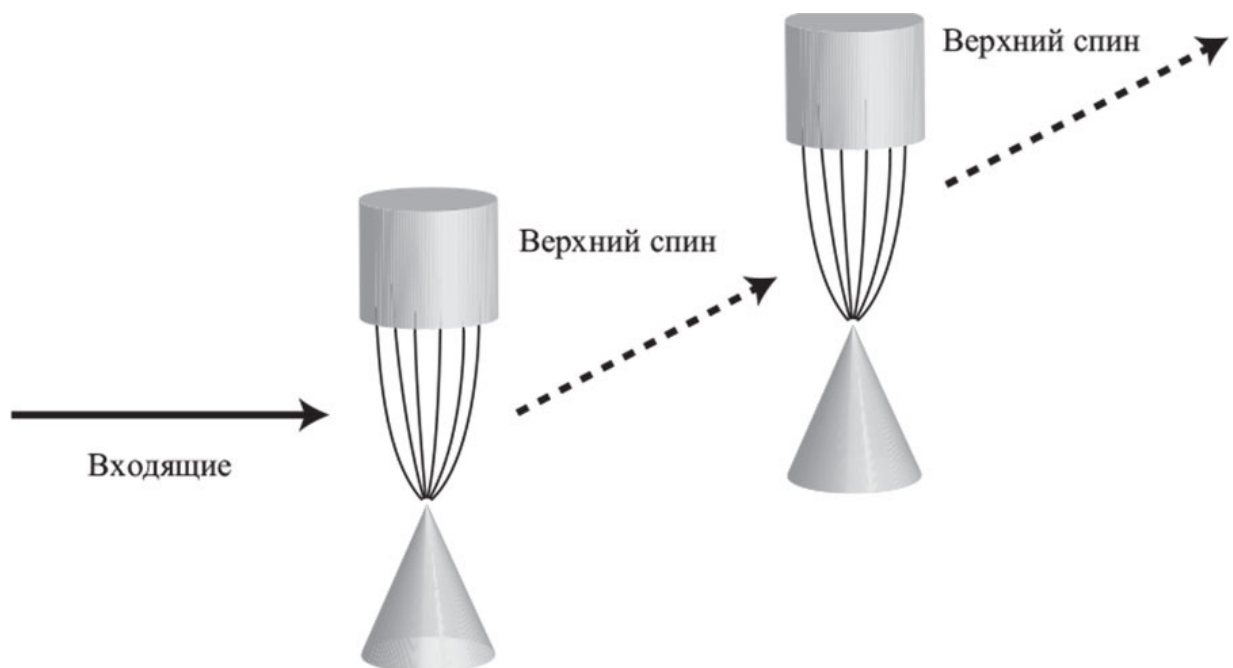
Это кажется удивительным. Даже если мы привыкли к мысли, что энергия электрона, вращающегося вокруг ядра, может иметь лишь



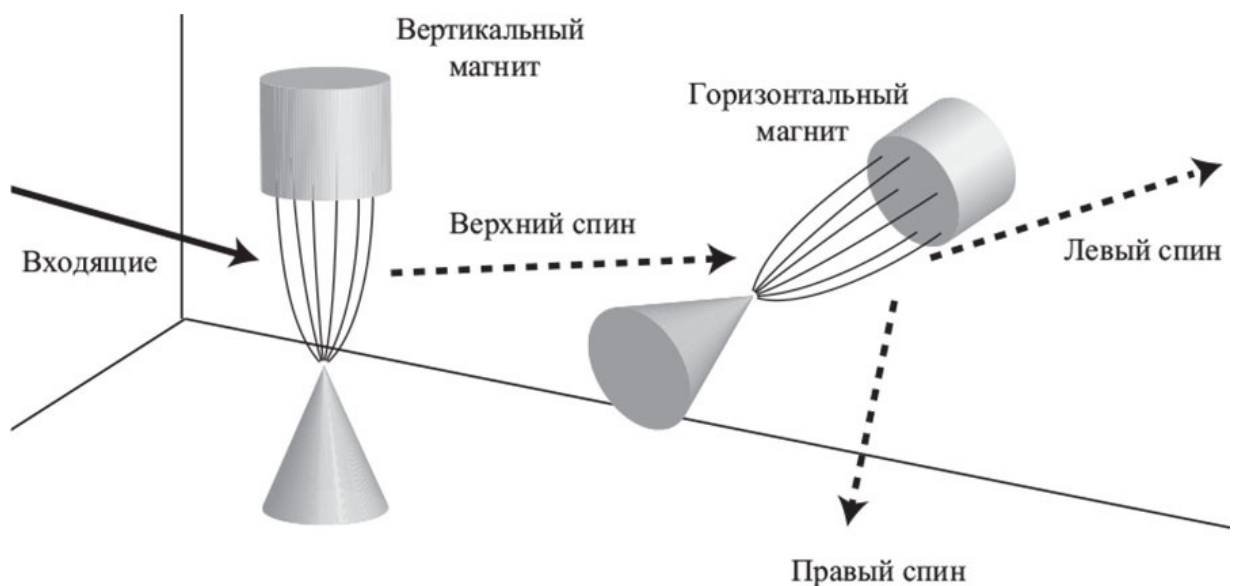
определенные дискретные значения, по крайней мере эта энергия кажется объективным свойством электрона. Но то, что мы называем спином электрона, дает нам разные ответы в зависимости от того, как мы его измеряем. И независимо от того, в каком именно направлении мы измеряем спин, мы можем получить лишь один из двух возможных результатов.

Чтобы убедиться, что мы не сошли с ума, давайте сомневаемся и пропустим электрон мимо двух магнитов подряд. Как вы помните, правила учебника квантовой механики говорят нам, что если мы получим определенный результат измерения и немедленно измерим ту же самую систему снова, то снова получим точно такой же результат. Действительно, так и происходит: если электрон отклоняется вверх одним магнитом (и следовательно, имеет верхний спин), он всегда будет отклоняться вверх и следующим магнитом, ориентированным таким же образом.

А что если повернуть один из магнитов на 90 градусов? Так мы расщепим исходный пучок электронов на два, один с верхним спином, другой – с нижним (если взять за отправную точку для измерения вертикально ориентированный магнит), затем возьмем электроны с верхним спином и пропустим их сквозь магнитное поле, которое ориентировано горизонтально. Что произойдет тогда? Может, они затаят дыхание и откажутся лететь, поскольку они вертикально ориентированные электроны с верхним спином, а мы пытаемся измерять их спин в направлении горизонтальной оси?



Нет. На самом деле второй магнит разделит электроны с верхним спином на два пучка. Половина из них будет отклоняться вправо (по направлению, заданному вторым магнитом), а половина – влево.



Чистой воды безумие. Наша интуиция, основанная на классической картине мира, подсказывает, что существует некая «ось, вокруг которой вращается электрон», и кажется логичным, что спин,

характеризующий вращение вокруг именно *этой* оси, и будет квантован. Но эксперименты наглядно показывают, что ось, вокруг которой квантован спин, не зависит от самой частицы: можно выбрать любую ось, какую вам заблагорассудится, повернув магнит соответствующим образом, и спин будет квантоваться относительно этой оси.

В данном случае мы сталкиваемся с еще одним проявлением принципа неопределенности. Как мы уже знаем, «координата» и «импульс» не являются свойствами электрона – это просто связанные с ним феномены, которые мы можем измерить. В частности, ни одна частица не может одновременно обладать определенными значениями координаты и импульса. Как только мы определяем точную волновую функцию для координаты, вероятность наблюдения любого конкретного значения импульса полностью фиксируется, и наоборот.

То же касается «вертикального спина» и «горизонтального спина»<sup>[12]</sup>. Это не отдельные свойства, которыми может обладать электрон: это просто разные величины, которые мы можем измерить. Если выразить квантовое состояние в терминах вертикального спина, то вероятность наблюдения левого или правого горизонтального спина будет полностью фиксированной. Результаты измерений, которые мы можем получить, зависят от базового квантового состояния, которое можно выразить различными, но эквивалентными способами. Принцип неопределенности отражает тот факт, что в любом квантовом состоянии мы можем провести различные измерения, не совместимые друг с другом.



Системы с двумя возможными результатами измерений настолько распространены и полезны в квантовой механике, что для них придумали милое название: *кубиты*. Идея в том, что классический «бит» может иметь всего одно из двух значений: 0 или 1. Кубит (квантовый бит) – это система, которая допускает два возможных результата измерения, скажем верхний и нижний спины вдоль некоторой оси. Состояние типичного кубита – это суперпозиция обеих

возможностей, каждая из которых характеризуется некоторым комплексным числом, амплитудой вероятности каждой из альтернатив.

Квантовые компьютеры оперируют кубитами по такому же принципу, по которому обычные компьютеры работают с классическими битами.

Волновую функцию кубита можно записать так:

$$\Psi = a \left( \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{Sphere} \end{array} \right) + b \left( \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{Sphere} \end{array} \right)$$

Амплитуды

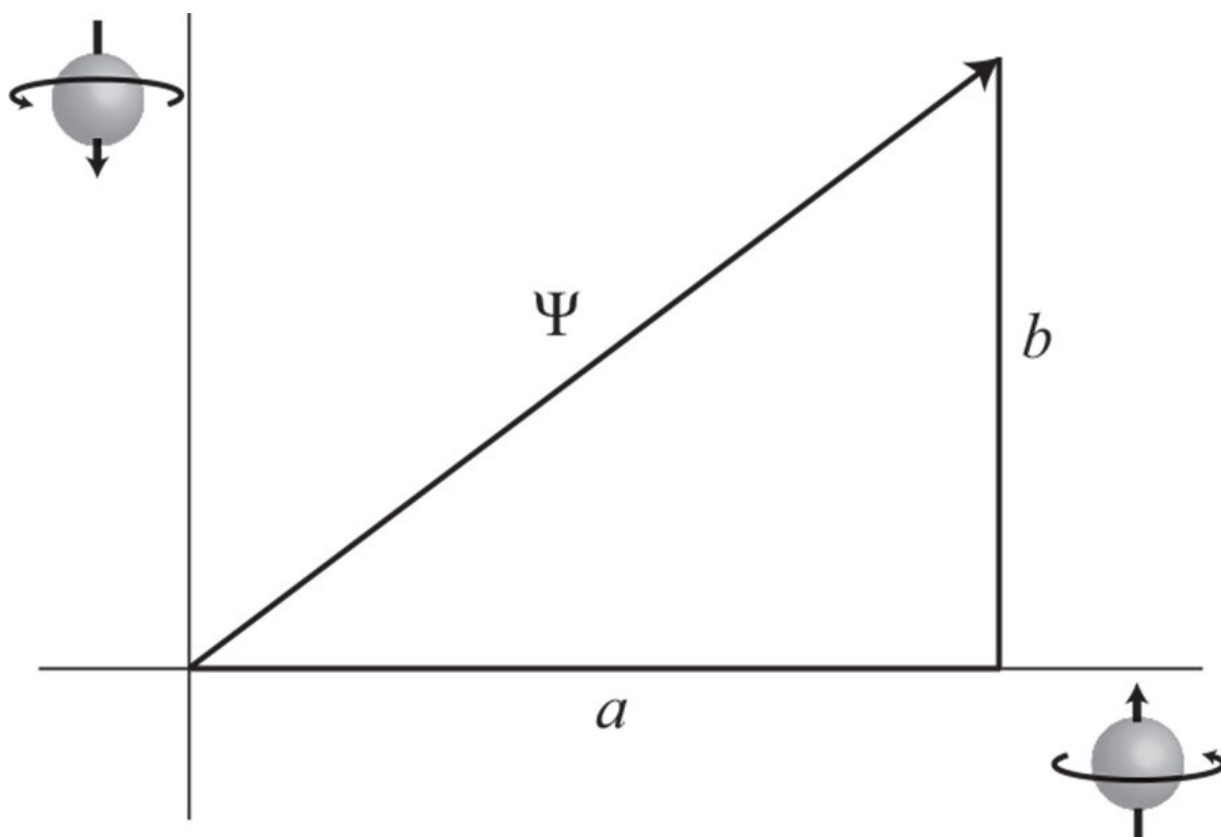
Волновая функция

Компоненты

Символы  $a$  и  $b$  обозначают комплексные числа, представляющие, соответственно, амплитуды вероятности верхнего и нижнего спинов. Отдельные слагаемые волновой функции, представляющие различные возможные результаты измерения, в данном случае – верхний и нижний спины, называются «компоненты». В этом состоянии вероятность наблюдать частицу с верхним спином будет равна  $|a|^2$ , а вероятность наблюдать частицу с нижним спином –  $|b|^2$ . Если, например, и  $a$ , и  $b$  были бы равны квадратному корню из  $1/2$ , то вероятность наблюдать верхний или нижний спин составила бы  $1/2$ .

Кубиты помогают понять критически важное свойство волновых функций: каждая из них подобна гипотенузе прямоугольного треугольника, а катеты этого треугольника соответствуют амплитудам каждого возможного результата измерения. Иными словами, волновая функция похожа на *вектор*, то есть на стрелку, обладающую длиной и направлением.

Вектор, о котором мы говорим, не указывает направление в реальном физическом пространстве, например «вверх» или «на север». Нет, скорее он направлен в пространстве всех возможных результатов измерений. Если речь идет о кубите одного спина, то это будет верхний или нижний спин (если мы выберем какую-либо ось, вдоль которой будем его измерять). Когда мы говорим, что «кубит находится в суперпозиции верхнего и нижнего спинов», мы фактически имеем в виду: «вектор, представляющий квантовое состояние, имеет одну компоненту, описывающую верхний спин, и другую компоненту, описывающую нижний спин».



Естественно полагать, что верхний и нижний спины указывают на противоположные направления: просто посмотрите на стрелки. Однако как квантовые состояния они перпендикулярны друг другу: кубит, полностью соответствующий верхнему спину, не имеет компоненты, которая соответствовала бы нижнему спину, и наоборот. Даже волновая функция для координаты частицы является вектором,

хотя обычно мы представляем ее как гладкую функцию, распределенную в пространстве. Фокус в том, чтобы считать каждую точку пространства определяющей отдельную компоненту, а волновую функцию – суперпозицией всех этих компонент. Существует бесконечное количество таких векторов, поэтому пространство всех возможных квантовых состояний, именуемое *гильбертовым пространством*, является бесконечномерным для координаты любой отдельной частицы. Вот почему гораздо удобнее рассуждать о кубитах. Два измерения представить проще, чем бесконечное количество измерений.

Когда в нашем квантовом состоянии всего две компоненты, а не бесконечное множество, непросто представить состояние как «волновую функцию». Она не слишком волнистая и не похожа на гладкую функцию в пространстве. Но на самом деле думать об этом нужно совершенно иначе. Квантовое состояние – это не функция в обычном пространстве, а функция в абстрактном «пространстве результатов измерений», которое в случае кубита предусматривает всего две возможности. Если наблюдаемый нами феномен – это координата отдельной частицы, то квантовое состояние присваивает амплитуду каждой возможной координате, и это напоминает волну в обычном пространстве. Однако это необычный случай; по своей природе волновая функция более абстрактна, и, когда в ней участвует более одной частицы, ее становится трудно визуализировать. И тогда терминология «волновой функции» нам уже мешает. Кубиты – отличная вещь хотя бы потому, что у такой волновой функции всего две компоненты.



Может показаться, что данное математическое отступление было излишним, но есть непосредственная польза в том, что мы стали мыслить о волновых функциях как о векторах. Во-первых, становится понятно правило Борна, согласно которому вероятность получить любой конкретный результат измерения равна квадрату его амплитуды. Подробнее мы обсудим этот момент позже, однако легко увидеть, какой смысл заключен в этой идее. Если волновая функция – это

вектор, то у нее есть длина. Логично предположить, что со временем длина этого вектора может уменьшаться или увеличиваться, но это не так; согласно уравнению Шрёдингера, меняется лишь «направление» волновой функции, а длина ее остается постоянной. Длину волновой функции можно вычислить по теореме Пифагора, для этого достаточно знать геометрию на уровне старших классов.

Числовое значение длины вектора несущественно, мы просто можем выбрать удобное число, зная, что оно останется постоянным. Пусть это будет единица, то есть будем считать, что любая волновая функция это вектор, длина которого равна единице. Сам этот вектор подобен гипотенузе прямоугольного треугольника, а его компоненты – катетам. Тогда теорема Пифагора подсказывает нам простое отношение: сумма квадратов амплитуд дает единицу,  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ .

На этом простом геометрическом факте основано правило Борна для расчета квантовых вероятностей. Сами амплитуды в сумме не дают единицу, а их квадраты – дают. Все это напоминает важную особенность теории вероятности: сумма вероятностей различных исходов должна быть строго равна единице. (Что-то должно произойти, и общая вероятность всех возможных исходов в сумме дает единицу.) Еще одно правило заключается в том, что вероятности обязательно выражаются неотрицательными числами. Опять же, амплитуды в квадрате соответствуют этому требованию: амплитуды могут быть отрицательными (или комплексными), но их квадраты являются неотрицательными вещественными числами.

Не успев как следует задуматься, мы уже видим, что «амплитуды в квадрате» обладают подходящими свойствами, чтобы описывать вероятности исходов: это множество неотрицательных чисел, в сумме всегда дающих единицу, поскольку длина волновой функции равна единице. В этом вся суть: правило Борна сводится к теореме Пифагора, применяемой к амплитудам вероятностей различных исходов. Вот почему речь идет об амплитудах в квадрате, а не о самих амплитудах, не о квадратных корнях из амплитуд или о чем-нибудь столь же безумном.

Векторная картина позволяет красиво объяснить и принцип неопределенности. Как вы помните, электроны с верхним спином распределяются в соотношении пятьдесят на пятьдесят, превращаясь в электроны с левым и правым спинами, когда их пропускают через

«следующий», горизонтально ориентированный магнит. Это говорит о том, что электрон в состоянии верхнего спина находится в суперпозиции правого и левого спинов, как и электрон с нижним спином.

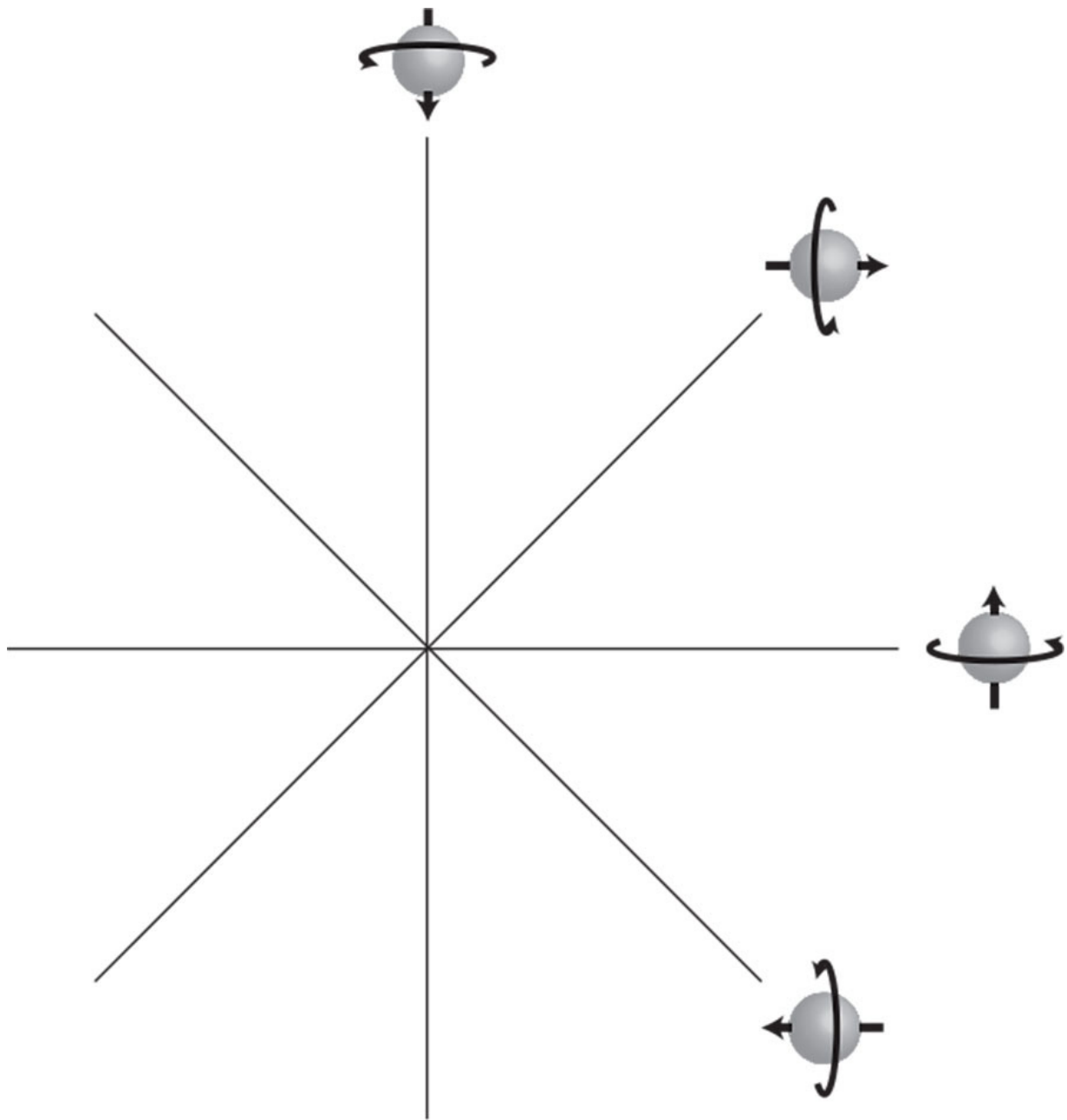
$$\begin{aligned}
 \text{Верхний спин} &= \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \text{Правый спин} \right) + \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \text{Левый спин} \right) \\
 \text{Нижний спин} &= \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \text{Правый спин} \right) - \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \text{Левый спин} \right)
 \end{aligned}$$

Так, идея левого или правого спина определенным образом связана с идеей верхнего или нижнего спина; каждую из этих возможностей можно рассматривать как суперпозицию двух других. Мы уже говорили, что чистые состояния с верхним и нижним спинами образуют *базис* для определения произвольного состояния кубита – любое квантовое состояние можно записать как суперпозицию двух этих чистых состояний. Однако чистые состояния с левым и правым спинами образуют другой, но тоже вполне хороший базис. Так что любое состояние кубита можно также разложить и по этому базису.

Рассмотрим эту картину с точки зрения векторов. Если изобразить плоскость и отложить верхний спин по оси абсцисс, а нижний спин – по оси ординат, то из приведенных выше соотношений мы увидим, что направления правого и левого спинов окажутся под углом в сорок пять градусов к этим осям. Любую волновую функцию можно разложить как по осям «вверх-вниз», так и по осям «вправо-влево». Одна система координат повернута относительно другой, однако обе эти системы прекрасно подходят, чтобы разложить по ним любой интересующий



нас вектор.



Теперь понятно, откуда берется принцип неопределенности. Для единственного спина принцип неопределенности гласит, что состояние не может иметь определенного значения спина одновременно и в исходном базисе (вверх-вниз), и в повернутом базисе (вправо-влево). Именно это и показано на рисунке: если состояние соответствует

чистому верхнему спину, то автоматически является некоторой комбинацией левого и правого спинов, и наоборот.

Как нет квантовых состояний, которые были бы одновременно локализованы по координате и импульсу, так нет и состояний, которые были бы одновременно локализованы по горизонтальному и вертикальному спинам. Принцип неопределенности отражает взаимосвязь того, что существует в реальности (квантовые состояния), и того, что мы можем измерить (одна наблюдаемая величина в каждый момент времени).

## Запутанные вдали

### *Многочастичные волновые функции*

Научно-популярные описания дискуссий между Эйнштейном и Бором часто создают впечатление, будто Эйнштейн никак не мог уложить в голове принцип неопределенности, поэтому тратил время на изобретение хитрых способов его обойти. На самом деле в квантовой механике его смущала ее очевидная нелокальность – событие в одной точке пространства, казалось бы, может непосредственно влиять на эксперимент, который проводится очень далеко. Ему потребовалось некоторое время, чтобы облечь свои опасения в хорошо сформулированное возражение, и, занимаясь этим, он помог осветить одну из самых глубоких особенностей квантового мира: феномен *запутанности*.

Запутанность возникает, поскольку существует только одна волновая функция для всей Вселенной, а не отдельные волновые функции для каждого ее фрагмента. Откуда нам это известно? Почему не может быть отдельной волновой функции у каждой частицы или поля?

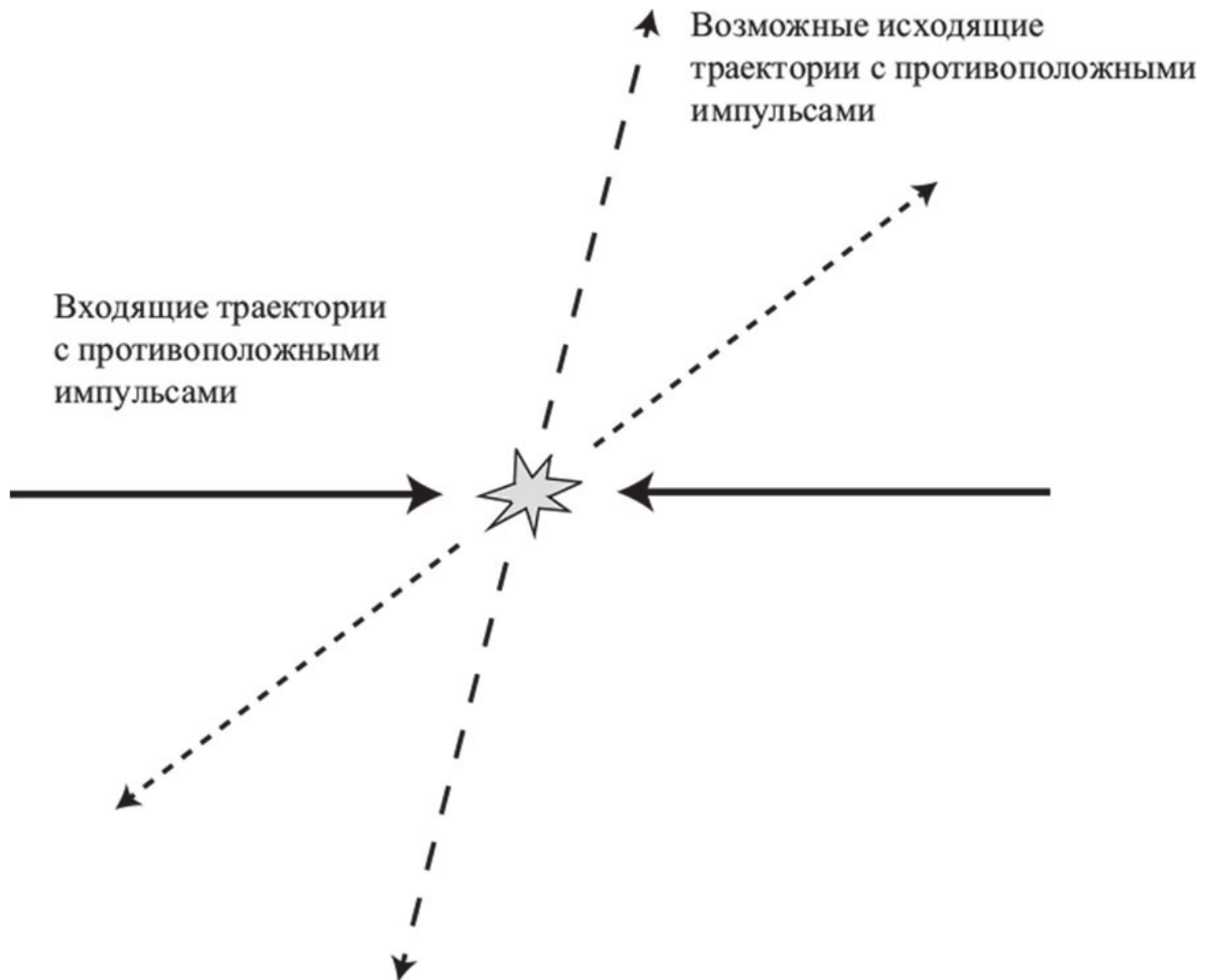
Рассмотрим эксперимент, в котором мы стреляем друг в друга двумя электронами, движущимися с одинаковой скоростью в противоположных направлениях. Поскольку заряд у обоих электронов отрицательный, они оттолкнутся друг от друга. В классической физике, зная исходные координаты и скорости электронов, мы могли бы в точности вычислить те направления, в которых они отскочат друг от друга. Но в квантовомеханическом контексте все, что мы можем – это рассчитать вероятность, с которой они могут наблюдаться на тех или иных траекториях после взаимодействия друг с другом. Волновая функция каждой частицы распределяется, условно говоря, сферическим образом, пока мы наконец не пронаблюдаем частицу и не зафиксируем конкретное направление, в котором она движется.

Если действительно провести этот эксперимент и посмотреть, в каких направлениях будут разлетаться электроны, то мы заметим кое-что важное. Поскольку изначально у электронов были равные скорости и противоположные направления движения, их суммарный импульс

был нулевым. А поскольку импульс сохраняется, то и после взаимодействия их суммарный импульс должен быть равен нулю. Таким образом, хотя нам и может казаться, что каждый из электронов может двигаться в любом направлении, на самом деле, в каком бы направлении ни двигался один из них – другой будет двигаться в строго противоположном.

Если призадуматься, то это довольно забавно. Для первого электрона существует вероятность отскочить под разными углами, и для второго тоже. И если бы у каждого из них была отдельная волновая функция, то эти возможности были бы совершенно не связаны друг с другом. Можно было бы представить, что мы наблюдаем всего один из электронов и измеряем, в каком направлении он движется. Второй электрон остается нетронут. Откуда ему «знать», что он должен двигаться в направлении, противоположном первому, когда мы начнем его измерять?

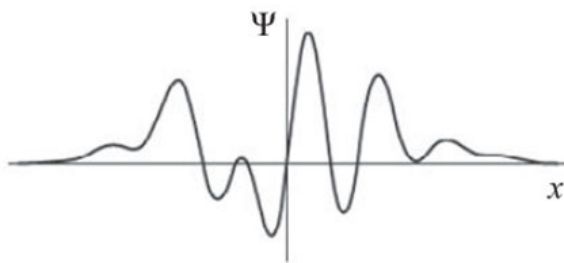
На этот вопрос мы уже ответили. Дело в том, что электроны не имеют двух отдельных волновых функций: их поведение описывается единой волновой функцией Вселенной. В данном случае мы игнорируем всю остальную Вселенную, сосредоточившись только на этих двух электронах. Но мы не можем игнорировать один электрон, сосредоточившись лишь на другом: прогнозы, которые мы делаем для наблюдения за любым из двух электронов, могут кардинально меняться в зависимости от исхода наблюдения за вторым. Электроны находятся в состоянии запутанности друг с другом.



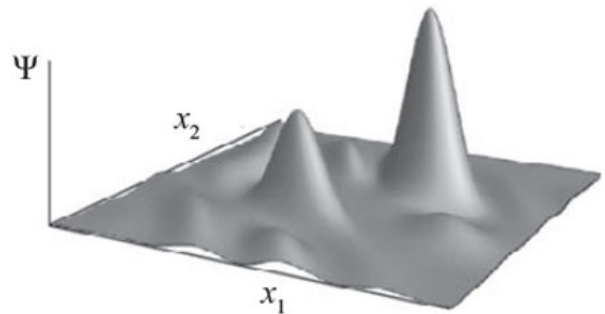
Волновая функция — это присваивание комплексного числа, амплитуды, любому возможному исходу наблюдения, и квадрат этой амплитуды равен вероятности того, что мы будем наблюдать данный результат, если сделаем такое измерение. Если речь идет о более чем одной частице, это означает, что мы присваиваем амплитуду каждому возможному результату наблюдения всех частиц одновременно. Например, если бы мы наблюдали их координаты, то волновую функцию Вселенной можно рассматривать как присвоение амплитуды каждой возможной комбинации координат всех частиц во Вселенной.

Напрашивается вопрос — а возможно ли визуализировать нечто подобное? Можно визуализировать простой случай, когда одиночная воображаемая частица перемещается всего в одном измерении. Допустим, это электрон, заключенный в тонком медном проводе: рисуем линию, которая соответствует возможным координатам этой

частицы, и чертим график функции, представляющей амплитуду в каждой точке этой линии. (На самом деле мы жульничаем даже в этом простом примере, так как откладываем на графике вещественные числа, а не комплексные, но пусть будет так.) Для двух частиц, ограниченных таким же одномерным движением, можно начертить двумерную плоскость, в которой будут представлены координаты каждой из двух частиц, а затем сделать трехмерный контурный график для волновой функции. Обратите внимание: речь идет не о единственной частице в двумерном пространстве, а о двух частицах, каждая из которых находится в одномерном пространстве, так что волновая функция, определенная на двумерной плоскости, описывает координаты обеих частиц.



Волновая функция для одной частицы с координатой  $x$



Волновая функция для двух частиц с координатами  $x_1, x_2$ .

Поскольку скорость света конечна, а с момента Большого взрыва прошло конечное количество времени, мы можем видеть лишь ограниченную область космоса, которую называем «наблюдаемая Вселенная». В наблюдаемой Вселенной примерно  $10^{88}$  частиц, в основном это фотоны и нейтрино. Это число гораздо больше двух. Причем каждая частица расположена в трехмерном пространстве, а не на одномерной линии. Как в таком мире предполагается визуализировать волновую функцию, присваивающую амплитуду каждой из возможных конфигураций  $10^{88}$  частиц, распределенных в трехмерном пространстве?

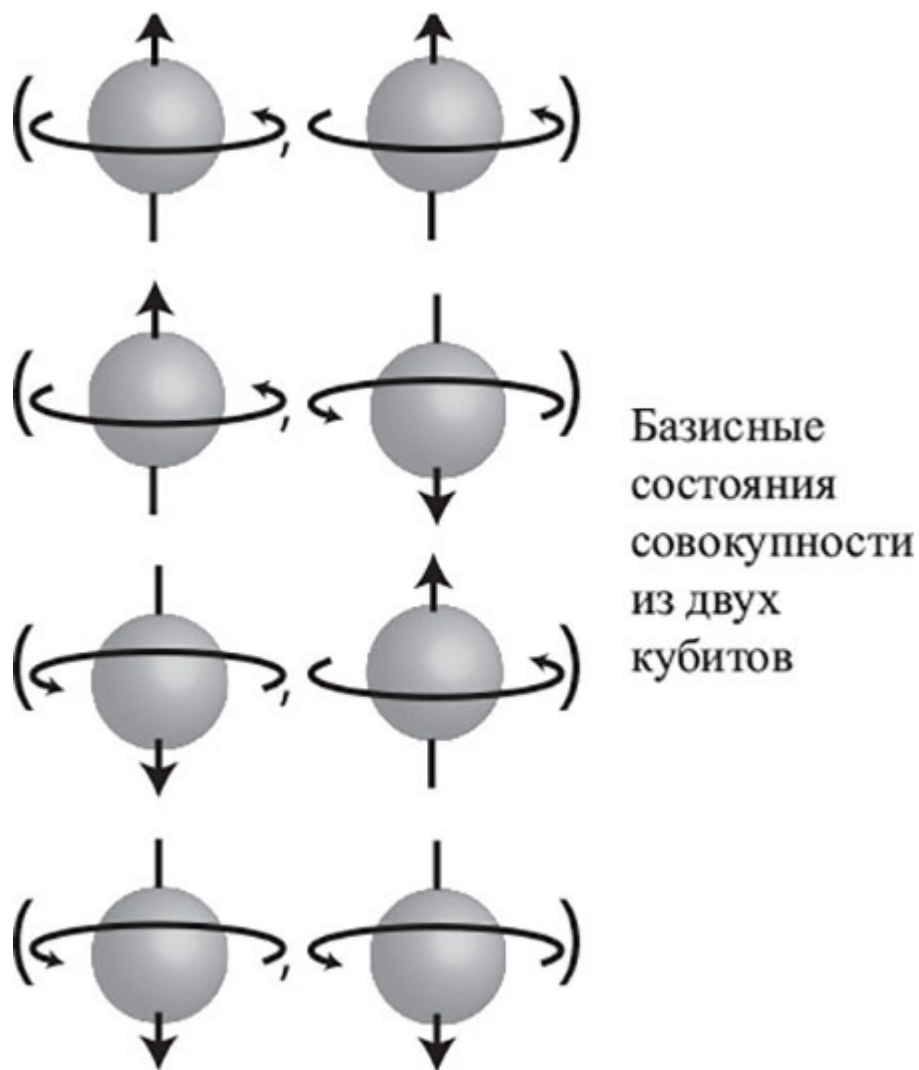
Мы не можем этого сделать, увы. Человеческое воображение не приспособлено для визуализации столь колоссальных математических пространств, работа с которыми в квантовой механике — в порядке

вещей. Но мы можем что-то сообразить для одной-двух частиц. Ко всему прочему, нам придется описывать эти феномены словами и уравнениями. К счастью, уравнение Шрёдингера прямо и определенно характеризует поведение волновой функции. Стоит нам понять, что происходит с двумя частицами, и обобщение этой картины до  $10^{88}$  частиц сведется к обычной математике.



Поскольку волновые функции так велики, может показаться, что работать с ними немного неудобно. К счастью, практически все интересное, что можно сказать о квантовой запутанности, сводимо к гораздо более простому контексту, описываемому всего несколькими кубитами.

Позаимствовав причудливую традицию из книг по криптографии, физики любят рассматривать двух людей по имени Алиса и Боб, которые делятся кубитами. Итак, допустим, у нас есть два электрона,  $A$  и  $B$ , первый из них принадлежит Алисе, второй – Бобу. Спины этих электронов образуют двухкубитную систему и описываются соответствующей волновой функцией. Волновая функция присваивает амплитуду каждой конфигурации системы в целом относительно какого-либо ее свойства, которое мы можем наблюдать, например вертикального спина. Итак, в данном случае у нас будет четыре возможных результата измерения: оба спина верхние, оба спина нижние, спин  $A$  верхний, а спин  $B$  нижний и спин  $A$  нижний, а спин  $B$  верхний. Состояние системы представляет собой некую суперпозицию четырех этих возможностей, которые являются ее базисными состояниями. Далее в каждой паре скобок первый спин принадлежит Алисе, а второй – Бобу.



Само наличие двух кубитов еще не означает, что они обязательно будут запутаны друг с другом. Рассмотрим одно из базисных состояний, например то, где у обоих кубитов верхние спины. Если Алиса измеряет свой кубит по оси ординат, то она с вероятностью пятьдесят на пятьдесят может получить правый или левый спин, и то же касается Боба. Однако в любом случае мы ничего не узнаем о том, что увидит Боб, если узнаем, что увидела Алиса. Вот почему зачастую мы говорим о «волновой функции частицы», хотя хорошо знаем – когда части системы не запутаны друг с другом, это равносильно тому, как если бы у каждой из них была собственная волновая функция.

Вместо этого давайте рассмотрим равную суперпозицию двух базисных состояний, в одном из которых оба спина верхние, а в другом



— нижние:

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{2}} (\uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow) + \sqrt{\frac{1}{2}} (\uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow)$$

Если Алиса измерит вертикальный спин своего электрона, то получит верхний или нижний спин с вероятностью, равной 50 %, и то же самое касается Боба. Разница теперь в том, что если мы узнаем результат Алисы прежде, чем Боб выполнит свое измерение, то результат Боба нам будет известен со 100 %-ной вероятностью: он увидит то же самое, что и Алиса. На языке академической квантовой механики можно сказать, что измерение, выполненное Алисой, заставляет волновую функцию сколлапсировать в одно из двух базисных состояний, из-за чего результат Боба оказывается детерминирован. (В многомировой интерпретации после Алисиного акта измерения волновая функция разветвляется, и получается два разных Боба, каждый из которых получит определенный результат измерения.) Это квантовая запутанность в действии.

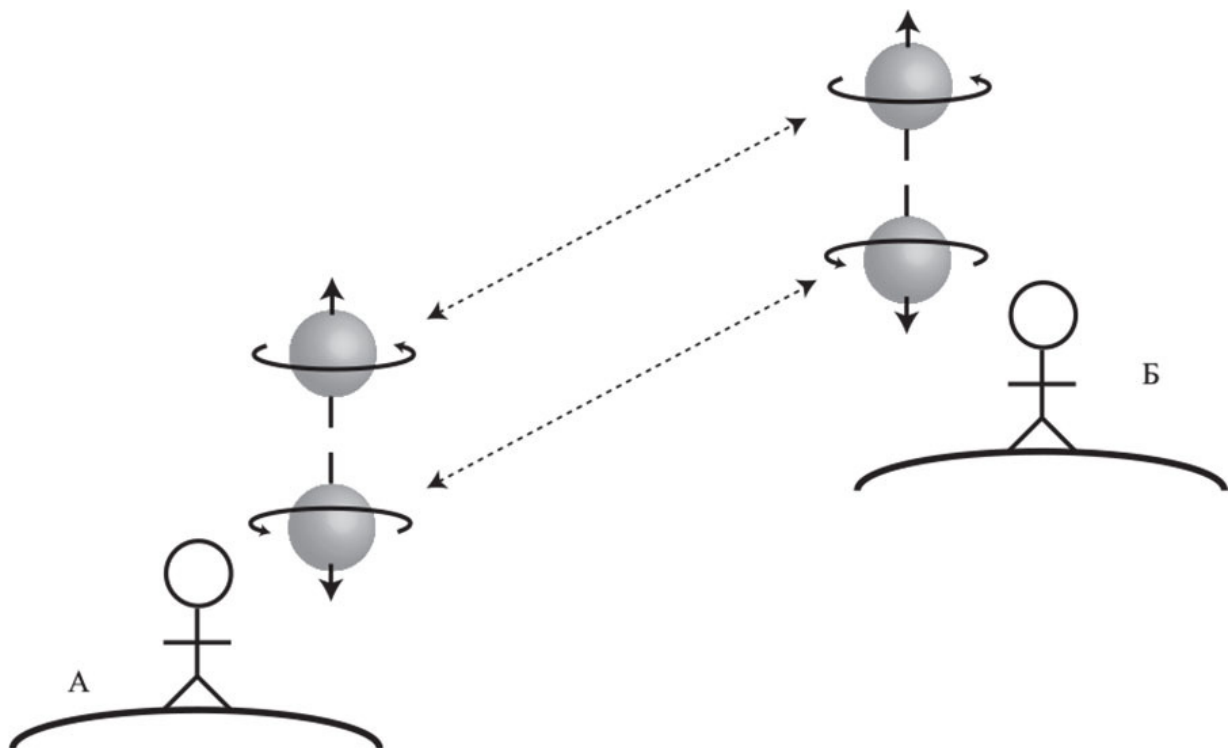


По итогам Сольвеевского конгресса 1927 года Эйнштейн остался убежден, что квантовая механика, особенно в интерпретации копенгагенской школы, очень хороша в прогнозировании результатов экспериментов, но совершенно не тянет на полноценную теорию физического мира. В 1935 году он изложил свои соображения в статье, написанной вместе с коллегами Борисом Подольским и Натаном Розеном, в результате чего статья получила известность под названием ЭПР (EPR). Позже Эйнштейн сказал, что основные идеи принадлежали ему, Розен занимался вычислениями, а Подольский выполнил большую часть работы над текстом.

В ЭПР рассматривались координаты и импульсы двух частиц, движущихся в противоположных направлениях, но нам будет удобнее

говорить о кубитах. Допустим, есть два спина в запутанном состоянии, описанном выше. (Такое состояние очень легко создать в лаборатории.) Алиса со своим кубитом остается дома, а Боб берет свой и отправляется с ним в долгое путешествие – допустим, прыгает в ракету и летит к Альфе Центавра, расположенной в четырех световых годах от нас. Запутанность между двумя частицами не ослабевает по мере того, как они удаляются друг от друга; пока ни Алиса, ни Боб не измеряют спины своих кубитов, общее квантовое состояние останется неизменным.

Как только Боб благополучно прибывает к Альфе Центавра, Алиса наконец измеряет спин своей частицы вдоль заранее оговоренной вертикальной оси. До этого измерения мы понятия не имели, каков будет результат измерения ее спина, – равно как и для спина Боба. Предположим, что Алиса наблюдает верхний спин. В таком случае, по правилам квантовой механики, мы сразу же узнаем, что и Боб зафиксирует верхний спин, как только соберется выполнить измерение.



Это странно. Тридцатью годами ранее Эйнштейн сформулировал правила специальной теории относительности, согласно которой ни один сигнал не может передаваться быстрее скорости света. И все же мы утверждаем, что исходя из правил квантовой механики измерение, выполняемое Алисой здесь и сейчас, оказывает непосредственное влияние на кубит Боба, даже если он находится на расстоянии четырех световых лет от нас. Как кубит Боба *узнает*, что кубит Алисы был измерен и каков был результат этого измерения? Это и есть то самое «жуткое дальное действие», о котором так незабываемо беспокоился Эйнштейн.

Но, возможно, все не так плохо, как кажется. Первое, о чем вы можете задуматься, узнав о «жутком дальном действии», так это можно ли использовать этот феномен для мгновенной коммуникации на больших расстояниях. Можем ли мы сконструировать телефон, действующий по принципу квантовой запутанности, для которого даже скорость света не является ограничением?

Нет, не можем. И даже наш простой пример служит тому подтверждением: если Алиса в результате измерения получает верхний спин, то она сразу же знает, что и Боб получит верхний спин, как только выполнит измерение. Но Боб этого не знает. Чтобы он узнал, каков спин его частицы, Алиса должна послать ему результат своего измерения обычной связью – и скорость передачи этой информации ограничена скоростью света.

Вы могли бы подумать, что здесь есть лазейка: что, если Алиса не просто измерит свой кубит и узнает случайный ответ, но преднамеренно добьется того, чтобы у нее получился именно верхний спин? Тогда Боб тоже получит верхний спин. Складывается впечатление, словно информация действительно была передана мгновенно.

Проблема в том, что не существует простого способа взять квантовую систему в суперпозиции и измерить ее таким образом, чтобы преднамеренно получить нужный нам ответ. Если Алиса просто измерит свой спин, то будет иметь дело с равновероятными вариантами, без всяких «и», «но» и «если». Но Алиса может подправить свой спин до измерения: сделать так, чтобы он находился не в суперпозиции, а стопроцентно был верхним. Например, она может выстрелить в свой электрон фотоном с ровно такими свойствами,

чтобы фотон не тронул электрон, если у того верхний спин, а если у того нижний спин – то обратил бы его в верхний. Теперь при измерении электрона Алисы определенно будет получен верхний спин. Но этот электрон больше не будет запутан с электроном Боба.

Квантовая запутанность перейдет на фотон, который окажется в суперпозиции состояний «не тронул электрон Алисы» и «столкнулся с электроном Алисы». На электрон Боба все это совершенно не повлияет, и при измерении его спина с вероятностью 50 % может быть обнаружен либо верхний, либо нижний спин, так что никакая информация передана не будет.

В этом заключается общая черта квантовой запутанности: так называемая *теорема о бессигнальности*, согласно которой пара запутанных частиц не может использоваться для передачи информации между двумя сторонами быстрее скорости света. Получается, что квантовая механика использует узкую лазейку, нарушая дух теории относительности (ничто не может перемещаться быстрее скорости света), но подчиняется ее букве (конкретные элементарные частицы, а также информация, которую они могли бы передавать, не в состоянии перемещаться быстрее скорости света).



Так называемый парадокс ЭПР (который на самом деле никакой не парадокс, а просто свойство квантовой механики) выходит за рамки обычного беспокойства по поводу «жуткого дальнего действия». Эйнштейн стремился показать не столько пугающую сторону квантовой механики, сколько ее неполноту, – по его мнению, квантовая механика была лишь полезным приближением некой всеобъемлющей, базовой модели.

Авторы ЭПР верили в принцип локальности – физические величины, описывающие природу, определяются в конкретных точках в пространстве-времени, а не распределены повсюду и непосредственно взаимодействуют лишь с другими физическими величинами, расположенными поблизости, а не на расстоянии. Другими словами, учитывая ограничение скорости света специальной теорией относительности, локальность, по-видимому, подразумевает,

что ничто из того, что мы можем сделать с частицей в одном месте, не может мгновенно повлиять на измерения, которые мы могли бы выполнить с другой частицей очень далеко.

На первый взгляд тот факт, что две сильно удаленные друг от друга частицы могут находиться в состоянии запутанности, подразумевает, что в квантовой механике нарушается принцип локальности. Но авторы ЭПР хотели подойти к этой проблеме основательно и установить, что не существует такого хитрого обходного маневра, благодаря которому все казалось бы локальным.

Они предложили следующий принцип: если у нас есть физическая система в заданном состоянии и измерение, которое мы можем произвести над данной системой со 100 %-ной уверенностью в результате, то мы ассоциируем *элемент реальности* с данным результатом измерения. В классической механике координата и импульс каждой частицы считаются элементами реальности. В квантовой механике, если у нас есть кубит в чистом состоянии верхнего спина, то есть элемент реальности, соответствующий вертикальному спину, однако не должно быть элемента реальности, который соответствовал бы горизонтальному спину, поскольку мы не знаем, какой результат получим, если измерим его. «Полная» теория в формулировке ЭПР – это такая теория, в которой каждому элементу реальности соответствует отдельный элемент данной теории. И по данному критерию, настаивали авторы ЭПР, квантовая механика не может считаться полной теорией.

Давайте вернемся к Алисе и Бобу с их запутанными кубитами и представим, что Алиса только что измерила вертикальный спин своей частицы, обнаружив, что этот спин верхний. Теперь мы знаем, что измерение, которое выполнит Боб, также даст верхний спин, даже если сам Боб этого не знает. Итак, в свете ЭПР с частицей Боба связан элемент реальности, согласно которому спин его частицы верхний. Речь не идет о том, что этот элемент реальности материализовался, когда Алиса выполнила свое измерение, так как частица Боба при этом находилась очень далеко, а согласно принципу локальности, элемент реальности должен находиться там же, где и частица, – причем он должен был находиться там все время.

Но теперь представьте, что Алиса вообще не измеряла спин по вертикальной оси, а вместо этого измерила его по горизонтальной.

Допустим, ее измерение показало для этой частицы правый спин. Состояние квантовой запутанности, из которого мы исходили, гарантирует, что Боб получит тот же результат, что и Алиса, независимо от того, в каком направлении она решит измерять спин своей частицы. Итак, мы знаем, что Боб тоже измерит правый спин, и, в свете трактовки ЭПР, здесь есть – и всегда был – элемент реальности, формулируемый как «кубит Боба будет иметь правый спин, если измерить его по горизонтальной оси».

Не существует способа, который позволил бы частице Алисы или Боба «заранее узнать», какое измерение выполнит Алиса. Следовательно, кубит Боба должен включать элементы реальности, которые бы гарантировали, что его спин окажется верхним, если будет измерен по вертикали, и правым, если будет измерен по горизонтали.

Именно этого не может произойти согласно принципу неопределенности. Если вертикальный спин точно определен, то горизонтальный спин совершенно неизвестен, и наоборот – по крайней мере, в соответствии с общепринятыми правилами квантовой механики. В квантовом формализме нет ничего, что позволяло бы одновременно определить и вертикальный, и горизонтальный спины. Следовательно, ЭПР приходят к триумфальному выводу, что чего-то тут не хватает – квантовая механика не может быть исчерпывающим описанием физической реальности.

Статья ЭПР вызвала бурный интерес даже за пределами профессионального сообщества. Газета «Нью-Йорк Таймс», журналисты которой смогли разговаривать Подольского, вышла со статьей об этих идеях на первой полосе. Это возмутило Эйнштейна, в ответ он написал суровое письмо, которое было опубликовано в «Таймс». В этом письме Эйнштейн осуждал преждевременное обсуждение научных результатов в светской прессе. Говорят, что после того случая он больше никогда не разговаривал с Подольским.

# **EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY**

**Scientist and Two Colleagues  
Find It Is Not 'Complete'  
Even Though 'Correct.'**

**SEE FULLER ONE POSSIBLE**

**Believe a Whole Description of  
'the Physical Reality' Can Be  
Provided Eventually.**

*Источник: «Википедия»*

Реакция профессиональных ученых последовала незамедлительно. Нильс Бор быстро написал ответ на статью ЭПР, в котором, как заявляли многие физики, разрешил все загадки. Правда, не совсем понятно, каким образом: без всяких сомнений, Бор был блестящим мыслителем, но, по своему же собственному признанию, никогда не отличался ясностью изложения мыслей. Его статья пестрела формулировками в духе «на данном этапе возникает принципиальная проблема, связанная с влиянием конкретных условий, определяющих возможные типы прогнозов, касающихся последующего поведения системы». В общем виде его аргументация сводилась к тому, что мы не должны приписывать элементы реальности системам, не принимая во внимание то, как эти системы будут наблюдаться. По-видимому, Бор

полагал: реальность того или иного феномена зависит не только от того, что мы измеряем, но и от того, как мы проводим это измерение.



Эйнштейн и его коллеги изложили то, что они считали разумными критериями для физической теории – локальность и соотнесение элементов реальности с величинами, поддающимися детерминированному прогнозированию, – и показали, что квантовая механика с этими критериями несовместима. Однако они не делали вывода об ошибочности квантовой механики, а говорили лишь о ее неполноте. Оставалась надежда, что со временем мы найдем теорию получше, которая будет и локальной, и соотносимой с реальностью.

Эту надежду окончательно растоптал Джон Стюарт Белл, физик из Северной Ирландии, работавший в лаборатории ЦЕРН в швейцарской Женеве. Он заинтересовался основами квантовой механики в 1960-х, как раз в тот период в истории физики, когда считалось абсолютно неподобающим размышлять о таких вещах. Сегодня теорема Белла о квантовой запутанности считается одним из важнейших достижений физики.

Эта теорема предлагает нам вновь вернуться к Алисе и Бобу, а также к их запутанным кубитам с ориентированными спинами. (Сегодня такие квантовые состояния называются *состояниями Белла*, хотя загадку ЭПР в этих терминах впервые концептуализировал Дэвид Бом. Предположим, что Алиса измеряет у своей частицы вертикальный спин и выясняет, что он – верхний. В соответствии с обычными правилами квантовой механики, мы знаем, что если Боб решит измерить горизонтальный, а не вертикальный спин, то с вероятностью 50/50 получит левый или правый спин. Можно сказать, что если Боб измерит вертикальный спин, то корреляция между его и Алисиными результатами составит 100 % (мы точно знаем, что у него получится), тогда как если он измерит горизонтальный спин, то корреляция составит 0 % (мы не представляем, что у него получится).

Итак, что же будет, если Боб, соскучившись в полном одиночестве на космическом корабле, кружащем по орбите Альфы Центавра, решит измерить спин не по горизонтали и не по вертикали, а по какой-нибудь



промежуточной оси между ними? (Для удобства предположим, что Алиса и Боб поделились множеством запутанных пар Белла, поэтому могут снова и снова проводить свои измерения, а нас интересует лишь то, что будет, когда Алиса наблюдает верхний спин.) В таком случае Боб (как правило, но не всегда) будет наблюдать спин, сориентированный по оси, максимально близкой к вертикальному направлению «вверх». На самом деле мы можем посчитать: если ось Боба расположена под углом 45 градусов, то между его результатами и результатами Алисы будет 71 %-ная корреляция (это частное от деления единицы на квадратный корень из двух, если вам интересно, откуда взялось такое число).

Белл показал, что при некоторых внешне разумных допущениях данный квантовомеханический прогноз невозможно воспроизвести ни в одной локальной теории. Фактически он доказал строгое неравенство: максимум, чего можно достичь без какого-либо жуткого дальнего действия, — это добиться 50 %-ной корреляции между измерениями Алисы и Боба, если измеряемые ими системы были повернуты на 45 градусов. Квантовый прогноз о 71 %-ной корреляции нарушает неравенство Белла. Существует явная, неоспоримая разница между мечтой о простой основополагающей локальной динамике и реальными прогнозами квантовой механики.



Полагаю, сейчас вы думаете про себя: «Эй, что значит “внешне разумные допущения”? Говорите как есть, а там я уж сам решу, что мне кажется разумным, а что нет».

Вполне справедливо. В частности, теорема Белла включает два допущения, в которых можно усомниться. Первое заключается в простой идее, что Боб «решает» измерить спин своего кубита вдоль определенной оси. По-видимому, в нашу теорему о квантовой механике просочился фактор человеческого выбора или свободной воли. Конечно, едва ли этот случай уникален: ученые всегда полагали, что вправе измерять все, что им заблагорассудится. Но в каком-то смысле это просто фигура речи, ведь сами ученые тоже состоят из частиц и сил и подчиняются законам физики. Таким образом, мы

можем вообразить, что прибегаем к *супердетерминизму* – идее о том, что истинные законы физики в высшей степени детерминированы (ни для каких случайностей нет места) и, более того, что исходные условия Вселенной были заложены при Большом взрыве именно таким образом, что определенные «варианты» никогда не могут быть выбраны. Тогда вполне вероятно, что кто-то изобрел бы совершенно локальную супердетерминистическую теорию, которая имитировала бы предсказания квантовой запутанности просто потому, что Вселенная была заранее предопределена быть такой, какая она есть. Сама мысль об этом малоприятна для большинства физиков. Ведь если бы вам удалось настолько тонко настроить свою теорию, то, в принципе, она могла бы дать вам любой желаемый результат, а в таком случае какой вообще смысл заниматься физикой? Но некоторые умные люди являются сторонниками этой идеи.

Другое потенциально сомнительное допущение на первый взгляд кажется непротиворечивым: измерения дают определенный результат. Наблюдая спин частицы, вы получите точный результат – верхний или нижний спин вдоль той оси, относительно которой вы будете его измерять. Кажется логичным, правда?

Но подождите. Ведь нам хорошо известна теория, где измерения не дают определенных результатов, – это строгая эвереттовская квантовая механика. В рамках этой теории попросту неверно, что, измерив спин электрона, мы получим в результате либо верхний, либо нижний спин; в одной ветви волновой функции у нас может получиться верхний спин, а в другой – нижний. Это не означает, что в многомировой интерпретации теорема Белла не соблюдается: математические теоремы безусловно верны, если учитывать их допущения. Просто речь о том, что в данном случае эта теорема неприменима. Результат Белла не подразумевает, что мы должны включать в эвереттовскую квантовую механику жуткое дальное действие, как это делается в старых и скучных теориях единого мира. Корреляции возникают не потому, что некоторое воздействие передается быстрее скорости света, а из-за ветвления волновой функции на разные миры, в которых происходят коррелирующие явления.

Если вы исследователь основ квантовой механики, то важность теоремы Белла для вашей работы зависит от того, что именно вы пытаетесь сделать. Если вы посвятили себя задаче изобрести новую

версию квантовой механики с нуля, в которой измерения действительно имеют определенные результаты, то неравенство Белла – самый важный ориентир, о котором вам стоит помнить. С другой стороны, если вас устраивает многомировая интерпретация и вы пытаетесь разгадать, как эта теория проецируется на наблюдаемые нами феномены, то результат неравенства Белла непосредственно проистекает из базовых уравнений, а не является еще одним ограничением, о котором вам стоит беспокоиться.

Одна из самых потрясающих сторон теоремы Белла заключается в том, что она превращает предполагаемую «жуткость» квантовой запутанности в прямой экспериментальный вопрос – проявляет ли природа однозначно нелокальные корреляции между сильно удаленными частицами или нет? Думаю, вы будете рады услышать, что соответствующие эксперименты уже проводились и прогнозы квантовой механики блестяще подтверждались в каждом из них. В популярных СМИ любят захватывающие дух заголовки вроде: «Квантовая реальность оказалась причудливее, чем считалось ранее!». Но если вы внимательно прочтете подобную статью, то окажется, что был проведен еще один эксперимент, в точности подтвердивший прогнозы квантовой механики, опирающейся на теорию, которая была сформулирована еще в 1927-м или, самое позднее, в 1935 году. Сейчас мы понимаем квантовую механику несравнимо лучше, чем тогда, но сама теория не изменилась.

В данном случае я не хочу сказать, что эксперименты не важны или не впечатляют, – и важны, и впечатляют. Проблема при проверке прогнозов Белла заключается, например, в следующем: мы пытаемся убедиться, что дополнительные корреляции, прогнозируемые квантовой механикой, не могут объясняться какими-то хитрыми классическими корреляциями, известными ранее. Откуда нам знать, не повлияло ли какое-то скрытое событие из прошлого на то, как мы решим измерить наш спин, или на то, каков будет результат измерения, или и на то и на другое сразу?

Физики проделали большой путь, чтобы исключить такие возможности, и выполнение «тестов Белла без всяких лазеек» превратилось в целое ремесло. Так, недавно был получен результат, призванный исключить возможность какого-либо неизвестного процесса в лаборатории влиять на способ измерения спина. Поэтому

выбор эксперимента не доверили ни лаборанту, ни человеку за соседним столом, который мог бы воспользоваться генератором случайных чисел: его выбирали в зависимости от поляризации фотонов, излученных звездами, находящимися на расстоянии многих световых лет от нас. Если и имел место какой-то гнусный заговор с целью выставить мир полностью квантовомеханическим, то он должен был состояться сотни лет назад, когда эти фотоны только начинали свой путь. Такое возможно, но маловероятно.

Похоже, что квантовая механика вновь оказалась права. До сих пор квантовая механика всегда оказывалась права.

# **Часть II**

## **Расщепление**

## 6

### **Расщепление Вселенной** *Декогеренция и параллельные миры*

Вышедшая в 1935 году статья о квантовой запутанности под авторством Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР) и реакция на нее Нильса Бора были последними громкими отзвуками в серии дебатов Бора и Эйнштейна об основах квантовой механики. Эти двое начали переписываться по поводу квантовой механики вскоре после того, как в 1913 году Бор предложил свою концепцию квантованных орбит электронов, а кульминации их спор достиг в 1927 году на Сольвеевском конгрессе. Согласно популярной версии событий, у Эйнштейна были некоторые возражения относительно быстро набирающего силу Копенгагенского консенсуса, и он изложил их Бору на семинаре. Весь вечер Бор провел за обдумыванием этих возражений, а потом за завтраком триумфально парировал их перед пристыженным Эйнштейном. Нам говорят, что Эйнштейн просто не смог примириться с принципом неопределенности, и вспоминают его афоризм о том, что Бог не играет в кости.

На самом деле все было не так. Эйнштейна беспокоила прежде всего не случайность, а реализм и локальность. Его решимость спасти эти принципы достигла кульминации в статье ЭПР и в заявлении о том, что квантовая механика, должно быть, неполна. Однако к тому моменту он уже проиграл битву на пиар-фронте: физики во всем мире приняли копенгагенскую интерпретацию квантовой механики, стали использовать ее для решения технических задач в атомной и ядерной физике, а также в зарождающихся дисциплинах физики частиц и квантовой теории поля. Следствия из статьи ЭПР как таковой были в основном проигнорированы физическим сообществом. Попытки бороться с нестыковками в самом сердце квантовой теории, а не работа над более насущными физическими проблемами стали восприниматься как дело несколько эксцентричное. Занятие, которому могут посвятить себя некогда продуктивные физики, достигшие почтенного возраста и готовые отойти от серьезных дел.

В 1933 году Эйнштейн покинул Германию и поступил на работу в только что образованный Институт перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси, где и провел всю оставшуюся жизнь до 1955 года. После 1935 года его исследования были в основном сосредоточены на общей теории относительности и поисках единой теории гравитации и электромагнетизма, но он никогда не переставал думать о квантовой механике. Время от времени Бор посещал Принстон, и они с Эйнштейном возвращались к своим беседам.

Джон Арчибальд Уилер поступил на работу на физический факультет Принстонского университета в качестве ассистента профессора в 1934 году. Корпус факультета располагался на одной улице с институтом Эйнштейна. Позже Уилер прославился как один из крупнейших в мире экспертов по общей теории относительности — именно он популяризовал термины «черная дыра» и «червоточина». Но в начале карьеры он сосредоточился на изучении квантовых проблем. В течение недолгого времени он учился в Копенгагене у Бора, а в 1939 году он в соавторстве с Бором опубликовал одну из первых статей, посвященных делению ядра. Уилер восхищался Эйнштейном, но Бора он почитал. Как он выразился впоследствии: «Ничто так не убедило меня в том, что в человеческом роду есть представители, сравнимые своей мудростью с Конфуцием и Буддой, Иисусом и Периклом, Эразмом и Линкольном, как прогулки и разговоры в тени берез в лесу Клампенбург в обществе Нильса Бора».

Вклад Уилера в физику является весьма многосторонним. В частности, он был наставником талантливых аспирантов, среди которых оказались будущие нобелевские лауреаты Ричард Фейнман и Кип Торн. Был среди его учеников и Хью Эверетт III, предложивший радикально новый подход к пониманию основ квантовой механики. Мы уже вкратце охарактеризовали его основную идею: волновая функция есть отражение реальности, она гладко и непрерывно эволюционирует, и в момент квантового измерения эта эволюция приводит к возникновению множества отдельных миров, — но теперь у нас есть инструментарий, позволяющий сделать это правильно.



Гипотеза Эверетта, которая в результате легла в основу его диссертации, защищенной в 1957 году в Принстоне, может считаться чистейшим воплощением одного из любимых принципов Уилера, согласно которому теоретическая физика должна быть «радикально консервативной». Идея Уилера состоит в том, что успешной может считаться лишь такая физическая теория, которая подтверждена экспериментальными данными, но только в режимах, которые достижимы при постановке эксперимента. Под консервативностью понимается то, что нужно исходить из тех теорий и принципов, успешность которых уже доказана, а не вводить произвольно какие-то новые подходы там, где встречаются новые феномены. Теория также должна быть радикальной в том смысле, что прогнозы и следствия наших теорий должны всерьез восприниматься и в режимах далеко за пределами тех, что использовались в экспериментах. Фразы «нужно исходить» и «всерьез восприниматься» здесь крайне важны: конечно, новые теории оправданы, когда старые явно противоречат полученным данным, и тот факт, что прогноз воспринимается всерьез, не означает, что его не следует пересматривать в свете новой информации. Но философия Уилера заключалась в том, что начинать нужно осмотрительно, взяв за основу те аспекты природы, которые, как нам кажется, мы понимаем, а затем действовать смело, экстраполируя наши лучшие идеи до самых дальних закоулков Вселенной.

Отчасти Эверетта вдохновляли поиски квантовой гравитации, которой незадолго до этого заинтересовался Уилер. Остальная часть физики – материя, электромагнетизм, ядерные взаимодействия, – кажется, вполне укладывается в рамки квантовой механики. Но гравитация была (и остается) упрямым исключением. В 1915 году Эйнштейн предложил общую теорию относительности, согласно которой само пространство-время является динамической сущностью, чьи изгибы и искривления мы воспринимаем как силу гравитации. Но общая теория относительности – целиком классическая, в ней есть аналоги координаты и импульса для кривизны пространства-времени, и нет никаких ограничений для их измерения. Оказалось, что взять эту теорию и «проквантовать» ее, то есть создать теорию волновых функций пространства-времени, в противовес классическим представлениям о пространстве-времени, довольно сложно.





*Хью Эверетт III (фото публикуется с разрешения архива Хью Эверетта III в Калифорнийском университете, Ирвайн, и Марка Эверетта)*

С квантовой гравитацией связаны как технические сложности — вычисления обычно разбухают и приводят к огромным значениям в ответе, — так и концептуальные. Даже в квантовой механике, в которой бывает невозможно указать, где именно находится заданная частица, понятие «точки в пространстве» является совершенно определенным. Можно указать конкретное местоположение и поставить вопрос, какова вероятность найти частицу поблизости. Но если реальность состоит не из материи, распределенной в пространстве, а представляет

собой квантовую волновую функцию, описывающую суперпозиции различных возможных пространств-времен, то как мы вообще можем спросить, «где» наблюдается конкретная частица?

Загадки только усложняются, если обратиться к проблеме измерения. К 1950-м годам позиция копенгагенской школы оформилась в доктрину, и физики примирились с идеей о том, что при акте измерения происходит коллапс волновой функции. Они даже согласились рассматривать процесс измерения как фундаментальную составляющую нашего лучшего описания природы. Или по крайней мере, не слишком об этом беспокоиться.

Но что делать, если рассматриваемая квантовая система – это целая Вселенная? В копенгагенском подходе критически важно разграничение между измеряемой квантовой системой и классическим наблюдателем, который выполняет измерение. Если система – это вся Вселенная, то все мы находимся в ней; нет никакого внешнего наблюдателя, к которому можно было бы апеллировать. Годы спустя Стивен Хокинг и другие ученые принялись изучать квантовую космологию, чтобы обсудить, как в самодостаточной Вселенной мог наступить самый первый момент времени, предположительно тот, в который произошел Большой взрыв.

В то время как Уилер и другие размышляли о технических проблемах квантовой гравитации, Эверетт увлекся этими концептуальными проблемами – особенно тем, как быть с измерениями. Ростки многомировой интерпретации проклюнулись в ходе затянувшейся за полночь дискуссии, состоявшейся в 1954 году. Тогда Эверетт беседовал с молодыми коллегами-физиками: Чарльзом Мизнером (также учеником Уилера) и Оге Петерсеном (ассистентом Бора, приехавшим из Копенгагена). Все участники сошлись во мнении, что по этому случаю было выпито изрядное количество хереса.

Очевидно, рассуждал Эверетт, если мы собираемся говорить о Вселенной в терминах квантовой теории, мы не можем выделить отдельную классическую область. Каждую часть Вселенной потребуется рассматривать согласно правилам квантовой механики, то же касается и наблюдателей внутри нее. Будет всего одно квантовое состояние, описываемое (термин предложил Эверетт) «универсальной волновой функцией» (а мы называем ее «волновой функцией Вселенной»).

Если все в мире квантовое, а Вселенная описывается единой волновой функцией, то как же должно происходить измерение? По всей видимости, полагал Эверетт, измерение происходит, когда одна часть Вселенной каким-то подходящим образом взаимодействует с другой ее частью. Он отметил, что подобное должно происходить автоматически, просто в силу эволюции волновой функции согласно уравнению Шрёдингера. Нам вообще не требуется изобретать никаких специальных правил измерения, ведь физические контакты происходят постоянно.

Именно поэтому, подготовив работу на эту тему, Эверетт назвал ее «Формулировка квантовой механики через “соотнесенные состояния”». Когда измерительный прибор взаимодействует с квантовой системой, они оказываются в состоянии запутанности друг с другом. Здесь нет никаких коллапсов волновой функции или классических областей. Сам прибор эволюционирует в суперпозицию, запутываясь с состоянием наблюдаемого предмета. Определенный с виду результат измерения («у электрона верхний спин») справедлив только по отношению к конкретному состоянию аппарата («я измерил спин электрона и узнал, что он верхний»). Другие возможные результаты экспериментов по-прежнему существуют и совершенно реальны, но относятся к другим мирам. Все, что от нас требуется – набраться смелости и признать то, о чем квантовая механика «пытается рассказать» нам с самого начала.

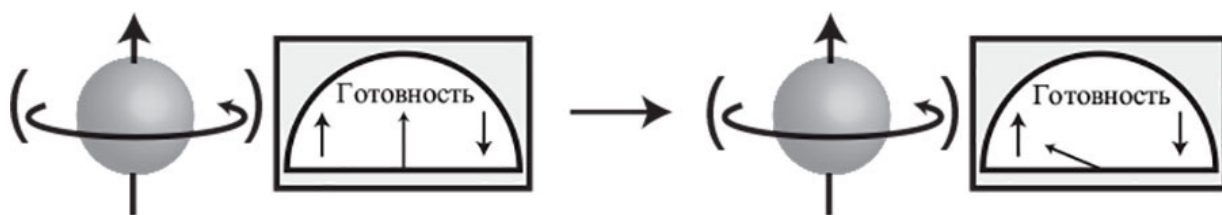


Давайте подробнее проговорим о том, что именно происходит в момент измерения, согласно теории Эверетта.

Допустим, у нас есть вращающийся электрон, который можно наблюдать в состоянии либо верхнего, либо нижнего спина относительно некоторой выбранной оси. До измерения электрон обычно находится в некоторой суперпозиции верхнего и нижнего спинов. Также у нас есть измерительный прибор, который сам является полноценной квантовой системой. Представьте, что она может находиться в суперпозиции трех разных возможностей: в ней может быть измерен верхний спин, в ней может быть измерен нижний

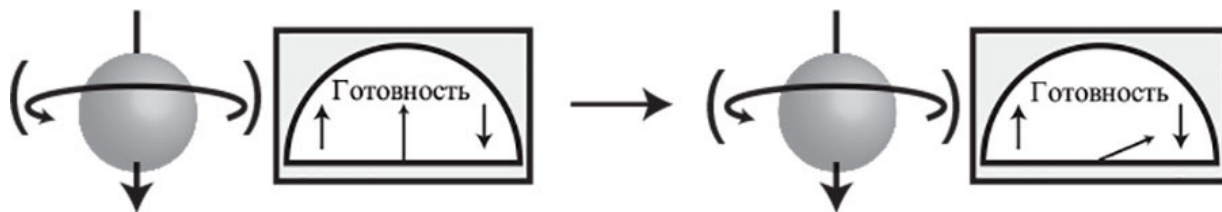
спин либо спин может быть еще не измерен – последняя ситуация называется состоянием «готовности».

Тот факт, что измерительный прибор работает, говорит нам о том, как совместное состояние комбинированной системы «спин + измерительный прибор» эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера. А именно, если начать с прибора в состоянии готовности и электрона в чистом состоянии верхнего спина, то состояние прибора гарантированно эволюционирует в чистое состояние «измерен верхний спин»:



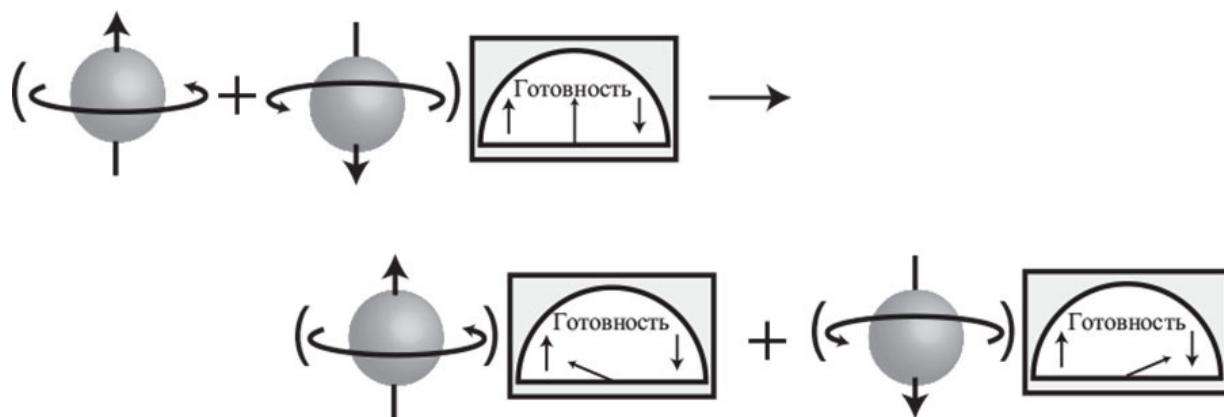
Исходное состояние слева можно трактовать как: «верхний спин, прибор в состоянии готовности», тогда как состояние справа, где индикатор показывает на стрелку вверх, означает: «верхний спин, прибор измерил его и показал, что он верхний».

Аналогично возможность успешно измерить чистый нижний спин подразумевает, что прибор должен перейти из состояния «готовности» в состояние «измерен нижний спин»:



Естественно, мы хотим понять, что происходит, когда изначально спин находится не в чисто верхнем и не в чисто нижнем состоянии, а в некоторой суперпозиции обоих. Хорошая новость: нам уже известно все для этого необходимое. Правила квантовой механики ясны: если вы знаете, как эволюционирует система, начиная с двух разных состояний, то эволюция суперпозиции обоих этих состояний будет

просто суперпозицией двух эволюций. Иными словами, имея в начале эксперимента спин в некоторой суперпозиции и измерительное устройство в состоянии готовности, получаем:



Итоговое состояние теперь представляет собой запутанную суперпозицию: спин верхний и измерен как верхний, плюс спин нижний и измерен как нижний. В этот момент уже не вполне корректно говорить: «спин находится в суперпозиции» или «прибор находится в суперпозиции». Запутанность не позволяет нам говорить о волновой функции спина или волновой функции устройства по отдельности, так как наблюдаемое состояние одного из этих компонентов может зависеть от того, в каком состоянии мы наблюдаем второй. Единственное, что мы можем сказать: «система «спин + прибор» находится в суперпозиции».

Это конечное состояние является ясной, однозначной, определенной и конечной волновой функцией для комбинированной системы «спин + прибор», если все, что мы делаем с системой, это преобразуем ее в соответствии с уравнением Шрёдингера. В этом и заключается секрет эвереттовской квантовой механики. Уравнение Шрёдингера предписывает, что состояние точного измерительного прибора постепенно эволюционирует в макроскопическую суперпозицию, которую мы в конечном итоге интерпретируем как разветвление на отдельные миры. Мы не привносим миры в эту картину – они существовали всегда, и уравнение Шрёдингера неизбежно делает их реальными. Проблема в том, что в воспринимаемой нами реальности

нам не попадаются суперпозиции, в которые были бы вовлечены крупные макроскопические объекты.

Традиционный способ обойти эту проблему – всячески выкручиваться с правилами квантовой механики. Согласно одним подходам, уравнение Шрёдингера применимо не всегда, другие трактовки таковы, что кроме волновой функции требуется учитывать иные переменные. Копенгагенская интерпретация с самого начала запрещает считать измерительный прибор частью квантовой системы, а коллапс волновой функции трактует как отдельный способ эволюции квантового состояния. Так или иначе, все подходы сопряжены с ухищрениями, лишь бы не считать суперпозиции, подобные вышеописанной, истинным и полным описанием природы. Как впоследствии выразился Эверетт, «Копенгагенская интерпретация безнадежно неполна, поскольку априори опирается на классическую физику... кроме того, со своей концепцией “реальности” макроскопического мира и отказом в ней миру микрокосмоса она чудовищна в философском отношении».

Эверетт предлагал простой выход: прекратить изворачиваться. Принять ту реальность, которая раскрывается в уравнении Шрёдингера. Обе части конечной волновой функции действительно существуют. Они просто описывают отдельные, более никогда не пересекающиеся миры.

Эверетт не привносил в квантовую механику ничего нового, а, напротив, удалил некоторые избыточные громоздкие части ее формализма. По выражению физика Теда Банна, любая неэвереттовская версия квантовой механики – это теория об «исчезающих мирах». Если вас не устраивает множественность миров, то придется повозиться либо с природой квантовых состояний, либо с их обычной эволюцией, чтобы от этих миров избавиться. Стоит ли игра свеч?



Здесь назревает вопрос. Нам известно, как волновые функции представляют суперпозиции различных возможных результатов измерений. Волновая функция электрона может поместить его в

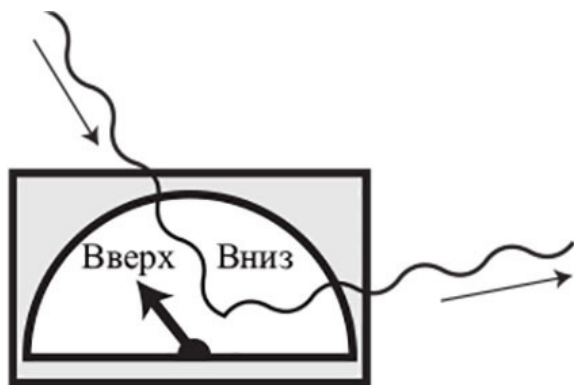
суперпозицию различных возможных координат, а также в суперпозицию верхнего и нижнего спинов. Но у нас не возникает искушения сказать, что каждое из слагаемых суперпозиции существует в отдельном «мире». Действительно, такое утверждение было бы непоследовательным. Электрон, находящийся в чистом состоянии верхнего спина по вертикальной оси, находится в суперпозиции верхнего и нижнего спинов относительно горизонтальной оси. Сколько же миров описывает такая волновая функция – один или два?

Эверетт подумал, что логически непротиворечиво предположить следующее: суперпозиции, в которые вовлечены макроскопические объекты, описывают разные миры. Но на тот момент, когда он это писал, у физиков еще не было достаточного технического оснащения, чтобы эта идея могла оформиться окончательно. Понимание пришло позже, когда удалось осмыслить феномен под названием «декогеренция». Идея декогеренции, предложенная в 1970 году немецким физиком Хансом Дитером Цехом, заняла центральное место в представлениях ученых о квантовой динамике. Для современного эвереттианца декогеренция – абсолютно необходимый элемент для осмысления квантовой механики. Она раз и навсегда объясняет кажущийся «коллапс» волновой функции при измерении квантовых систем – а также что на самом деле представляет собой «измерение».

Мы знаем, что существует всего одна волновая функция – волновая функция Вселенной. Но говоря об отдельных микроскопических частицах, мы учитываем, что они могут оказаться в таких квантовых состояниях, которые не будут запутаны со всем остальным миром. В таких случаях разумно говорить о «волновой функции данного конкретного электрона» и так далее, держа в уме, что это всего лишь удобное упрощение, допустимое при изучении систем, не запутанных с чем-либо еще.

С макроскопическими объектами все не так просто. Рассмотрим наш аппарат для измерения спина и предположим, что мы поместили его в суперпозицию, измерив верхний и нижний спины. На циферблате этого прибора есть стрелка, указывающая либо вверх, либо вниз. Подобный аппарат не отделен от всего остального мира. Даже если кажется, что он просто стоит на месте, в него постоянно врезаются молекулы воздуха, от него отскакивают фотоны видимого света и так далее. Назовем прочую материю – то есть всю остальную Вселенную –

средой. В обычных ситуациях невозможно предотвратить взаимодействие макроскопического объекта с окружающей средой, даже если делать все очень аккуратно. Вследствие этих взаимодействий аппарат оказывается запутан с окружающей средой: например, фотон отразится от него, если стрелка будет в одном положении, но будет поглощен, если стрелка будет указывать куда-то еще.

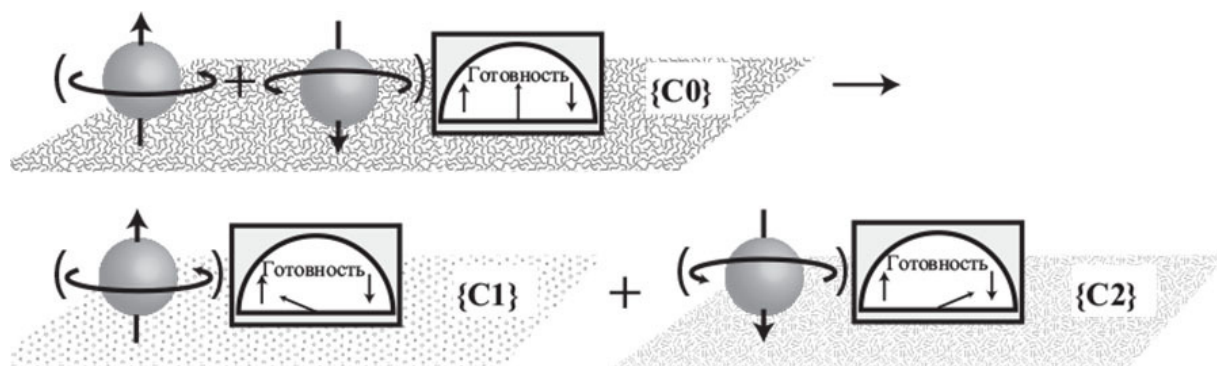


Фотон отражается от циферблата



Фотон поглощен стрелкой

Таким образом, волновая функция, записанная выше, где аппарат был запутан с кубитом, не отражала всю ситуацию целиком. Заключив состояния среды в фигурные скобки, мы должны были бы записать:



В данном случае не важно, каковы именно состояния окружающей среды, поэтому мы изобразили их как разный фон и обозначили  $\{C0\}$ ,  $\{C1\}$  и  $\{C2\}$ . Мы не будем (и как правило, не сможем) отслеживать, что именно происходит в среде, — это слишком сложно. Дело не



ограничивается тем, что единственный фотон по-разному взаимодействует с разными компонентами волновой функции аппарата, – фотонов будет огромное множество. Никто не может отследить действия каждого фотона и каждой частицы в комнате.

Этот простой процесс – когда макроскопические объекты запутываются с окружающей средой, которую мы не можем отследить, – и называется декогеренцией, следствия которой меняют всю Вселенную. Декогеренция вызывает разделение, или *ветвление*, волновой функции на множество миров. Любой наблюдатель разделяется на множество копий вместе со всей остальной Вселенной. После каждого ветвления каждый из таких «клонов» наблюдателя оказывается в мире, где измерение привело к некоторому конкретному результату. Всем клонам *кажется*, что волновая функция сколлапсировала. Но мы-то знаем, что коллапс кажущийся и обусловлен декогеренцией, приводящей к разветвлению волновой функции.

Мы не знаем, как часто происходит ветвление и разумно ли вообще задавать этот вопрос. Все зависит от того, конечно или бесконечно число степеней свободы во Вселенной, и на этот вопрос фундаментальная физика сегодня ответа не дает. Но мы знаем, что ветвление происходит очень активно: оно случается всякий раз, когда квантовая система, находящаяся в суперпозиции, запутывается с окружающей средой. В теле человека каждую секунду происходит радиоактивный распад примерно 5000 атомов. Если при каждом акте распада волновая функция делится надвое, это означает, что каждую секунду возникает  $2^{5000}$  новых ветвлений. Это чрезвычайно много.



Все-таки что же такое «мир»? Мы только что записали всего одно квантовое состояние, описывающее спин, аппарат и окружающую среду. Почему мы говорим, что это состояние описывает два мира, а не один?

Хорошо бы, чтобы в одном мире соблюдалось следующее условие: его разные части, по крайней мере, могут влиять друг на друга. Рассмотрим такой сценарий «призрачного мира» (не как описание

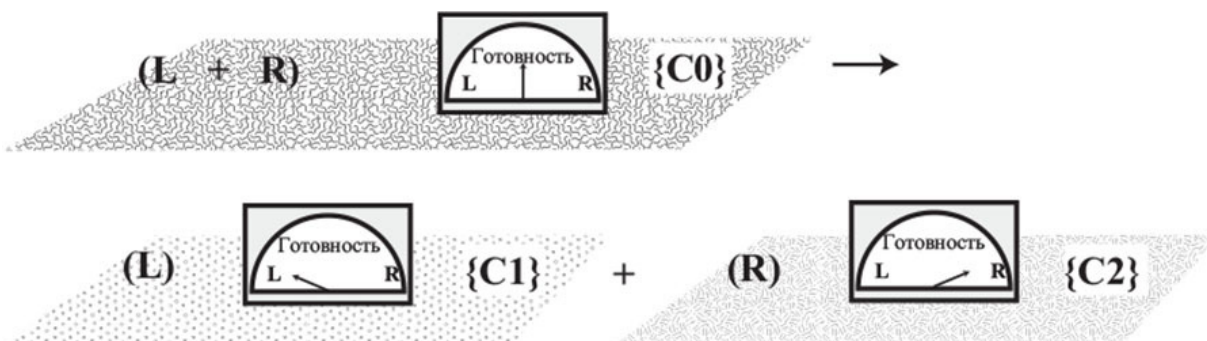
реальности, а в качестве запоминающейся аналогии): умирая, любое существо превращается в призрак. Эти призраки могут видеть друг друга и общаться друг с другом, но не могут видеть нас и говорить с нами – то же касается и нас. Они живут на отдельной Призрачной Земле, где могут строить себе призрачные дома и ходить на свою призрачную работу. Но ни они, ни их окружение не могут взаимодействовать с нами и окружающей нас материей каким-либо образом. В данном случае разумно говорить, что призраки населяют по-настоящему отдельный призрачный мир, по той фундаментальной причине, что любые события призрачного мира абсолютно никак не влияют на события, происходящие в нашем мире.

Теперь применим такой же критерий к квантовой механике. Нас не интересует, могут ли спин и прибор, его измеряющий, влиять друг на друга, – очевидно, могут. Нас волнует, может ли один компонент, скажем, волновой функции аппарата (например, элемент функции, где стрелка на циферблате указывает вверх) влиять на другой компонент – скажем, на тот, где стрелка указывает вниз. Ранее мы уже сталкивались ровно с такой ситуацией – той, в которой волновая функция влияет сама на себя, – когда рассматривали феномен интерференции в эксперименте с двумя щелями. Когда мы пропускали электроны через две щели, не фиксируя, через которую из щелей они прошли, на экране за щелями мы наблюдали интерференционные полосы – и приписывали такой эффект взаимному гашению и усилению тех вероятностных вкладов, которые поступают от обеих щелей. Критически важно следующее: в данном случае подразумевалось, что электрон по пути к экрану не взаимодействовал и не запутывался с чем бы то ни было, то есть декогеренция не происходила.

Если же, напротив, мы фиксировали, через какую из щелей прошел электрон, интерференционные полосы исчезали. На тот момент мы связывали это с самим фактом измерения, в результате которого волновая функция электрона коллапсировала, и он проходил ровно через одну из двух щелей. Но Эверетт рассказывает нам гораздо более убедительную историю.

На самом деле электрон запутывался с детектором, проходя через щель, а детектор после этого быстро запутывался с окружающей средой. Этот процесс аналогичен вышеописанному процессу со спином, с той лишь разницей, что на этот раз мы измеряли, через

какую из щелей прошел электрон – левую (L) или правую (R):



Никаких таинственных коллапсов: волновая функция осталась на своем месте, она успешно продолжает эволюционировать согласно уравнению Шрёдингера, оставляя нас в суперпозиции с двумя запутанными состояниями. Однако обратите внимание, что происходит, когда электрон продолжает путь к экрану. Как и ранее, состояние любого электрона, оказавшегося в определенной точке экрана, складывается из двух составляющих: одна от левой щели L, а другая от правой R. Но теперь эти составляющие *не интерферируют друг с другом*. Чтобы получить интерференцию, мы должны сложить две равные по модулю противоположные величины:

$$1 + (-1) = 0.$$

Но на экране нет такой точки, где нашлись бы равные по модулю и при этом противоположные слагаемые волновой функции электрона от щелей L и R, так как, проходя через эти щели, электрон запутывается с разными состояниями остальной части мира. Говоря «равные и противоположные», мы имеем в виду именно «равные и противоположные», а не «равные и противоположные, не считая той штуки, с которой возникла запутанность». Попадание в запутанность с различными состояниями детектора и среды – иными словами, наступление декогерентности – означает, что две части волновой функции электрона больше не могут интерферировать друг с другом. Таким образом, они вообще не могут взаимодействовать. Поэтому, во всех смыслах, они относятся к отдельным мирам<sup>[13]</sup>. Для всех объектов, запутанных с одной ветвью волновой функции, остальные ветви волновой функции будут просто «пристанищем призраков».

Многомировая интерпретация квантовой механики раз и навсегда избавляется от всех тайн, связанных с процессом измерения и коллапсом волновой функции. Нам не требуются специальные правила, по которым следовало бы проводить наблюдение: волновая функция постепенно эволюционирует в соответствии с уравнением Шрёдингера. Нет ничего особенного в «измерении» и «наблюдателе». Измерение – это любое взаимодействие с квантовой системой, из-за которого она запутывается с окружающей средой, провоцирующее декогеренцию и ветвление на отдельные миры, а наблюдатель – это любая система, с подачи которой происходит такое взаимодействие. В частности, сознание никак с этим не связано. В качестве «наблюдателя» может выступать дождевой червь, микроскоп или камень. Нет даже ничего особенного в макроскопических системах, за тем исключением, что им никак не уйти от взаимодействий с окружающей средой и, следовательно, запутывания с нею. Цена, которую мы платим за столь простую и мощную унификацию квантовой механики, – признание существования множества отдельных миров.



Эверетт не был знаком с декогеренцией, поэтому предложенная им картина не была такой надежной и полной, какой мы ее изобразили. Но его способ переосмысления проблемы измерения и предложенная им унифицированная картина квантовой механики с самого начала располагали к себе. Даже в теоретической физике бывает обычное везение – человек нащупывает важную идею, поскольку оказался в нужном месте в нужное время, а не в силу собственной исключительности. Но не таков был Хью Эверетт: все, кто его знал, в один голос говорят о его невероятной интеллектуальной одаренности. Из его текстов понятно, что он целиком и полностью понимал значение своих идей. Если бы он дожил до наших дней, то с успехом подключился бы к современным дискуссиям об основаниях квантовой механики.

Сложнее было убедить в ценности этих идей других людей – в том числе его научного руководителя. Лично Уилер оказывал Эверетту

большую поддержку, но также был предан и своему наставнику Бору и убежден в разумности копенгагенской интерпретации. С одной стороны, он хотел широко объявить об идеях Эверетта, но с другой – желал убедиться, что они не будут восприняты как прямое посягательство на боровскую трактовку квантовой механики.

Но теория Эверетта действительно напрямую атаковала предложенную Бором картину. Сам Эверетт это знал, и ему нравилось излагать суть этой атаки в образных выражениях. Так, в одном из ранних вариантов своей диссертации Эверетт иллюстрировал ветвление волновой функции, проводя аналогию с делением амебы: «Можно представить разумную амёбу с хорошей памятью. По мере того как идет время, амёба все время делится, и всякий раз дочерние амёбы имеют всю память предка. Следовательно, у амёбы будет не линия жизни, а древо жизни». Уилеру претила прямота этой (довольно точной) метафоры, набросанной на полях рукописи. «Делится? Подберите слово получше». Научный руководитель и ученик без конца спорили о том, как лучше выразить новую теорию: Уилер выступал за осторожные и благоразумные формулировки, а Эверетт – за смелость и ясность.

В 1956 году, когда Эверетт заканчивал работу над диссертацией, Уилер побывал в Копенгагене и показал новый сценарий Бору и его коллегам, в том числе Оге Петерсену. По крайней мере, он попытался это сделать. К тому времени учение о квантовой теории, построенной по принципу «волновые-функции-коллапсируют-и-не-докучай-мне-вопросами-как» оформилась в догму, и те, кто ее принимал, не были заинтересованы в пересмотре оснований: ведь предстояло выполнить еще столько интересной прикладной работы. Трансатлантическая переписка между Уилером, Эвереттом и Петерсеном продолжалась, в том числе когда Уилер вернулся в Принстон и помог Эверетту окончательно доработать диссертацию. Борьба, сопутствовавшая этому процессу, отражается в эволюции самой работы: первый черновик Эверетта назывался «Квантовая механика методом универсальной волновой функции», а окончательная версия – «Волновая механика без вероятностного компонента». Этот документ, позже названный «расширенной версией» диссертации, был опубликован только в 1973 году. «Краткую версию» Эверетт в конце концов подал на соискание степени PhD<sup>[14]</sup> под названием «Об

основаниях квантовой механики», а в 1957 году она была опубликована как «Формулировка квантовой механики через “соотнесенные состояния”». В нее не попали многие из самых сочных изначально подготовленных Эвереттом разделов, включая исследования основ теории вероятности и информации, а также обзор проблемы квантовых измерений. Вместо этого Эверетт сосредоточился на возможностных приложениях его теории в квантовой космологии. (В опубликованной работе не было ни одного упоминания об амебах, но Эверетт ухитрился вставить слово «деление» в сноску, добавленную уже при корректуре, когда Уилер этого уже не видел.)

Кроме того, Уилер написал «оценочную» статью, опубликованную вместе с работой Эверетта. В ней он высказался о радикальности и важности новой теории, в то же время пытаясь затушевать ее явные расхождения с копенгагенской интерпретацией.

Споры продолжались, но без особого прогресса. Здесь стоит привести отрывок из письма Эверетта к Петерсену, в котором чувствуется разочарование:

Пока обсуждение моей работы окончательно не угасло, позвольте подлить немного масла в огонь... покритиковав «копенгагенскую интерпретацию»... Я не думаю, что вы можете отмахнуться от моей точки зрения как от простого непонимания позиции Бора...

Я думаю, что основание квантовой механики на положениях классической физики было необходимым промежуточным шагом, но сейчас пришло время... считать [квантовую механику] полноправной фундаментальной теорией, ни в коей мере не зависящей от классической физики, и уже из нее выводить классическую физику...

Позвольте мне отметить еще некоторые досадные аспекты копенгагенской интерпретации. Вы говорите о массивности макроскопических систем, что якобы позволяет пренебречь квантовыми эффектами при изучении их взаимодействий (в дискуссиях о разрыве измерительной цепочки), но никогда не обосновываете эту категорически утверждаемую догму. [И] нигде невозможно найти никакого последовательного объяснения этой «необратимости» процесса измерения. Опять же, она

определенно не подразумевается ни волновой, ни классической механикой. Еще один «сам себе постулат»?

Но Эверетт решил не продолжать академическую борьбу. Перед защитой диссертации он принял место в Группе оценки систем вооружений Министерства обороны США, где изучал последствия применения ядерного оружия. Он занимался исследованиями в области стратегии, теории игр и оптимизации и сыграл определенную роль в создании нескольких новых компаний. Неизвестно, в какой степени решение Эверетта не продолжать академическую карьеру было связано с тем, что его новая теория с самого начала столкнулась с критикой, – возможно, ему просто претила академическая среда.

Однако он сохранил интерес к квантовой механике, пусть даже никогда больше не публиковался на эту тему. Уже после того как Эверетт защитил диссертацию и работал в Пентагоне, Уилер убедил его лично съездить в Копенгаген, поговорить с Бором и другими. Визит не удался; впоследствии Эверетт рассудил, что «он был изначально обречен на провал».

Брайс Девитт, американский физик, редактировавший тот журнал, в котором вышла диссертация Эверетта, написал ему письмо, в котором посетовал, что реальный мир, очевидно, не «ветвится», так как ничего подобного мы не ощущаем. Эверетт ответил ему, сославшись на столь же дерзкую идею Коперника о том, что Земля вращается вокруг Солнца, а не наоборот. «Так и тянет спросить: вы ощущаете вращение Земли?» Девитт был вынужден признать, что это весьма хороший ответ. Поразмыслив над этой проблемой некоторое время, к 1970 году Девитт стал ярким сторонником Эверетта. Он приложил немало усилий для продвижения и общественного признания теории, до того томившейся в неизвестности. В рамках этой стратегии в 1970 году он опубликовал влиятельную статью в журнале *Physics Today*, а затем, в 1973 году, сборник эссе, в которых наконец была изложена полная версия диссертации Эверетта с комментариями. Сборник был назван «*Многомировая интерпретация квантовой механики*» – запоминающаяся формулировка, которая закрепилась с тех пор.

В 1976 году Джон Уилер покинул Принстон и перешел на работу в Университет Техаса, где преподавал и Девитт. В 1977 году они вместе организовали семинар по многомировой теории, и Уилер уговорил

Эверетта отвлекся ненадолго от обороны и присутствовать на мероприятии. Конференция прошла успешно, а Эверетт заметно впечатлил собравшихся на ней физиков. Был среди них и молодой исследователь Дэвид Дойч, впоследствии ставший видным сторонником многомировой интерпретации и одним из первых, кто занялся квантовыми вычислениями. Уилер даже предложил организовать новый исследовательский институт в городе Санта-Барбара, где Эверетт мог бы вернуться к полноценной работе над квантовой механикой, но в конечном итоге из этого ничего не вышло.

Эверетт умер от внезапного сердечного приступа в 1982-м, когда ему был пятьдесят один год. Он вел нездоровый образ жизни, сильно переедал, пил и курил. Его сын Марк (впоследствии организовавший группу Eels) говорил, что поначалу переживал, что отец настолько себя не бережет. Позже он изменил свое мнение: «Я понял, что отцовский образ жизни был по-своему ценен. Он ел, пил и курил в свое удовольствие, а однажды просто внезапно и быстро умер. Учитывая, какие еще исходы мне доводилось видеть, жить в свое удовольствие, а потом быстро умереть – не самый плохой вариант».



## Порядок и случайность

### *Откуда берутся вероятности*

Однажды солнечным днем в английском Кембридже Элизабет Энском встретила со своим учителем Людвигом Витгенштейном.

«Почему люди говорят, – начал Витгенштейн в своей неподражаемой манере, – что думать, будто Солнце вращается вокруг Земли, а не наоборот, – естественно?»

Энском, конечно же, ответила, что все *выглядит* так, будто Солнце вращается вокруг Земли.

«Ну, – ответил Витгенштейн, – а как бы это выглядело, если бы мы могли заметить, что Земля вращается вокруг своей оси?»

Эта байка, рассказанная самой Энском, а впоследствии пересказанная Томом Стоппардом в пьесе «Прыгуны», особенно нравится сторонникам Эверетта. Физик Сидни Коулман любил упоминать ее в лекциях, а физик-философ Дэвид Уоллес открывает ею свою книгу «Эмерджентная Мультивселенная». И она, определенно, напоминает о вопросе, который Хью Эверетт задал Брайсу Девиццу.

Легко понять, почему это наблюдение так важно. Любой разумный человек, впервые услышавший о многомировой интерпретации, сразу же решительно парирует: «*Я же не чувствую*, что расщепляюсь на множество людей, как только выполняется квантовое измерение. И мне не кажется, что рядом существуют всевозможные параллельные вселенные, кроме той, в которой я нахожусь».

Сторонник Эверетта отвечает, перефразируя Витгенштейна: «А что именно мы должны были бы видеть и чувствовать, если бы многомировая интерпретация оказалась верна?»

Остается надеяться, что обитатели эвереттовской Вселенной наблюдали бы именно то, что наблюдаем мы: физический мир, который, как представляется, с высочайшей точностью подчиняется законам академической квантовой механики и во многих ситуациях хорошо аппроксимируется классической механикой. Но концептуальная разница между «гладко эволюционирующей волновой функцией» и экспериментальными данными, которые эта функция

призвана объяснить, довольно велика. Не очевидно, устроит ли нас в данном случае ответ, который можно дать на вопрос Витгенштейна. Теория Эверетта может быть строга по формулировке, но предстоит еще немало работы, чтобы полностью конкретизировать ее выводы.

В этой главе мы поговорим о главной загадке многомировой интерпретации: происхождении и природе вероятности. Уравнение Шрёдингера абсолютно детерминистское. Почему вообще в игру вступают вероятности и почему соблюдается правило Борна: вероятности равны амплитудам – комплексным числам, которые волновая функция ассоциирует с каждым возможным результатом, – возведенным в квадрат? Имеет ли вообще смысл говорить о вероятности оказаться в той или иной ветке, если «будущая версия» меня окажется в каждой ветке?

В академических, копенгагенских версиях квантовой механики нет необходимости «выводить» правило Борна для вероятностей. Мы просто припечатываем его как один из постулатов теории. Почему нельзя поступить так же в случае с многомировой интерпретацией?

Дело в том, что, хотя ответ в обоих случаях и звучит одинаково – «вероятности задаются квадратом волновой функции», – смысл этих формулировок сильно различается. В хрестоматийной версии правило Борна – это утверждение о том, как часто происходят события или как часто они будут происходить в будущем. В многомировой интерпретации нет места для такого дополнительного постулата. Мы точно знаем, что произойдет, исходя из того базового правила, что волновая функция всегда подчиняется уравнению Шрёдингера. Вероятность в многомировой интерпретации – это безусловное утверждение о том, во что мы должны *верить* и как *действовать*, а не о том, как часто происходят те или иные события. Причем «во что мы должны верить» не относится к постулатам физической теории, а должно из них следовать.

Более того, как мы убедимся, здесь нет ни места для дополнительного постулата, ни необходимости в нем. С учетом базовой структуры квантовой механики правило Борна естественно и работает автоматически. Поскольку в природе прослеживаются соответствующие этому правилу явления, это вселяет уверенность, что мы на верном пути. Структура, в которой важный результат может быть выведен из более фундаментальных постулатов, должна, при

прочих равных условиях, быть предпочтительнее той, где подобный результат нужно подразумевать отдельно.

Если нам удастся ответить на этот вопрос, то мы значительно приблизимся к отождествлению мира, который наблюдаем, с миром, каким он был бы в случае правильности многомировой интерпретации. Это мир, хорошо аппроксимируемый классической физикой во всех ситуациях, кроме событий, происходящих в квантовых экспериментах, когда вероятность получить тот или иной результат задается правилом Борна.



Проблема вероятностей часто формулируется как попытка выяснить, почему вероятности задаются квадратами амплитуд. Но это не самое сложное. Возведение амплитуд в квадрат для получения вероятностей – операция тривиальная; сложности возникали бы при необходимости возводить волновую функцию в пятую степень и т. п. Мы узнали об этом еще в главе 5, когда на примере кубитов выяснили, что волновую функцию можно трактовать как вектор.

Этот вектор подобен гипотенузе прямоугольного треугольника, а отдельные амплитуды – его катетам. Длина вектора равна единице, и по теореме Пифагора именно такова сумма квадратов амплитуд. Поэтому «амплитуды в квадрате» естественно смотрятся в качестве вероятностей: это положительные числа, сумма которых равна единице.

Более серьезный вопрос: есть ли в эвереттовской квантовой механике что-либо непредсказуемое и если да, то почему существует специфическое правило по присваиванию вероятностей. В многомировой интерпретации, если мы знаем волновую функцию на определенный момент времени, то можем в точности вычислить, что будет в любой другой момент времени, просто решив уравнение Шрёдингера. Здесь нет места случайностям. Как же мир в таком представлении будет согласовываться с нашими реальными наблюдениями, ведь такие явления, как распад атомного ядра или измерение спина, кажутся безоговорочно случайными?

Вернемся к нашему любимому примеру с измерением спина электрона. Допустим, в исходном состоянии у нас есть электрон, находящийся в суперпозиции равных вероятностей верхнего и нижнего спинов по вертикальной оси, и этот электрон мы пропускаем через магнит Штерна – Герлаха. Согласно академической квантовой механике, у нас будет 50 %-ная вероятность, что волновая функция сколлапсирует в верхний спин, и 50 %-ная – что в нижний. С другой стороны, согласно многомировой интерпретации, существует 100 %-ная вероятность, что волновая функция Вселенной разделится из одного мира на два. Действительно, в одном из этих миров наблюдатель увидит верхний спин, а в другом – нижний. Однако оба мира существуют, это неоспоримо. Если бы мы сформулировали вопрос так: «Какова вероятность, что я как наблюдатель окажусь в той ветви волновой функции, где спин будет верхним?», то никакого ответа на него не просматривается. Вы не окажетесь одним из наблюдателей: ваше актуальное единственное «я» с определенностью эволюционирует в обоих этих наблюдателей. Как же нам рассуждать о вероятностях в такой ситуации?

Хороший вопрос. Чтобы ответить на него, нам придется немного пофилософствовать и подумать о том, что же такое «вероятность» на самом деле.



Существование конкурирующих философских школ, по-разному трактующих феномен вероятности, вовсе не удивительно. Допустим, мы подбрасываем «честную» монету. «Честная» в данном случае означает, что при подбрасывании в 50 % случаев выпадет решка и в 50 % случаев – орел. При многократном подбрасывании никто не удивится, если какие-то два раза подряд монетка упадет орлом.

Данная оговорка «при многократном подбрасывании» подсказывает стратегию, позволяющую концептуализировать вероятности. Если бросить монету всего несколько раз, то почти никакие результаты не должны нас удивлять. Но чем больше бросков у нас будет, тем скорее общее соотношение орлов и решек должно приближаться к 50/50. Таким образом, вероятность выпадения орла определяется

количеством его фактического выпадения, если подбросить монету бесконечное число раз.

Такое представление феномена вероятности иногда называется *фреквентизмом*<sup>[15]</sup>, поскольку в данном случае вероятность понимается как относительная частота повторяемости события на протяжении очень большого количества попыток. Фреквентизм очень хорошо сочетается с нашими интуитивными представлениями о том, как работают вероятности при бросании монет, игральных костей и в картежной игре. С точки зрения фреквентиста, вероятность – это объективный феномен, поскольку он зависит только от свойств монеты (или любой другой системы), о которой идет речь, а не от нас или того, что нам известно.

Фреквентизм удобно вписывается в хрестоматийную картину квантовой механики и согласуется с правилом Борна. Возможно, количество электронов, пропущенных вами через магнитное поле с целью измерить их спины, и не будет бесконечным, но их может быть очень много. (Эксперимент Штерна – Герлаха очень любят демонстрировать на лабораторных работах для физиков-старшекурсников, поэтому на протяжении многих лет таким образом было измерено немало спинов.) Можно собрать достаточно обширную статистику, чтобы убедиться, что вероятность в квантовой механике действительно представляет собой просто волновую функцию, возведенную в квадрат.

С многомировой интерпретацией все иначе. Допустим, мы помещаем электрон в суперпозицию с равными вероятностями для верхнего и нижнего спинов, измеряем его спин, а затем многократно повторяем этот опыт. При каждом измерении волновая функция делится на мир, где спин оказался верхним, и мир, где спин оказался нижним. Допустим, что мы будем записывать наши результаты, помечая верхний спин как 0, а нижний – как 1. После пятидесяти измерений появится мир, запись в котором будет выглядеть следующим образом:

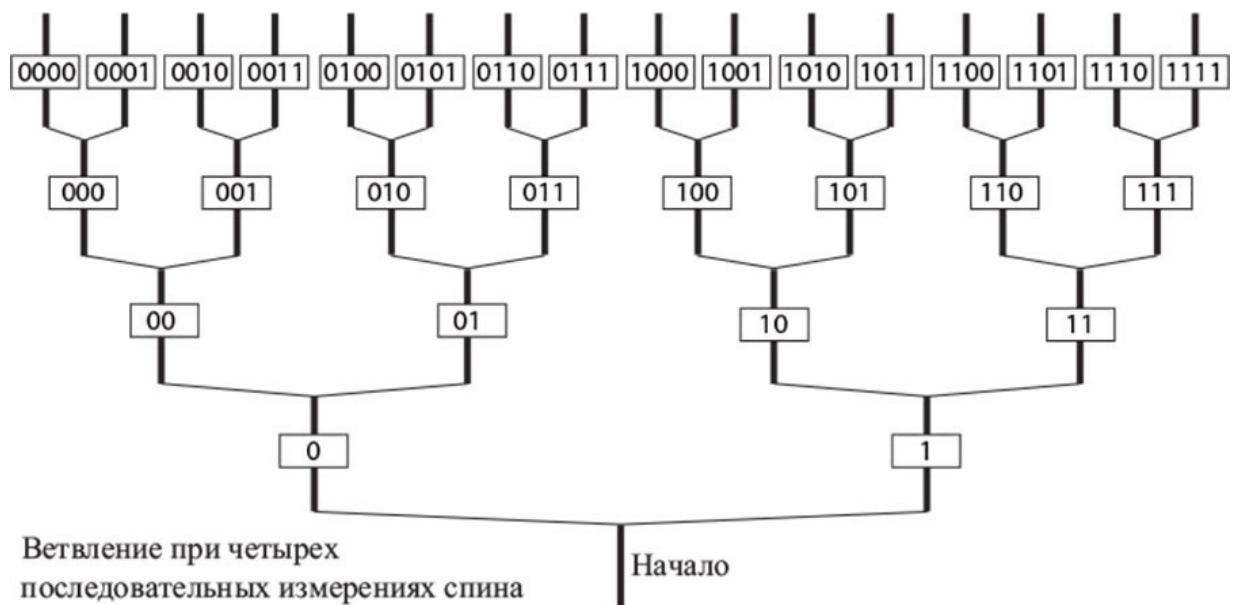
10101011111011001011001010100011101100011101000001

Разброс кажется достаточно случайным и хорошо подчиняется статистике: здесь двадцать четыре нуля и двадцать шесть единиц. Не совсем 50/50, но достаточно близко к этому, как мы и могли ожидать.

Однако будет и такой мир, где все измерения дадут в результате верхний спин, так что в аналогичной записи будет пятьдесят нулей. А еще будет мир, где все измерения дадут нижний спин, и последовательность будет состоять из пятидесяти единиц. Будут и все другие возможные строки с разными сочетаниями нулей и единиц. Если Эверетт прав, то существует 100 %-ная вероятность, что каждая возможность воплотится в каком-либо конкретном мире.

Признаюсь: такие миры действительно существуют. Вышеприведенную строку, подобранную, казалось бы, совершенно случайным образом, я не пытался специально составить так, чтобы она выглядела случайной, и не создавал ее с помощью классического генератора случайных чисел. На самом деле она сделана с помощью *квантового* генератора случайных чисел: это штукавина, выполняющая квантовые измерения и использующая их для создания случайных последовательностей из нулей и единиц. Согласно многомировой интерпретации, стоит мне сгенерировать такое случайное число – и Вселенная разделится на  $2^{50}$  экземпляров (что равно 1 125 899 906 842 624, или приблизительно 1 квадриллиону), и в каждом из этих миров сгенерированное число будет несколько отличаться от других.

Если все копии меня, оказавшиеся в этих разнообразных мирах, будут строго придерживаться плана и включат полученное число в ту книгу, которую сейчас пишут, то в волновой функции Вселенной окажется около квадриллиона вариантов текста этой книги. Отличия между большинством экземпляров будут незначительными, просто нули и единицы получатся слегка переставлены. Но среди всех этих моих двойников окажутся и такие бедняги, у которых в этой последовательности будут только нули или только единицы. О чем эти авторы сейчас думают? Вероятно, о том, что их генератор случайных чисел сбоит. Они определенно не набирают сейчас тот самый текст, который набираю я.



Что бы ни думали об этой ситуации я или мои двойники, она весьма далека от фреквентистской парадигмы вероятностей. Практически бессмысленно говорить о частоте, когда речь идет о бесконечном количестве попыток, результат каждой из которых может быть любым, просто он попадает в какую-то другую ветку волновой функции. Нужно иначе подойти к трактовке феномена вероятности и его значения.

○ ○ ○

К счастью, существует и другой подход к вероятности, появившийся задолго до квантовой механики. Это *эпистемологическая* вероятность, и она связана с тем, что нам известно, а не с каким-то гипотетическим бесконечным количеством попыток.

Рассмотрим вопрос: «Какова вероятность, что “Филадельфия Севенти Сиксерс” выиграют Чемпионат НБА-2020?» (лично я считаю, что эта вероятность очень велика, но фанаты других клубов могут со мной не согласиться). Это событие – не из тех, которые могли бы повторяться бесконечное количество раз. Как бы то ни было, баскетболисты стареют, и это сказывается на уровне их игры. Финал Чемпионата НБА-2020 состоится лишь однажды, и ответ на поставленный здесь вопрос будет строго определенным, даже если

пока мы не знаем победителя. Но профессиональные букмекеры не испытывают никаких угрызений совести, присваивая вероятности таким ситуациям. С той же уверенностью мы присваиваем их в повседневной жизни: постоянно судим о вероятности различных однократных событий, от получения работы, на которую мы подавали резюме, до перспективы проголодаться к семи вечера. Если уж на то пошло, мы рассуждаем и о вероятности событий, произошедших в прошлом, хотя каждое из этих событий уже является свершившимся фактом – мы просто не помним подробностей. «Я не помню, во сколько ушел с работы в прошлый четверг, но, вероятно, между пятью и шестью вечера, поскольку именно в это время я обычно направляюсь домой».

В таких случаях мы присваиваем «степень уверенности» – достоверности – различным рассматриваемым утверждениям. Степени уверенности, как и вероятности, должны варьировать в диапазоне от 0 до 100 %, а общий набор субъективных степеней уверенности для всех возможных исходов указанного события должен составлять 100 %. Ваша уверенность в свершении некоторого события может измениться по мере того, как вы собираете информацию. Например, вы можете быть в некоторой степени уверены, что слово пишется именно так, но затем посмотрите в словарь и узнаете правильный вариант. Специалисты по статистике формализовали этот процесс под названием *байесовский вывод*, в честь преподобного Томаса Байеса, пресвитерианского священника, жившего в XVIII веке и увлекавшегося математикой. Байес вывел уравнение, описывающее, как нужно корректировать степень уверенности при получении новой информации. Сегодня эта формула красуется на плакатах и футболках на кафедрах статистики по всему миру.

Итак, существует отличное определение «вероятности», применимое даже к событиям, которые могут произойти всего лишь однажды, а не бесконечное количество раз. Правда, здесь мы имеем дело с субъективным феноменом, а не с объективным: разные люди, обладающие разным набором знаний, могут присваивать разные степени уверенности одинаковым исходам одного и того же события. Это нормально, пока все придерживаются некоторых правил корректировки степени уверенностей по мере поступления новой информации. На самом деле, если вы верите в этернализм, то есть



считаете, что будущее столь же реально, как и прошлое, просто мы до него еще не добрались, – то на место фреквентизма приходит байесовский вывод. Когда вы подбрасываете монету, утверждение «вероятность, что монета упадет решкой, составляет 50 %» может быть интерпретировано следующим образом: «учитывая, что я знаю об этой и других монетах, лучшее, что я могу утверждать о ближайшем будущем монеты – она с равной вероятностью может упасть орлом или решкой, несмотря на то что результат вполне предопределен».

До сих пор не очевидно, делаем ли мы шаг вперед, основывая подход к вероятности на наших знаниях, а не на частоте событий. Многомировая интерпретация – это детерминистская теория, и если мы знаем волновую функцию в определенный момент времени и уравнение Шрёдингера, то сможем вычислить все, что произойдет. В каком смысле здесь можно говорить о неизвестных нам деталях, которым мы можем присваивать степени уверенности по правилу Борна?

Напрашивается заманчивый ответ, который, однако, неверен: мы не знаем «в каком мире окажемся». Эта точка зрения ошибочна, поскольку имплицитно опирается на понятие личной идентичности, которое неприменимо к квантовой Вселенной.

Здесь мы сталкиваемся с тем, что философы называют «народным» пониманием окружающего мира, и с совершенно иным взглядом, предлагаемым современной наукой. В конечном счете научные представления должны объяснять наш повседневный опыт. Но мы не вправе ожидать, что концепциям и понятиям, сформировавшимся в донаучный исторический период, найдется место в нашей наиболее полной картине физического мира. Хорошая научная теория должна быть совместима с нашим опытом, но может излагаться на совершенно другом языке. Идеи, которые мы с готовностью применяем в повседневной жизни, оказываются полезными приближениями определенных аспектов более полной теории.

Стул – это не объект, обладающий платоновской сущностью стула: это совокупность атомов, упорядоченных в виде определенной конфигурации, которую мы считаем логичным отнести к категории «стулья». Мы без труда признаем, что границы этой категории несколько размыты. Считается ли диван? А барный стул? Если взять некоторый «бесспорный стул» и удалять из него атомы один за другим,

то постепенно он будет все менее и менее походить на стул, но не существует какого-то четкого порога, после которого мы резко переходим от «стула» к «нестулу». И это нормально. Нам несложно принять эту вольность в повседневной жизни.

Но когда речь заходит о нашем «я», мы испытываем потребность защищаться. С точки зрения повседневного опыта понятие «я» — ничуть не размытое. Мы растем и учимся, наше тело стареет, мы взаимодействуем с миром самыми разными способами. Но в любой момент у меня нет проблем с идентификацией человека, который несомненно является «мной».

Квантовая механика подсказывает, что эта история нуждается в некотором уточнении. Когда спин измерен, в результате декогеренции волновая функция разветвляется, мир делится надвое, и возникают два человека, которые ранее были одним «я». Не имеет смысла спрашивать, кто из них «настоящий я». Аналогично, пока ветвление не произошло, бессмысленно спрашивать, в которой из веток окажусь «я». Оба этих человека в равной степени имеют право считать себя моим «я».

В классической Вселенной не составляет труда идентифицировать отдельную личность как человека, который стареет со временем. В любой момент человек представляет собой определенную совокупность атомов. Но важны в данном случае не отдельные атомы, поскольку значительная их доля со временем заменяется, — важны наша структурная организация и непрерывность этой структуры, в особенности воспоминания конкретного человека.

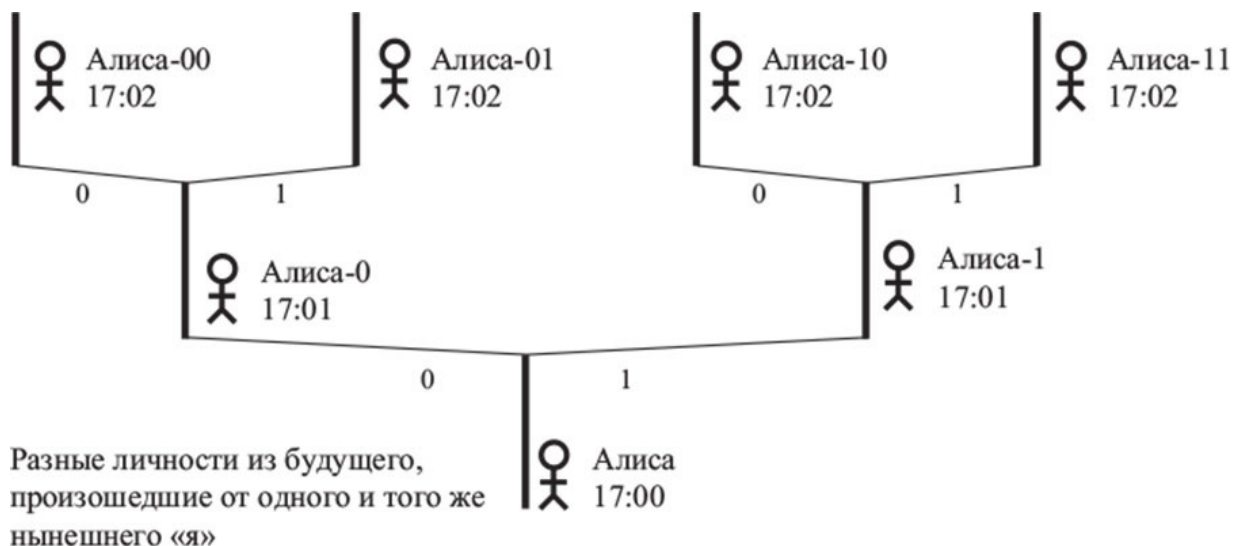
Новая черта квантовой механики заключается в дублировании этой структуры при ветвлении волновой функции. Причин для паники нет. Нам просто нужно скорректировать наши представления о личностной идентичности с течением времени, чтобы учесть ситуацию, задумываться о которой у нас не было причин за тысячелетия донаучной человеческой эволюции.

Какой бы неподатливой ни была наша идентичность, концепция отдельно взятой личности, существующей от рождения до смерти, всегда оставалась лишь полезным приближением. Тот человек, которым вы сейчас являетесь, не тождествен тому, кем вы были год и даже секунду назад. Ваши атомы успели немного перераспределиться, а некоторые из них уже могли смениться на новые (если вы едите за

чтением этой книги, то, возможно, сейчас в вас может быть больше атомов, чем минуту назад). Если мы хотим быть точнее обычного, то должны говорить не о «вас», а о «вас в 17:00», «вас в 17.01» и так далее.

Идея унифицированного «я» полезна не потому, что все эти наборы атомов в разные моменты времени почти одинаковы, но потому что они связаны друг с другом очевидным образом. Они описывают реальную структуру. В каждый момент вы «произошли» от того себя, кем были секундой ранее, благодаря эволюции отдельных атомов внутри вас и возможному изменению их количества в большую или меньшую сторону. Разумеется, философы размышляли над этим: в частности, Дерек Парфит предположил, что развивающаяся во времени идентичность сводится к отношению «вас» в некоторый момент жизни к «вам» в другой момент жизни, где отношение  $R$  означает, что ваше будущее «я» сохраняет психологическую непрерывность с вашим прошлым «я».

Ситуация в многомировой интерпретации квантовой механики развивается ровно таким же образом, вот только от предыдущей личности могут произойти не одна, а много последующих личностей. (Парфит не увидел бы в этом никакой проблемы и фактически исследовал аналогичные ситуации с участием машин-раздвоителей.) Следует говорить о личности не «в 17:01», а о личности «в 17:01, которая произошла от вас по состоянию на 17:00 и оказалась в той ветви волновой функции, где измерен верхний спин электрона», и то же самое касается личности, оказавшейся в ветви, где был измерен нижний спин электрона.



Каждый из этих людей в равной степени может считать себя вашим «я». И все они правы. Каждый из них – отдельная личность, и все они ведут свое начало от одного человека. В многомировой интерпретации период человеческой жизни должен пониматься как ветвящееся дерево, в состав которого в любой момент времени входит множество личностей, а не как одиночная траектория – вспомните пример с делением амебы. И нет никакой разницы, говорим мы о человеке или о камне. Мир умножается, а вместе с ним умножается все, что в нем находится.



Теперь мы готовы подступиться к нашей проблеме вероятностей в многомировой интерпретации. Прежде вопрос: «В какой ветви реальности я окажусь?» мог показаться нам вполне корректным. Но теперь мы понимаем, что должны представлять ситуацию иначе.

Вместо этого подумайте о моменте, наступившем сразу после того, как произошла декогеренция и мир разветвился. Декогеренция – процесс невероятно быстрый, обычно занимающий ничтожную долю секунды. С человеческой точки зрения волновая функция ветвится практически мгновенно (хотя это всего лишь приближение). Итак, сначала происходит ветвление, и мгновением позже мы это

обнаруживаем – например, проверив, вверх или вниз отклонился электрон, прошедший через магнитное поле.

Итак, через короткий миг возникают две ваши копии, и эти копии будут полностью идентичны. Каждая из них живет в своей ветке волновой функции, но никто из этих двоих не знает, в какой именно ветке оказался.

Вы уже догадываетесь, к чему все идет. Мы знаем все о волновой функции Вселенной – у нее две ветви, и с каждой из них связана своя амплитуда. Но есть то, что не известно людям, оказавшимся в двух этих ветвях: в какой именно ветви каждый из них находится. Такое положение дел, на котором впервые заострил внимание в квантовом контексте физик Лев Самуилович Вайдман, называется «неопределенность самолокализации» – вы знаете о Вселенной все, что можно о ней знать, кроме того, где именно в ней находитесь.

Такое незнание дает нам повод поговорить о вероятностях. В момент после ветвления обе ваши копии находятся в неопределенности самолокализации, поскольку не знают, в каких ветвях реальности оказались. Но они могут присвоить степень уверенности тому, что окажутся в той или иной ветке.

Какова должна быть такая степень уверенности? Представляется, что есть два способа это узнать. Во-первых, можно воспользоваться структурой квантовой механики как таковой и выбрать предпочтительное для нас множество степеней уверенностей, которые рациональный наблюдатель должен соотнести с тем, в какой из различных ветвей он мог оказаться. Если для вас это приемлемо, то степени уверенности, которые вы в итоге расставите, будут именно такими, какие получались бы по правилу Борна. Тот факт, что вероятность исхода квантового измерения рассчитывается как квадрат волновой функции, – именно то, чего следовало бы ожидать, если бы эта вероятность проистекала из степени уверенности в условиях неопределенности самолокализации. (Если вы согласны с этим вариантом и вас не интересуют детали, то остаток главы вполне можно пропустить.)

Однако существует еще одна философская школа, полагающая, что нет вообще никакого смысла в расстановке конкретных степеней уверенности. Я могу придумать какие угодно причудливые правила, позволяющие рассчитать вероятности, с которыми я мог бы оказаться в

той или иной ветви волновой функции. Может быть, я присвою более высокую степень уверенности попаданию в ту ветку, где буду счастливее, либо где спины электронов всегда направлены вверх. Философ Дэвид Альберт предложил «меру тучности», где вероятность пропорциональна количеству атомов в вашем теле (просто чтобы подчеркнуть произвольность, а не потому, что считает это разумным). Нет никаких разумных оснований для выбора такого параметра, но почему нет? Согласно такому подходу, единственная «рациональная» вещь, которую можно сделать, – признать, что не существует верного способа присваивания степеней уверенности, и поэтому отказаться их присваивать.

Такую точку зрения можно принять, но я не считаю ее наилучшей. Если многомировая интерпретация верна, то нам придется оказываться в ситуациях неопределенности самолокализации, хотим мы того или нет. А если ваша цель – представить наилучшую научную модель мира, такое понимание обязательно предполагает присваивание степеней уверенности в подобных ситуациях. В конце концов, одна из задач науки – прогнозирование результатов наблюдений, пусть даже на уровне вероятностей. Если у нас будет просто набор произвольных способов присваивания степеней уверенности и каждый из них будет казаться не менее логичным, чем остальные, то мы застопоримся. Но если структура теории безошибочно указывает на единственный способ присваивания степеней уверенности и этот способ согласуется с имеющимися у нас экспериментальными данными, то мы должны принять его, похвалить себя за хорошо проделанную работу и перейти к другим задачам.



Допустим, мы ухватились за идею, что может быть явственно лучший способ присваивания степеней уверенности, когда мы не знаем, в какой ветви волновой функции находимся. Ранее мы отмечали, что правило Борна – это, в сущности, теорема Пифагора в действии.

Теперь мы можем подойти к этому вопросу осторожнее и объяснить, почему это рациональный способ думать о степенях уверенности в

условиях неопределенности самолокализации.

Это важный вопрос, поскольку, если бы к настоящему времени нам не было известно о правиле Борна, мы могли бы подумать, что амплитуды совершенно не важны для распределения вероятностей. Например, при переходе от одной ветви к двум почему бы просто не присвоить каждой из них равные значения вероятности, так как речь идет о двух разных вселенных? Легко объяснить, почему эта идея, известная как «подсчет ветвей», неработоспособна. Но есть и более ограниченная версия, согласно которой мы должны присваивать равные вероятности таким ветвям, *амплитуда которых одинакова*. И как ни странно, этого достаточно, чтобы показать, что для ветвей разной амплитуды нам необходимо применить правило Борна.

Давайте сначала отбросим неверную стратегию подсчета ветвей, а затем перейдем к стратегии, которая действительно работает. Рассмотрим отдельный электрон, чей спин был измерен прибором, так что произошли декогеренция и ветвление. Строго говоря, мы должны отслеживать эволюцию прибора, наблюдателя и окружающей среды, но все они просто изменяются вместе, поэтому не будем описывать их по отдельности. Допустим, что амплитуды для верхнего и нижнего спинов не равны, а мы фактически имеем неравновесное состояние  $\Psi$  с разными амплитудами по двум направлениям.

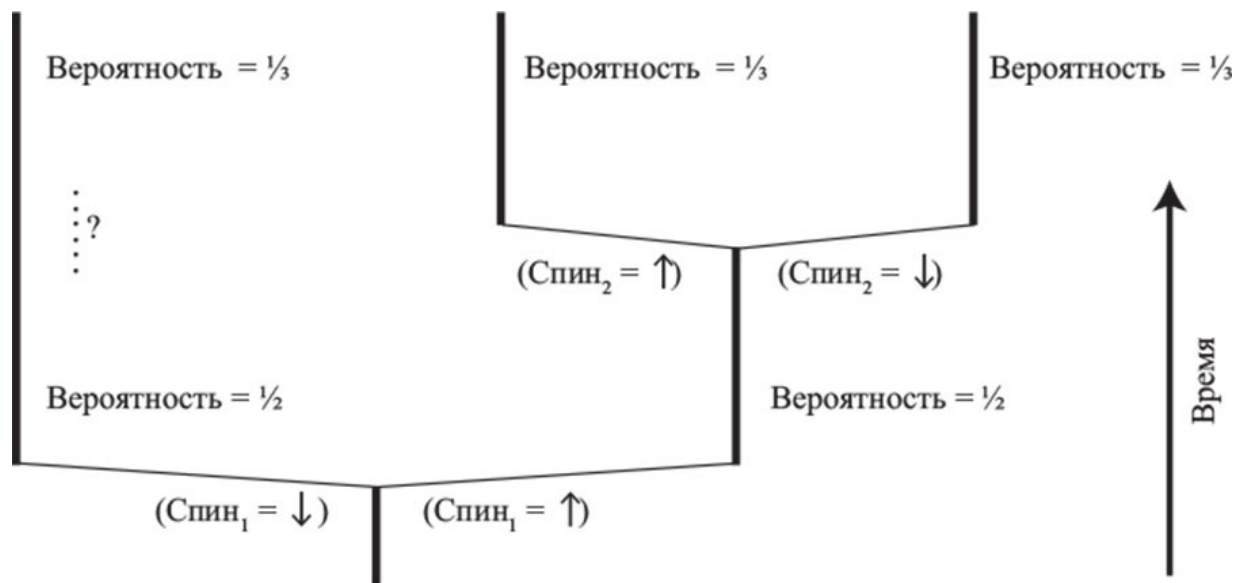
$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{3}} \text{ (свернутое колесо) } + \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ (раскрученное колесо) }$$

Эти числа вне различных ветвей соответствуют различающимся амплитудам. Поскольку, по правилу Борна, вероятность равна квадрату амплитуды, в данном примере у нас должна быть вероятность  $1/3$  увидеть электрон с верхним спином и  $2/3$  – с нижним.

Предположим, мы не знаем правила Борна и нам хочется присвоить вероятности методом простого подсчета ветвей. Каковы будут точки зрения наблюдателей, находящихся в двух разных ветвях? С их точки зрения, эти амплитуды – просто невидимые числа, на которые умножается каждая ветка, входящая в состав волновой функции

Вселенной. Почему они должны быть как-либо связаны с вероятностями? Оба наблюдателя одинаково реальны, они даже не знают, в каких ветках находятся, пока не посмотрят. Не было бы более рационально или как минимум более демократично присвоить им равные степени уверенности?

Очевидная проблема в данном случае связана с тем, что нам разрешено продолжать измерения. Представьте, что мы заранее договорились о следующем: если будет измерен верхний спин, то мы на этом и остановимся, но если будет измерен нижний, то автоматический механизм быстро измерит и другой спин. Этот второй спин окажется правым, а как мы знаем, правый спин можно записать в виде суперпозиции верхнего и нижнего спинов. Как только мы измерили его (только в той ветке, где первый спин оказался нижним), у нас будет три ветви: одна с верхним спином, одна с нижним и верхним после второго измерения, а еще одна – где мы дважды подряд получили нижний спин. Правило «присваивать всем ветвям равные вероятности» требовало бы задать вероятность  $1/3$  для каждой из этих возможностей.



Это глупо. Если бы мы следовали данному правилу, то вероятность для исходной ветви с верхним спином внезапно бы изменилась, как только мы выполнили бы измерение в ветке с нижним спином – упала бы с  $1/2$  до  $1/3$ . Вероятность наблюдать верхний спин в нашем



исходном эксперименте не должна зависеть от того, что кто-то в совершенно отдельной ветке решит впоследствии провести совершенно другой эксперимент. Поэтому, если мы собираемся присваивать степени уверенности разумным образом, то нам нужен более изящный выход, чем простой подсчет веток.



Вместо упрощенного присвоения равных вероятностей каждой из веток давайте попробуем совершить более ограниченное действие: присвоим равные вероятности веткам, обладающим равными амплитудами. Например, отдельно взятый правый спин может быть записан как суперпозиция верхнего и нижнего спинов, взятых с равными амплитудами.



Согласно этому новому правилу, мы должны присвоить степени уверенности, равные 50 %-ным возможностям оказаться в ветках с измеренным верхним или нижним спином, если собираемся наблюдать спин по вертикальной оси. Кажется разумным, поскольку между двумя этими вариантами существует симметрия: действительно, по любому мыслимому правилу мы должны присвоить им равные вероятности<sup>[16]</sup>.

Хорошая сторона этого более умеренного предположения заключается в том, что при многократных измерениях не возникает никаких противоречий. Если мы выполним дополнительное измерение в одной ветке, а не в другой, то у нас опять будут ветки с неравными амплитудами, поэтому данное правило, видимо, вообще ни о чем не говорит.

Но на самом деле все гораздо лучше. Если исходить из простого правила: «равные амплитуды подразумевают равные вероятности» и задаться вопросом, является ли оно частным случаем более общего правила, никогда не приводящего к противоречиям, то у нас будет всего один ответ. Этот ответ – правило Борна: вероятность равна амплитуде в квадрате.

В этом можно убедиться, вернувшись к нашему неравновесному случаю, где одна амплитуда равна квадратному корню из  $1/3$ , а другая – квадратному корню из  $2/3$ . На этот раз мы специально сразу включим в опыт еще один кубит с правым спином, если измерять спин по горизонтали. Сначала мы этот кубит просто «взяли за компанию».

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{3}} (\text{сфера с ↑, ↺}, -\text{сфера с ↻}) + \sqrt{\frac{2}{3}} (\text{сфера с ↓, ↺}, -\text{сфера с ↻})$$

Если мы настаиваем на равных вероятностях для равных амплитуд, это не сообщает нам ничего нового, поскольку амплитуды не равны. Но мы можем продолжать играть в ту же игру, измеряя второй спин вдоль вертикальной оси, если первый спин – нижний. В процессе эволюции волновая функция разделяется на три составляющие, и мы можем выяснить, каковы их амплитуды, вернувшись к показанному выше разложению состояния правого спина на вертикальные спины, как это было нами сделано ранее. Умножив квадратный корень из  $2/3$  на квадратный корень из  $1/2$ , мы получим квадратный корень из  $1/3$ , так что мы получаем три ветви, и все – с равными амплитудами.

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{3}} (\text{сфера с ↓, ↺}, -\text{сфера с ↻}) + \sqrt{\frac{1}{3}} (\text{сфера с ↺}, \text{сфера с ↺}) + \sqrt{\frac{1}{3}} (\text{сфера с ↺}, \text{сфера с ↻})$$

Поскольку амплитуды равны, теперь мы смело можем присвоить им равные вероятности. Амплитуд три, поэтому каждой из них будет соответствовать вероятность  $1/3$ . Если же мы не хотим, чтобы значение

вероятности в одной из веток внезапно изменилось, когда что-то произойдет в другой ветке, мы должны были присвоить вероятность  $1/3$  ветке с верхним спином еще до того, как выполнили второе измерение. Но  $1/3$  – это просто квадрат амплитуды данной ветки, в точном соответствии с правилом Борна.



Здесь таится парочка проблем. Можно возразить, что мы рассмотрели исключительно простой пример, где одна вероятность была ровно вдвое больше другой. Но такая стратегия работает во всех случаях, когда мы можем разделить наши состояния на нужное количество членов так, чтобы все амплитуды были равны по величине. Это срабатывает, когда все амплитуды в квадрате являются рациональными числами (частными от деления одного целого числа на другое), и ответ остается все тем же: вероятность равна квадрату амплитуды. Существует также множество иррациональных чисел, но, если вам как физику удастся доказать, что принцип работает со всеми рациональными числами, вы передаете задачу математику, бормочете что-то о «непрерывности» и заявляете, что ваша работа на этом закончена.

Мы видим теорему Пифагора в действии. Именно поэтому ветвь, которая больше другой ветви в квадратный корень из двух<sup>[17]</sup>, может разделиться на две другие ветви равного размера. Вот почему самое сложное заключается не в выводе конкретной формулы, а в предоставлении серьезного обоснования тому, каково же значение вероятности в детерминистской теории. Здесь мы исследовали один из возможных ответов: дело в степенях уверенности, которые присваиваются возможности оказаться в той или иной ветви волновой функции сразу после акта ветвления.

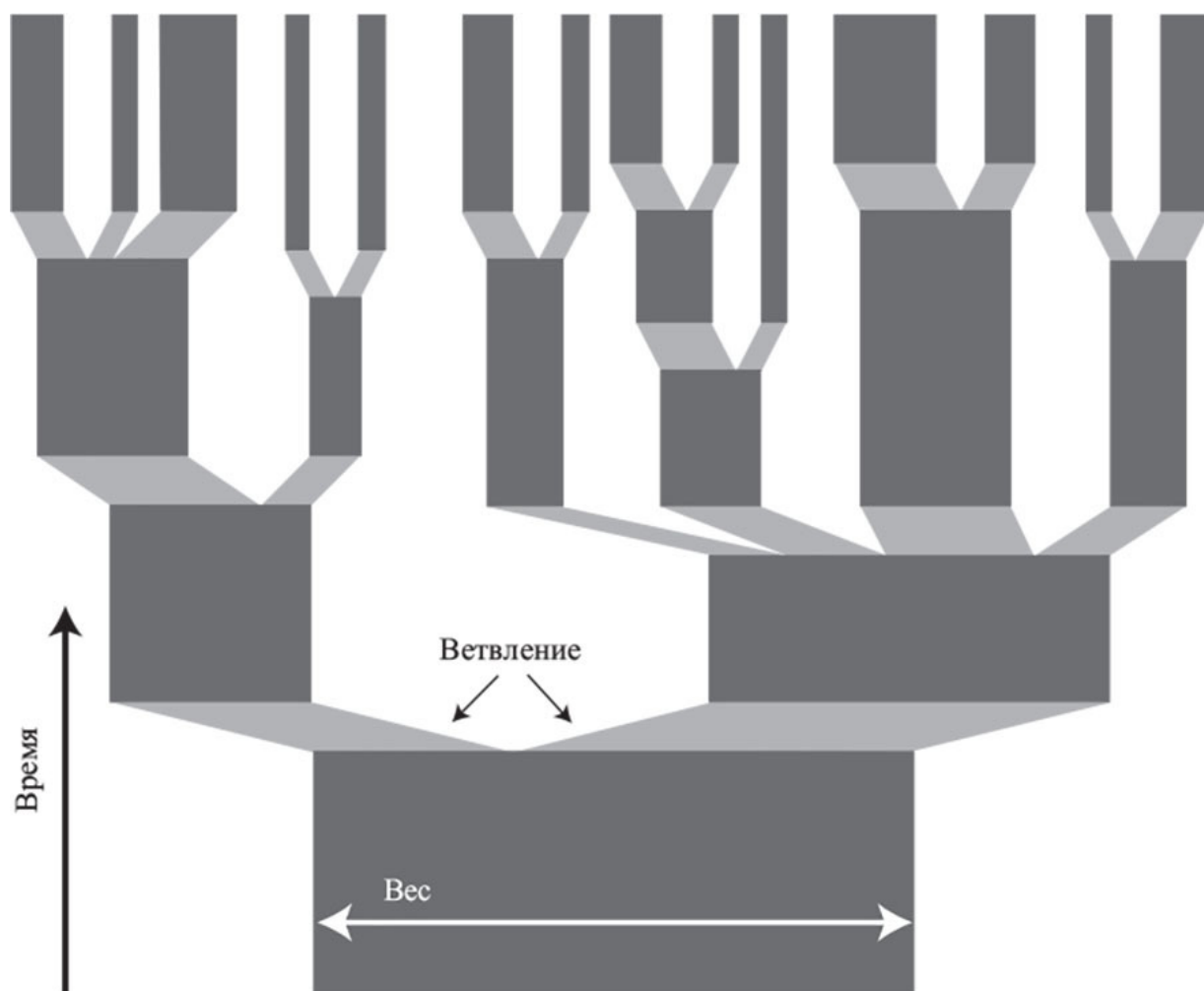
Возможно, вам неуютно от мысли: «Но я же хочу знать, какова вероятность результата, еще до того, как выполню измерение, а не сразу после. До ветвления никакой неопределенности нет вообще – вы уже сказали, что неправильно гадать, в какой ветке я окажусь. Поэтому как мне рассуждать о вероятностях до того, как состоится измерение?»

Бояться нечего. Вы правы, воображаемый собеседник, – бессмысленно беспокоиться о том, в какой ветке вы окажетесь. Мы наверняка знаем, что из вашего нынешнего состояния образуются два «потомка» и они будут находиться в разных ветках. Они будут идентичны, причем оба не будут знать, в каких именно ветках оказались, и степени уверенности относительно этого они должны расставлять по правилу Борна. Но это означает, что все ваши потомки окажутся в одинаковой эпистемологической позиции, когда будут расставлять вероятности по правилу Борна. Поэтому имеет смысл не ждать и присвоить эти вероятности прямо сейчас. Мы были вынуждены сместить смысл вероятности от простой фреквентистской модели к более надежной эпистемологической картине, но наши расчеты и действия на основе этих расчетов не изменились. Вот почему физикам удалось выполнить интересную работу, искусно уходя от таких тонких вопросов все это время.

На интуитивном уровне такой анализ подсказывает, что амплитуды в квантовой волновой функции ведут к различным ветвям, обладающим разными «весами», пропорциональными квадрату амплитуды. Не хотелось бы воспринимать этот мысленный образ чересчур буквально, однако он дает конкретную картину, которая помогает нам осмыслить вероятности, а также другие феномены, о которых речь пойдет ниже, – в частности, сохранение энергии.

$$\text{Вес ветки} = |\text{Амплитуда этой ветки}|^2$$

Когда есть две ветви с неравными амплитудами, мы считаем, что существует только два мира, но они обладают разным весом: тот, что соответствует большей амплитуде, считается миром с бóльшим весом. Веса всех веток любой конкретной волновой функции в сумме всегда дают единицу. Когда же одна ветка разделяется на две, мы не просто «делаем еще одну вселенную», удваивая существующую: суммарный вес двух этих новых миров будет равен весу того первичного мира, с которого мы начинали, а общий вес остается без изменений. По мере дальнейшего ветвления миры становятся все тоньше.



Это не единственный способ вывести правило Борна в многомировой интерпретации. Среди ученых, занимающихся основаниями физики, есть еще более популярная стратегия, которая апеллирует к теории принятия решений – к правилам, которыми руководствуется рациональный агент, когда делает выбор в мире, полном неопределенности. Впервые разработкой этого подхода занялся в 1999 году Дэвид Дойч (один из физиков, впечатленных личностью Хью Эверетта на техасской конференции в 1977 году). Позже более строгую формулировку этой стратегии дал Дэвид Уоллес.

Теория принятия решений постулирует, что рациональные агенты присваивают различные значения ценности, или «полезности»,

различным событиям, которые могут произойти, а потом предпочитают максимизировать ожидаемую полезность – получить среднее от всех возможных результатов, взвешенное по их вероятностям. Рассматривая два исхода,  $A$  и  $B$ , агент, присваивающий  $B$  вдвое большую полезность, чем  $A$ , должен одинаково воспринимать стопроцентную вероятность того, что произойдет  $A$ , и пятидесятипроцентную вероятность того, что произойдет  $B$ . Существует ряд разумно сформулированных аксиом, которым должно подчиняться любое грамотно выполненное присваивание полезности: например, если агент считает  $A$  предпочтительнее  $B$ , а  $B$  предпочтительнее  $C$ , то он, определенно, должен предпочесть  $A$  событию  $C$ . Считается, что любой, кто по жизни нарушает аксиомы принятия решений, действует иррационально.

Для использования этой структуры в контексте многомировой интерпретации зададимся вопросом: как должен действовать рациональный агент, если ему известно, что волновая функция Вселенной вот-вот разветвится, а также зная, каковы будут амплитуды разных веток? Например, электрон в равной суперпозиции верхнего и нижнего спинов пройдет через магнит Штерна – Герлаха, и при этом будет измерен его спин. Вам предложат вознаграждение в 2 доллара, если спин окажется верхним, но только в обмен на ваше ответное обещание – заплатить 1 доллар, если спин окажется нижним. Принимать ли такое предложение? Если мы доверяем правилу Борна, то, конечно же, примем его, поскольку наш ожидаемый выигрыш рассчитывается по формуле  $0,5(\$2) + 0,5(-\$1) = \$0,50$ . Но мы здесь пытаемся вывести правило Борна: как найти ответ, зная, что одна из ваших будущих ипостасей разбогатеет на 2 доллара, а другая поиздержится на 1? (Предположим, что вы достаточно состоятельны, так что доллар в плюс или в минус – это существенный, но не жизненно важный фактор.)

Здесь нас ждут более хитрые манипуляции, чем в вышеописанном случае, где мы объясняли вероятности как субъективные параметры в условиях неопределенности самолокализации, поэтому мы не будем вдаваться в детали, но идея остается неизменной. Сначала рассмотрим случай, в котором амплитуды в двух разных ветках равны, и продемонстрируем, что рационально вычислять ожидаемую полезность как простое среднее между двумя различными

полезностями. Затем предположим, что у нас неравновесное состояние, как  $\Psi$ , описанная выше. Далее я попрошу вас дать мне 1 доллар, если измеренный спин окажется верхним, и пообещаю вам 1 доллар, если измеренный спин окажется нижним. Немного математической эквилибристики – и мы покажем, что ожидаемая полезность в данной ситуации будет ровно такой же, как если бы опыт предполагал три возможных результата с равными амплитудами: вы даете мне 1 доллар за первый результат, а я даю вам 1 доллар за второй или третий. В таком случае ожидаемая ценность – это среднее трех разных результатов.

В конце концов, рациональный агент в эвереттовской Вселенной действует точно так же, как *если бы* он жил в недетерминированной Вселенной, где вероятности описываются по правилу Борна. Действовать иначе было бы иррационально, если мы принимаем различные правдоподобные аксиомы о том, что в данном контексте означает «быть рациональным».

Конечно, можно упрямо настаивать, будто мало показать, что люди должны действовать, «словно» что-то является верным, – оно должно быть верным на самом деле. Это небольшое недопонимание. Многомировая интерпретация предлагает нам такое представление реальности, которое кардинально отличается от обыденного одномирового представления, где события поистине случайны. Неудивительно, что некоторые убеждения, кажущиеся нам естественными, в этой интерпретации должны измениться. Если бы мы жили в мире академической квантовой механики, где коллапс волновой функции является по-настоящему случайным событием и подчиняется правилу Борна, то было бы рационально вычислять ожидаемую полезность строго определенным образом. Дойч и Уоллес показали, что если мы живем в детерминированной многомировой Вселенной, то рационально вычислять ожидаемую полезность ровно таким же образом. С этой точки зрения рассуждения о вероятностях строятся следующим образом: вероятности различных действительно происходящих событий эквивалентны весам, которые мы присваиваем этим событиям при расчете ожидаемой полезности. Мы должны действовать точно так, как если бы рассчитываемые нами вероятности применялись к единственной непредсказуемой Вселенной и они

остаются реальными вероятностями, пусть даже Вселенная устроена несколько сложнее.



## **Полнит ли меня это онтологическое обязательство?**

### ***Сократический диалог о квантовых загадках***

Некоторое время Алиса молча размышляла, наливая себе бокал вина.

– Так, давай разберемся, – сказала она наконец, – ты действительно хотел поговорить об основах квантовой механики?

– Конечно, – ответил ей отец, лукаво улыбнувшись.

Сам он был физиком и сделал успешную научную карьеру, мастерски справляясь с техническими расчетами в области физики частиц. Те самые экспериментаторы, что ставили опыты по столкновению частиц в Большом адронном коллайдере, регулярно обращались к нему по сложным вопросам, связанным с пучками частиц, возникающих при распаде верхних кварков. Однако в вопросах квантовой механики он был скорее пользователем, чем создателем.

– Пришло время разобраться, какими исследованиями занимается моя дочь.

– Хорошо, – ответила она.

Поначалу в аспирантуре она пошла той же дорожкой, что и отец, но ее постоянно отвлекало упорное стремление докопаться до истинного смысла квантовой механики. Ей казалось, что физики занимаются самообманом, игнорируя основания своей наиболее важной теории. Несколько лет спустя она защитила диссертацию по теоретической физике, но пошла работать старшим преподавателем на философском факультете крупного университета, снискав репутацию эксперта по многомировой интерпретации квантовой механики.

– С чего начнем? Я набросал тут кое-какие вопросы, – сказал он, доставая телефон, и открыл что-то на экране.

Алиса ощутила смесь любопытства и волнения.

– Тогда вперед, – сказала она, вдыхая аромат только что налитого бордо. Букет был интересный.



— Хорошо, — начал он. Себе он налил грязный martini, не слишком сухой, с тремя оливками. — Начнем с очевидного. Бритва Оккама. Нас с пеленок учат, что простые объяснения предпочтительнее слишком мудреных. Сейчас, если я правильно понимаю твою работу — может быть, вообще не понимаю, — мне кажется, что тебя не смущает постулат о бесконечном количестве невидимых миров. Не кажется ли тебе это слегка экстравагантным? Прямо противоположным самому простому из возможных объяснений?

Алиса кивнула:

— Ну, все зависит от того, что мы понимаем под «простым». Мои коллеги-философы иногда формулируют эту проблему как беспокойство об «онтологическом обязательстве» — грубо говоря, о том, какое количество всего содержащегося в реальности нам нужно вообразить только для того, чтобы описать ее наблюдаемую часть.

— Так не подсказывает ли бритва Оккама, что наличие слишком большого количества онтологических обязательств — непривлекательная черта для фундаментальной теории?

— Конечно, но для начала нужно хорошенько разобраться, что это за онтологическое обязательство. Многомировая интерпретация не *предполагает*, что существует множество миров. Она предполагает, что волновая функция эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера. Миров добавляются в интерпретацию автоматически.

— Что ты имеешь в виду? Она ведь буквально так и называется: многомировая интерпретация. Вполне логично, что она предполагает наличие множества миров.

— Не совсем, — ответила Алиса, все сильнее увлекаясь разговором, — в многомировой интерпретации те же составляющие, *что и во всех других версиях квантовой механики*. Но чтобы избавиться от множественности миров, в других версиях приходится идти на всякие ухищрения: либо дополнять уравнение Шрёдингера новой динамикой, либо добавлять в волновую функцию новые переменные, либо предлагать совершенно иной взгляд на реальность. С онтологической точки зрения многомировая интерпретация настолько компактна и эффективна, насколько вообще возможно.

– Да ты шутишь!

– Нет! Честно говоря, гораздо более веское возражение заключается в том, что многомировая интерпретация слишком легка и компактна, поэтому не так-то просто спроецировать ее формализм на наблюдаемый мир во всей его беспорядочности.

Ее отец задумался, ненадолго забыв о коктейле.

Алиса решила укрепить позиции.

– Поясню, что я имею в виду. Если мы считаем, что квантовая механика в какой-то степени описывает реальность, то верим, например, что электрон может находиться в суперпозиции верхнего и нижнего спинов. А поскольку и мы с тобой, и наши измерительные приборы состоят из электронов и других квантовых частиц, простейшее допущение – как раз по бритве Оккама – считать, что и ты, и я, и наши измерительные приборы также могут находиться в суперпозициях, и, если уж на то пошло, вся Вселенная может быть в суперпозициях. Именно это самым непосредственным образом подразумевает формализм квантовой механики, нравится нам это или нет. Разумеется, можно придумать разные способы, как усложнить теорию и избавиться от всех этих суперпозиций, либо перевести их в область нефизического, но только представь, как Уильям Оккамский заглядывает тебе через плечо и неодобрительно фыркает.

– По-моему, это уже софистика, – буркнул отец. – Отбросив всякую философию, набор в принципе ненаблюдаемых элементов вашей теории совсем не кажется таким уж простым.

– Никто не станет отрицать, что многомировая интерпретация подразумевает существование множества миров, – признала Алиса, – но это не противоречит простоте самой теории. Мы судим о теориях не по количеству объектов, которые они могут описать и действительно описывают, а по простоте их базовых идей. Идея целых чисел – « $-3$ ,  $-2$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $1$ ,  $2$ ,  $3$ » – гораздо проще, чем... ну, не знаю: « $-342$ ,  $7$ ,  $91$ , миллиард, простые числа меньше  $18$  и квадратный корень из  $3$ ». Во множестве целых чисел больше элементов – на самом деле их там бесконечно много, – но в них прослеживается простая закономерность, благодаря которой описывать их несравнимо проще.

– Хорошо, – ответил отец, – я понимаю, что ты хочешь сказать. Есть множество миров, но есть и простой принцип, объясняющий их появление, верно? Но все-таки, когда у нас будут все эти миры,

потребуется колоссальный объем математической информации, чтобы их описать. Не следует ли нам поискать теорию попроще, где они вообще не требуются?

– Ты можешь попробовать, – ответила Алиса, – как пробовали многие другие. Но, избавляясь от идеи множества миров, мы только усложняем теорию. Подумай об этом так: пространство всех возможных волновых функций, гильбертово пространство, очень велико. В многомировой интерпретации оно ничуть не больше, чем в других версиях квантовой теории, и этого пространства более чем достаточно, чтобы описать в нем большое количество параллельных реальностей. Если ты можешь описать суперпозиции электронов с разными спинами, ты с тем же успехом можешь описывать суперпозиции вселенных. Если ты вообще занимаешься квантовой механикой, то должен видеть потенциал для существования множества миров: они порождаются в ходе обычной шрёдингеровской эволюции, хочешь ты того или нет. В других подходах предпочитают не использовать все богатство гильбертова пространства. Существование других миров отвергается, и приходится хорошо постараться, чтобы как-то от них избавиться.



– Ладно, – пробормотал отец, не вполне убежденный, но готовый перейти к следующему вопросу. Он пригубил напиток и заглянул в телефон. – А нет ли с этой теорией и философской проблемы? Сам я не философ, но Карл Поппер не даст соврать: хорошая научная теория должна быть фальсифицируемой. Если ты не можешь даже представить эксперимент, который мог бы доказать ошибочность твоей теории, то ее нельзя считать настоящей наукой. Так и обстоят дела со всеми этими другими мирами, разве нет?

– И да и нет.

– Это дежурный ответ на любой философский вопрос.

– Верно, наша расплата за славу педантов, – рассмеялась Алиса. – Действительно, Поппер выдвигал такое предположение, что научные теории должны быть фальсифицируемы. Это была важная идея. Но на самом деле он имел в виду разницу между такими теориями, как,

например, эйнштейновская теория относительности, — она дает эмпирически проверяемые прогнозы об искривлении луча света под действием солнечной гравитации — и такими как, например, марксистский исторический материализм или фрейдистский психоанализ. Проблема с идеями из второй категории, считал он, заключается в том, что независимо от того, как все происходит на самом деле, такие теории позволяют придумать этому объяснение.

— Вот именно. Сам я Поппера не читал, но понимаю, что он точно подметил критически важный аспект науки.

Алиса кивнула:

— Подметил. Но, честно говоря, большинство современных философов науки соглашались, что это не полный ответ. Наука довольно запутана, и разница между наукой и ненаукой весьма тонка.

— Эх вы, всюду у вас тонкая разница! Неудивительно, что у вас не выходит никакого прогресса.

— Подожди, пап, мы подошли к кое-чему важному. В конечном счете Поппер хотел подчеркнуть, что хорошая научная теория обладает двумя характеристиками. Во-первых, она *определенная*: нельзя просто так вывернуть теорию, чтобы объяснить с ее помощью что угодно; именно этим отпугивали Поппера диалектический материализм и психоанализ. Во-вторых, она *эмпирическая*: теория не может считаться истинной, если она полностью умозрительна. Нет, все мы по-своему объясняем мир, выстраивая разные теории, а потом выбираем одну из этих теорий, выйдя в мир и посмотрев, как именно он устроен.

— В точку! — Видимо, отцу показалось, что разговор повернул в его пользу. — Эмпирическая. Но, если ты не можешь наблюдать все эти миры, ничего эмпирического в твоей теории нет.

— Отнюдь нет, — ответила Алиса. — Многомировая интерпретация обладает обеими этими характеристиками. Это не просто какая-то история, которую можно приспособить к любому наблюдаемому набору фактов. Ее постулаты просты: мир описывается квантовой волновой функцией, которая эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера. Эти постулаты реально фальсифицируемы. Просто поставь эксперимент и покажи, что квантовая интерференция не происходит там, где должна, либо что квантовая запутанность действительно может использоваться для коммуникации со сверхсветовой скоростью, или что волновая функция действительно

коллапсирует, даже без декогеренции. Многомировая интерпретация – вообще самая фальсифицируемая из всех когда-либо выдвигаемых теорий.

– Но эти эксперименты относятся не к многомировой интерпретации, – запротестовал отец, не желая сдавать позиции, – а ко всей квантовой механике в целом.

– Верно! Но эвереттовская квантовая механика – это просто чистая, строгая квантовая механика без каких-либо надстроек и предположений сверх того. Но, конечно, если они тебе нужны, мы непременно зададимся вопросом, а проверяемы ли они.

– Да брось. Определяющая характеристика многомировой интерпретации заключается в существовании всех этих миров где-то рядом. Наш мир не может с ними взаимодействовать, поэтому данный конкретный аспект теории непроверяем.

– Ну и что? В любой хорошей теории делаются те или иные непроверяемые прогнозы. Согласно нашему современному теоретическому пониманию общей теории относительности, сила тяготения завтра не может отключиться на десять миллисекунд в конкретной области пространства в десять метров в поперечнике и в двадцати миллионах световых лет от нас. Этот прогноз невозможно проверить, но тем не менее мы уверены, что это так. Нет никаких причин, по которым гравитация могла бы проявлять такие свойства, а если предположить, что такое возможно, то у нас получится гораздо более уродливая теория, чем та, что есть сейчас. Дополнительные миры в эвереттовской квантовой механике – это явление ровно такого же порядка: они неизбежно следуют из простого теоретического формализма. Мы должны признать их существование, если у нас не будет веских причин этого не делать.

– Кроме того, – добавила Алиса, – другие миры, в принципе, могут быть обнаружены, если нам невероятно повезет. Они никуда не делись, они так и остаются в волновой функции. По причине декогеренции крайне маловероятно, чтобы один мир интерферировал с другим, но метафизически это не исключено. Но я бы не стала подавать заявку на грант для такого эксперимента: все равно что добавить сливки в кофе, перемешать, а потом ждать, пока они спонтанно разделятся обратно.

– Не волнуйся, я на это и не рассчитывал. Просто, думаю, Карл Поппер был бы не в восторге от вашего подхода к философии науки.

– Тут, папа, ты попался, – сказала Алиса. – Поппер резко критиковал копенгагенскую интерпретацию, которую называл «ошибочной и даже порочной доктриной». Напротив, о многомировой интерпретации он отзывался лестно, описав ее как «совершенно объективное обсуждение квантовой механики».

– Seriously? Поппер был эвереттианцем?

– Не совсем, – призналась Алиса. – В конце концов их пути с Эвереттом разошлись, поскольку Поппер не понимал, почему волновая функция может ветвиться, но потом ее ветки не могут слиться обратно. Это хороший вопрос, но мы можем на него ответить.

– Даже не сомневаюсь. На чем же он остановился по части основ квантовой механики?

– Он разработал собственную формулировку квантовой механики, но она так и не прижилась.

– Ха! Философы.

– Да. Мы скорее объясним, почему ваша теория неверна, чем предложим что-то получше.



Отец Алисы вздохнул:

– Ладно. Не скажу, что ты меня в чем-то убедила, но я не хочу увязнуть в этих философских рассуждениях. Раз уж ты об этом упомянула, вопрос Поппера кажется весьма разумным. Действительно, почему миры только ветвятся, но не сливаются обратно? Если у нас есть спин в равной суперпозиции верхней и нижней составляющих, то можно спрогнозировать вероятность наблюдать любой из результатов, если выполнить измерение в будущем. Но если у нас чисто верхний спин, и нам сказали, что он только что был измерен, то мы никак не можем узнать, каков он был до измерения (разве что он точно не был чисто нижним). Откуда же берется эта разница?

Похоже, Алиса была к этому готова.

– Так это же просто термодинамика. Или как минимум стрела времени, направленная из прошлого в будущее. Мы помним вчерашний день, но не помним завтрашний; кофе со сливками

смешиваются, но спонтанно не разделяются обратно. Волновые функции ветвятся, но не сливаются.

– Звучит подозрительно циклично. Насколько я понимаю, одна из предполагаемых особенностей многомировой интерпретации заключается в том, что волновые функции подчиняются только уравнению Шрёдингера. Нет отдельного постулата о коллапсе. Когда я изучал квантовую механику, мы знали, что волновые функции коллапсируют в будущее, а не в прошлое, это было одним из допущений. Не понимаю, почему это должно соблюдаться у Эверетта, если уравнение Шрёдингера полностью обратимо. Как кофе и сливки связаны с волновыми функциями?

Алиса кивнула:

– Очень хороший вопрос. Давай немного обозначим контекст. Согласно второму закону термодинамики, энтропия – грубо говоря, степень неупорядоченности или случайности конфигурации, ну ты знаешь, – в закрытых системах никогда не снижается. Людвиг Больцман объяснил это еще в 1870-е. Энтропия учитывает, сколько существует способов расположения атомов, чтобы с макроскопической точки зрения система выглядела одинаково. Энтропия увеличивается по той простой причине, что конфигураций с высокой энтропией гораздо больше, чем конфигураций с низкой, поэтому почти нет такой вероятности, что энтропия когда-нибудь начнет снижаться. Так?

– Так, – согласился отец. – Но это классика. Больцман ничего не знал о квантовой механике.

– Верно, но основная идея все та же. Больцман объяснил, почему существует тенденция к увеличению энтропии, но не указал причину, по которой она изначально была низкой. В настоящее время мы признаем космологический факт: Вселенная возникла сразу после Большого взрыва в очень упорядоченном виде, и с тех пор энтропия естественным образом возрастала, поэтому существует стрела времени. На самом деле мы не знаем, почему в ранней Вселенной была такая низкая энтропия, хотя кое у кого есть идеи.

– И это важно, поскольку...

– Поскольку для сторонников Эверетта объяснение квантовой стрелы времени такое же, как и объяснение энтропийной стрелы времени: все дело в исходных условиях Вселенной. Ветвление происходит, когда системы запутываются с окружающей средой,



происходит декогеренция, и именно поэтому время движется в будущее, а не в прошлое. Количество веток в волновой функции со временем только увеличивается, как и энтропия. Это означает, что изначально количество веток было относительно невелико. Иными словами, в далеком прошлом наблюдалась низкая степень запутанности между различными системами и окружающей средой. Как и в случае с энтропией, именно такое исходное условие мы рассматриваем, когда говорим о начале Вселенной, хотя и не знаем – почему было так.

– Ладно, – сказал отец, – признать, что мы не знаем – уже хорошо. Согласно современным представлениям, стрелу времени мы объясняем особыми условиями, которые якобы сложились в прошлом. Является ли это единственным условием, которое объясняет как термодинамическую стрелу, так и квантовую стрелу, или же это просто аналогия?

– Думаю, больше, чем аналогия, но, честно говоря, это тема из тех, которые, пожалуй, заслуживают более тщательного исследования, – ответила Алиса. – Связь между ними, определенно, напрашивается. Энтропия связана с нашим неведением. Если у системы низкая энтропия, то на микроуровне в ней существует относительно немного конфигураций, которые на макроуровне выглядели бы одинаково, поэтому о такой системе можно узнать многое исходя из одних лишь ее макроскопических свойств. Если же энтропия высокая, то мы знаем о ней относительно немного. Джон фон Нейман осознал, что нечто подобное можно утверждать и о запутанных квантовых системах. Если система полностью не запутана с чем-либо еще, то можно спокойно рассуждать о ее волновой функции в отдельности от всего остального мира. Но когда она запутана, отдельная волновая функция не определена, и можно говорить только о волновой функции составной системы.

Отец просиял:

– Да, фон Нейман был блестящий человек, настоящий герой. Он был из той плеяды венгерских физиков, что эмигрировали в США – Силард, Вигнер, Теллер, – но он был лучше всех. Я смутно припоминаю, что это он вывел формулу энтропии.

Алиса кивнула:

– Именно так. Фон Нейман понял, что существует математическая эквивалентность между классической ситуацией, где мы не уверены в точном состоянии системы, порождающей энтропию, и квантовой ситуацией, где две системы запутаны, поэтому мы не можем говорить о волновой функции каждой из них в отдельности. Он вывел формулу для «энтропии запутанности» квантовой системы. Чем сильнее какая-либо система запутана с окружающим миром, тем выше ее энтропия.

– Ага! – воодушевленно воскликнул отец. – Я вижу, к чему ты клонишь. Тот факт, что волновая функция ветвится только по направлению в будущее, а не обратно, не просто напоминает об увеличении энтропии – это означает один и тот же факт. Низкая энтропия ранней Вселенной соответствует идее, что тогда существовало много незапутанных систем. По мере того как эти системы взаимодействуют и запутываются друг с другом, мы наблюдаем ветвление волновой функции.

– Точно, – ответила Алиса, испытывая нечто вроде дочерней гордости. – Мы до сих пор не знаем, почему Вселенная так устроена, но как только мы признаем, что ранняя Вселенная была относительно незапутанной, пребывая в состоянии низкой энтропии, из этого следует все остальное.

– Но подожди минутку, – кажется, отец только что о чем-то догадался, – по Больцману, энтропия только склонна возрастать, но это не абсолютное правило. Увеличение энтропии в конечном счете обусловлено случайными движениями атомов и молекул, поэтому существует ненулевая вероятность, что энтропия начнет спонтанно уменьшаться. Означает ли это, что когда-нибудь декогеренция может обратиться вспять и миры начнут сливаться, а не ветвиться?

– Совершенно верно, – кивнула Алиса, – но, как и в случае с энтропией, вероятность такого развития событий настолько смехотворно мала, что в повседневной жизни ею можно пренебречь. Ни в одном эксперименте в истории физики уменьшение энтропии также не наблюдалось. Крайне маловероятно, что две конфигурации, отличающиеся друг от друга в макромасштабе, претерпели бы рекогеренцию за все время существования нашей Вселенной.

– Но ты говоришь, что вероятность есть?

– Я говорю, что если тебя смущает возможность слияния веток в многомировой интерпретации, то ты явно исчерпал разумные доводы

для беспокойства и хватаешься за соломинку.



– Так, давай пока не будем слишком самонадеянными, – ворчливо сказал отец и, казалось, вернулся к своей скептической позиции. Он вытащил из бокала шпажку с оливкой и надкусил ее. – Лучше попробуем разобраться, о чем именно говорится в твоей теории. Верно ли считать, что количество миров, возникающих в любой момент времени, в буквальном смысле бесконечно велико?

– Ну, – сказала Алиса с некоторым сомнением, – боюсь, честный ответ на этот вопрос уведет нас еще дальше в философские дебри.

– Почему я не удивлен?

– Вернемся к аналогии с энтропией. Когда Больцман вывел свою формулу энтропии, он подсчитал количество таких конфигураций системы на микроуровне, которые на макроуровне выглядели бы одинаково. Из этого он сделал вывод, что энтропия должна естественным образом возрастать.

– Конечно, – сказал отец. – Но это реальная честная физика, она поддается экспериментальной проверке. Не совсем понимаю, как это связано с многомировыми полетами фантазии.

– Это сейчас мы так говорим. Но представь, что думали люди в те времена. – Алиса превратилась в заправского профессора, позабыв о своем бордо. – Больцман был прав, но против его идеи был выдвинут ряд возражений. Во-первых, он превращал энтропию из объективной характеристики физической системы в субъективную, зависевшую от некоего критерия «выглядят одинаково». Во-вторых, он разжаловал Второй закон<sup>[18]</sup> из абсолютной истины в обычную тенденцию, заявив, что энтропия вовсе не обязана увеличиваться, что это просто наиболее вероятно. Частицы мечутся туда-сюда, поэтому наиболее вероятно, что общее состояние будет эволюционировать в сторону увеличения энтропии, но определенность на уровне физического закона здесь отсутствует. Учитывая накопленный за годы наблюдений опыт, можно сказать, что субъективная природа определения Больцмана не мешает ему быть полезным, и то, что Второй закон термодинамики оказался действительно хорошим приближением, а не абсолютным нерушимым

законом, не мешает ему отлично работать в любых ситуациях, с которыми мы можем столкнуться.

– Я это понимаю, – ответил отец. – Энтропия объективно существует, но мы можем определить и измерить ее лишь после того, как примем несколько допущений. Но меня это никогда особо не волновало – она же полезна! А вот в существовании многих миров я вовсе не уверен.

– Дойдем и до этого, но пока позволь мне развить эту аналогию. Подобно энтропии, феномен «мира» в эвереттовской квантовой механике – это обобщенная концепция, а не фундаментальная. Это полезное приближение, помогающее делать физические выводы. Отдельные ветви волновой функции не закладываются в теорию на уровне ее базовой архитектуры. Просто нам, людям, исключительно удобно представлять себе суперпозицию множества таких миров, а не считать квантовое состояние недифференцированной абстракцией.

Глаза отца немного расширились.

– Так, все еще хуже, чем я думал. Ты пытаешься сказать, что сама концепция «мира» – это не вполне определенное понятие в многомировой интерпретации.

– Ну, не менее определенное, чем энтропия. Будь мы с тобой демонами Лапласа из XIX века, знающими координаты и импульс каждой частицы во Вселенной, нам никогда не пришлось бы опускаться до такого грубого понятия, как «энтропия». Аналогично, если бы мы знали точную волновую функцию Вселенной, то никогда не стали бы говорить о «ветвях». Но и в обоих случаях мы с тобой – всего лишь ограниченные создания с ограниченной информацией, и потому обращение к этим высокоуровневым концепциям оказывается весьма кстати.

Алиса чувствовала, что отец теряет терпение.

– Объясни мне нормально, сколько там вообще миров, – сказал он. – Если ты не можешь этого сделать, то продажник из тебя неважный.

– Должно быть, это та самая честность в любой ситуации, которую ты прививал мне с детства, – ответила Алиса, пожав плечами, – но все зависит от того, как именно мы будем делить квантовое состояние на миры.

– Должен же быть какой-нибудь один правильный способ сделать это?

– Иногда! В простых ситуациях, где измерения дают явно дискретные результаты. Так, при измерении спина электрона можно смело сказать, что волновая функция ветвится надвое, а количество миров – что бы это понятие ни значило – удваивается. Но когда мы измеряем величину, которая в принципе непрерывна, например координату частицы, все уже не настолько очевидно. В таком случае мы можем определить суммарный вес, присваиваемый конкретному интервалу возможных значений, узнать квадрат волновой функции, но абсолютное количество веток узнать не можем. Это количество будет зависеть от того, насколько тонко мы решим поделить наше описание результата измерения, то есть в конечном счете оно зависит от нашего выбора. Мне очень нравится, как по этому поводу выразился Дэвид Уоллес: «Спрашивать, сколько всего миров – все равно что интересоваться, сколько впечатлений вы вчера получили или сколько сожалений было у раскаявшегося преступника. В обоих случаях уместно перечислить только самое важное, но вопрос “сколько?” неуместен».

Но ее собеседника это явно не удовлетворило. Немного подумав, отец ответил:

– Смотри, я здесь пытаюсь быть честным. Готов признать, что миры не фундаментальны, поэтому в их определении присутствует некоторое приближение. Но ты ведь можешь сказать мне, существует ли конечное количество миров или они по-настоящему бесчисленны?

– Честный вопрос, – согласилась Алиса с некоторой неохотой. – К сожалению, ответа мы не знаем. Есть верхний предел количества миров, равный размеру гильбертова пространства – пространства всех возможных волновых функций.

– Но нам известно, что гильбертово пространство бесконечно велико, – заметил отец. – Оно бесконечномерно даже для единственной частицы, что уж говорить о квантовой теории поля. Поэтому звучит так, будто и количество миров бесконечно.

– Мы не уверены, конечно или бесконечно число измерений у гильбертова пространства в нашей конкретной Вселенной. Но нам известны некоторые системы, которым соответствуют гильбертовы пространства с конечным числом измерений. Например, у одного кубита спин может быть верхним или нижним, так что он соответствует двумерному гильбертову пространству. Если у нас есть

$N$  кубитов, то соответствующее им гильбертово пространство является  $2^N$ -мерным – размеры гильбертова пространства растут по экспоненте при увеличении количества частиц, которые мы в него включаем. Так, в чашке кофе примерно  $10^{25}$  электронов, протонов и нейтронов, и спин каждого из них описывается кубитом. Значит, гильбертово пространство для чашки кофе – с учетом одних только спинов, координаты частиц мы в данном случае не рассматриваем – имеет размерность около.

– Излишне говорить, – продолжала Алиса, – что это безумно большое число. Единица с  $10^{25}$  нулями, если записать в двоичной системе. Впрочем, ты бы все равно не успел сделать это – для записи такого числа времени нужно больше, чем существует вся наблюдаемая Вселенная.

– Но ты ведь явно жульничаешь, фактическое число гораздо больше, – ответил отец. – Ты считаешь спины, но у частиц есть и координаты в пространстве. И таких координат бесконечное множество. Вот почему гильбертово пространство для совокупности частиц бесконечномерно – количество измерений просто равно числу возможных результатов измерения.

– Верно. Хью Эверетт действительно считал, что любое квантовое измерение делит Вселенную на бесконечное количество миров, и его это вполне устраивало. Кажется, что бесконечность – это много, но в физике мы постоянно оперируем бесконечными величинами. Вещественных чисел от 0 до 1 бесконечно много, ты же знаешь. Если гильбертово пространство бесконечномерно, то не имеет особого смысла говорить о количестве отдельных миров. Но можно группировать похожие миры и говорить об их общем весе – квадрате амплитуды, – который они имеют в сравнении с другой группой.

– Отлично. Итак, гильбертово пространство бесконечномерно, но ты хочешь сказать, что следует говорить лишь об относительном весе различных видов миров?

– Сначала дослушай! – настаивала Алиса. – Реальный мир – это не набор частиц, и квантовая теория поля его тоже не описывает.

– Правда? – спросил отец с деланным отчаянием. – Чем же я тогда занимаюсь всю жизнь?

– Ты игнорируешь гравитацию, – ответила Алиса. – И это вполне разумно, когда речь идет о физике элементарных частиц. Но со

стороны квантовой гравитации существуют признаки, позволяющие предположить, что количество различных возможных квантовых состояний конечно. Если это так, то существует максимальное количество миров, о которых разумно говорить, учитывая размерность гильбертова пространства. Есть расхожие оценки количества измерений гильбертова пространства в наблюдаемой части Вселенной, порядка. Большое число, но любое даже очень большое конечное число гораздо меньше бесконечности.

Ее отец, казалось, задумался.

– Хм... Откровенно говоря, не уверен, что мы знаем что-то о квантовой гравитации наверняка...

– Поэтому я и говорю, что мы на самом деле не знаем, конечно или бесконечно количество миров.

– Справедливо. Но тогда у нас новая проблема. Мне кажется, что ветвление должно происходить постоянно, всякий раз, когда квантовая система запутывается с окружающей средой. Можно ли предположить, что даже это ошеломительно большое число, которое ты только что назвала, недостаточно велико? Мы уверены, что в гильбертовом пространстве найдется место для всех веток волновой функции, возникающих во Вселенной по мере ее развития?

– Хм, честно говоря, никогда об этом не задумывалась. – Алиса взяла салфетку и стала набрасывать на ней какие-то числа. – Посмотрим, значит, в наблюдаемой части Вселенной где-то  $10^{88}$  частиц, в основном это фотоны и нейтрино. По большей части они мирно путешествуют в пространстве, ни с чем не взаимодействуя и не запутываясь. Итак, с большим запасом предположим, что каждая частица во Вселенной каждую секунду участвует в миллионе взаимодействий, при каждом из которых волновая функция делится надвое, и это происходит с момента Большого взрыва, который наступил примерно  $10^{18}$  секунд назад. Это  $10^{88} \times 10^6 \times 10^{18} = 10^{112}$  разделений, общее число ветвей получается равно.

– Хорошо, – кажется, Алиса была очень довольна собой, – все равно большое число, но гораздо меньше, чем количество измерений в гильбертовом пространстве Вселенной. На самом деле несравнимо меньше. Поэтому можно смело зависить количество необходимых веток. Так что даже если у нас нет четкого представления о количестве

веток, можно не беспокоиться, что гильбертово пространство переполнится.



– Ну хорошо, а то я немного заволновался. – Мартини приобрело приятную солоноватость от оливок. Отцу нравилось, насколько Алиса похожа на него. – Неужели ты никогда раньше не задавалась этим вопросом?

– Думаю, большинство эвереттианцев обучаются думать об относительных весах различных ветвей волновой функции, а не подсчитывать что-либо. Мы не знаем конечного ответа, поэтому кажется, что нет особого смысла об этом беспокоиться.

– Мне нужно какое-то время, чтобы это переварить. Я всегда думал, что предполагается существование бесконечного количества миров и что многомировая интерпретация подразумевает, что где-то может произойти что угодно, а в волновой функции присутствуют все возможные миры. Думал, что в этом и есть ее фишка. В моменты, когда я никак не мог сделать правильные расчеты, было приятно думать, что в каком-то другом мире я оказался тибетским ламой или гениальным миллиардером-филантропом, хозяином жизни.

– Подожди, разве нет? – Алиса изобразила удивление. – Мне всегда казалось, что ты немного похож на ламу.

– Раз уж на то пошло, в каком-то мире я должен был родиться ламой-миллиардером.

– Пока мы не сбились с темы, – продолжила она, – замечу, что ты был бы не ламой или миллиардером, а совершенно другим человеком. Уверена, мы еще вернемся к этому. Но, что более существенно для нашего разговора, многомировая интерпретация не утверждает, будто где-то происходит «все что угодно»: она утверждает, что «волновая функция эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера». Некоторые события никогда не происходят, потому что уравнение Шрёдингера к ним не приводит. Например, мы никогда не увидим спонтанного превращения электрона в протон. В результате изменился бы суммарный электрический заряд, а заряд всегда сохраняется. Таким образом, при ветвлении не могут образоваться вселенные, чей заряд



был бы больше или меньше, чем в исходной. Да, в эвереттовской квантовой механике происходит много всего, но не все что угодно.

Отец скептически приподнял бровь:

– Дорогая, ты же явно юлишь, чтобы сохранить лицо. Может быть, строго говоря, происходит не все что угодно, но получается, что во всех этих разных мирах происходит огромное множество самых невообразимых вещей, разве нет?

– Естественно, с радостью это признаю. Всякий раз, когда ты врезаешься в стену, волновая функция делится на несколько миров: в каком-то ты разбиваешь себе нос, в каком-то туннелируешь через стену целым и невредимым, а где-то отскакиваешь от стены и пролетаешь через всю комнату.

– Но это ведь очень важно, правда? В обычной квантовой механике существует ненулевая вероятность, что объект туннелирует через стену, но она настолько незначительна, что мы смело можем ею пренебречь. А в многомировой интерпретации существует 100 %-ная вероятность, что в каком-то мире так оно и будет.

Алиса кивнула, но было понятно, что ей не впервые задают этот вопрос.

– Ты абсолютно прав, разница есть. Но готова поспорить, что это не имеет ни малейшего значения. Если ты согласен с тем, как эвереттианцы выводят правило Борна, то должен действовать так, словно вероятность туннелирования через стену *существует*, но что она настолько смехотворно мала, что нет абсолютно никаких причин учитывать ее в повседневной жизни. А если ты не принимаешь этой аргументации, то лучше побеспокоиться о более серьезных проблемах, которые представляет для тебя многомировая интерпретация.

Отец гнул свою линию.

– Я считаю, что проблема этих маловероятных миров важна. Как быть с теми наблюдателями, которые, оказавшись в каком-то из множества эвереттовских миров, увидят события, с виду нарушающие прогнозы, сделанные по правилу Борна? Если мы пятьдесят раз измерим спин, то будут ветки, в которых во всех пятидесяти случаях спин окажется верхним, а в других ветках он окажется неизменно нижним. Какие выводы о квантовой механике должны сделать эти несчастные наблюдатели?

– Что ж, – сказала Алиса, – будем считать, что им не повезло. Всякое бывает. Но общий вес, присвоенный этим наблюдателям, настолько мал, что мы не должны слишком о них беспокоиться. К тому же, даже если они получают пятьдесят верхних спинов подряд, то следующие пятьдесят попыток у них будут с ошеломительной точностью соответствовать прогнозам, сделанным по правилу Борна. Скорее всего, свой первый счастливый отрезок они свяжут с ошибкой эксперимента, у них появится забавная байка, которую можно будет рассказывать коллегам по лаборатории. Так же как в случае с очень большой классической Вселенной. Если те условия, что наблюдаются в видимой части Вселенной, распространяются на бесконечное расстояние в любом направлении, то более чем вероятно, что существуют и другие цивилизации, точно такие, как наша, – бесконечно много на самом деле – и там тоже проводят эксперименты для проверки квантовой механики. Даже если каждый из них получит результаты, вероятности которых распределились по правилу Борна, статистика у многих из них будет сильно отличаться. В таком случае они могут сделать неверные выводы о том, как устроена квантовая механика. Этим наблюдателям не повезло, но мы можем утешиться тем фактом, что они крайне редко встречаются среди всех наблюдателей во Вселенной.

– Им-то от этого не легче! С вашим взглядом на физику всегда найдутся наблюдатели, которые в корне неверно понимают законы природы.

– А никто и не обещал, что будет легко. Такая проблема существует в любой теории, которая подразумевает большое количество наблюдателей. Многомировая интерпретация – лишь один из примеров такой теории. Смысл в том, что в эвереттовской квантовой механике существует способ сравнить все разнообразные миры: взять амплитуды их веток и возвести в квадрат. Ветки, в которых будут происходить разные удивительные вещи, имеют совсем крошечные амплитуды. Они редко встречаются во всей совокупности миров. Их существование должно нас волновать не более чем существование невезучих наблюдателей в бесконечно больших вселенных.



– Не думаю, что здесь ты меня убедила, но давай просто добавим этот пункт в список того, что меня беспокоит, и пойдем дальше. – Отец заглянул в телефон, где у него был перечень заготовленных вопросов. – Я кое-что почитал, в том числе некоторые из твоих статей, и что мне понравилось в многомировой интерпретации – так это то, что она убирает всякую мистику из процесса измерения. В измерении нет ничего особенного: оно происходит, когда квантовая система, пребывающая в суперпозиции, запутывается с обширной окружающей средой, что приводит к декогеренции и ветвлению волновой функции. Но существует всего одна волновая функция, волновая функция Вселенной, описывающая все, что происходит в пространстве. Как рассматривать ветвление в глобальной перспективе? Происходит ли все ветвление сразу или оно постепенно распространяется из той системы, в которой произошло взаимодействие?

– Ох, папа!.. Думаю, сейчас будет еще один ответ, который тебя не устроит. – Алиса прервалась, чтобы отрезать себе кусочек сыра. Она аккуратно уложила его на крекер, обдумывая, как бы лучше ответить. – В принципе, зависит от тебя. Или, выразимся более научно, сам феномен «ветвления» придуман людьми, чтобы дать удобное описание сложной волновой функции. А будем ли мы считать ветвление мгновенным событием или распространяющимся из точки – зависит от ситуации.

Отец тряхнул головой:

– Я думал, в ветвлении вся суть. Как можно считать многомировую интерпретацию заслуживающей уважения научной теорией, если мы не только не можем наблюдать другие ветки или сосчитать их, но даже не имеем четкого критерия, который позволял бы судить, как происходит ветвление? Ветвление – это всего лишь твое мнение, детка?

Он всегда слишком увлекался киношными фразами.

– В определенном смысле – конечно. Но не все мнения одинаково хороши. Например, ты можешь предпочесть объяснение, согласно которому ничто не движется быстрее света. В данном случае важно, что мы не в состоянии общаться или передавать информацию со сверхсветовой скоростью, и совершенно не имеет значения, каким объяснением ты решишь воспользоваться. Но если тебе больше нравится ограничить явный физический эффект, такой, как ветвление,

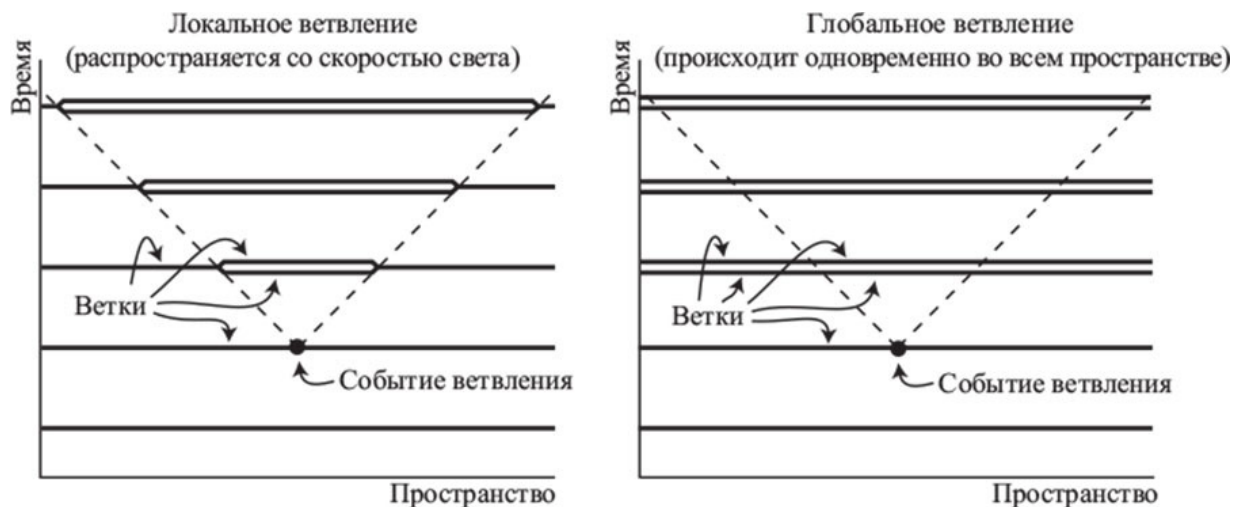
и объявить, что оно не может распространяться со сверхсветовой скоростью, — конечно, ты можешь это сделать. В таком случае количество веток волновой функции будет отличаться в зависимости от того, в какой точке пространства-времени ты находишься. — Она взяла чистую салфетку и вновь стала что-то на ней чертить — на этот раз у нее получались маленькие схемы из прямых линий. — Здесь у нас пространство откладывается слева направо, а время идет вверх. Лучи света, которые могут излучаться при некотором событии, уходят вверх под углом в сорок пять градусов. Если мы начнем с единственной ветки волновой функции, то можем представить, что при таком событии происходит ветвление, которое затем распространяется во времени (вверх), но не быстрее скорости света. Наблюдатели, которые находятся сравнительно далеко, будут описываться одной веткой, а те, которые ближе, — двумя. Это согласуется с идеей, что далекие наблюдатели никак не смогут ни узнать о событии ветвления, ни испытать на себе его влияние, а те, кто находятся поблизости, — смогут.

Отец внимательно изучил схему.

— Вижу. Я предполагал, что ветвление происходит одновременно во всей Вселенной, и это меня беспокоило — ты же знаешь, как я люблю специальную теорию относительности. Уверен, ты не хуже меня понимаешь, что разные наблюдатели будут по-разному определять одновременность. Мне больше нравится такой вариант, где ветвление распространяется со скоростью света. Все эффекты выглядят весьма локально.

Алиса взмахнула руками, прежде чем продолжить рисовать.

— Но есть и другой вариант. Мы также вправе считать, что ветвление происходит одновременно во всей Вселенной. Такой подход полезен, когда мы выводим правило Борна с использованием неопределенности самолокализации, поскольку можем уверенно говорить, в какой ветке вы оказываетесь сразу после ветвления, независимо от того, где оно произошло. Согласно теории относительности, наблюдатели, движущиеся на разных скоростях, будут вычерчивать ветки тоже по-разному, но никакой разницы в наблюдениях из-за этого не возникнет.



– Р-р-р-р! Ты все испортила. Теперь ты говоришь мне, что ветвление с тем же успехом можно считать полностью нелокальным.

– Да, но на самом деле я просто хочу сказать, что вопрос: «Является ли многомировая интерпретация локальной теорией?» не слишком хорош. Лучше спросить: «Можно ли описать ветвление как локальный процесс, протекающий только внутри области будущего светового конуса этого события?» Ответ: «Да, но с тем же успехом мы можем описать этот процесс как нелокальный, происходящий сразу во всей Вселенной».

Ее отец спрятал лицо в ладонях, но, казалось, он пытается переварить услышанное, не впадая в отчаяние. Затем он встал и, нахмурившись, смешал себе новую порцию martinis. Он вернулся в кресло, держа в одной руке бокал, а в другой – горсть орешков.

– Полагаю, смысл заключается в том, что независимо от того, считаю ли я, что человек очень далеко от меня разделился на две ветки, для них обоих это не имеет никакого значения. Каждого из этих людей я могу представлять в одном либо в двух идентичных экземплярах. Всего лишь вопрос описания.

– Вот именно! – воскликнула Алиса. – Независимо от того, как мы трактуем ветвление: либо как процесс, распространяющийся со скоростью света, либо как происходящий везде одновременно, – все зависит от того, как нам удобнее. Что-то наподобие вопроса, в чем мы будем измерять длину – в сантиметрах или дюймах.

Отец закатил глаза:

– Ну что за варварство – измерять длину в дюймах?



– Ладно, давай сменим тему, – сказал он чуть погодя. – Знаю, что теоретики-струнники и другие, кого не особо волнует привязка к реальности, любят рассуждать о других измерениях. А ветки там есть? Где все-таки находятся эти другие миры?

– Да ладно, Роберт, – обычно Алиса называла отца по имени, когда начинала на него сердиться, – ты же сам это знаешь. Ветки нигде не «находятся». Ты привык считать, что все вещи расположены где-то в пространстве, поэтому тебе кажется естественным спрашивать, где находятся иные миры. Но нет такого «места», где были бы скрыты эти ветки: они просто существуют одновременно с нашей, фактически с ней не контактируя. Предполагаю, они существуют в гильбертовом пространстве, но его нельзя назвать «местом». «Есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам».

Она с гордостью подумала, как здорово смогла вернуть цитату из Шекспира.

– Знаю. Мы с тобой уже выпили по паре бокалов, и я решил подбросить тебе разгрузочный вопрос.



Он немного пролистал вниз заметки у себя в телефоне.

– Хорошо, теперь давай о серьезном. Вот какой вопрос все время не давал мне покоя. Что насчет сохранения энергии? Откуда берется вся эта новая *материя*, когда внезапно создается целая новая вселенная?

– Что ж, – сказала Алиса, – давай просто вернемся к обычной академической квантовой механике. Зная квантовое состояние, можно вычислить полную энергию этого состояния. Поскольку волновая функция эволюционирует в строгом соответствии с уравнением Шрёдингера, эта энергия исправно сохраняется, так?

– Конечно.

– Вот и все. В многомировой интерпретации волновая функция подчиняется уравнению Шрёдингера, согласно которому энергия сохраняется.

– Но что насчет дополнительных миров? – не отступал отец. – Я могу измерить энергию, заключенную в мире вокруг меня, а ты говоришь, что она постоянно удваивается.

Здесь Алиса чувствовала себя уверенно.

– Не все миры получаются одинаковыми. Подумай о волновой функции. Когда она описывает множество ветвящихся миров, мы можем рассчитать их общую энергию, суммировав значения энергии каждого отдельного мира, умноженные на вес (амплитуду в квадрате) этого мира. Когда один мир делится надвое, энергия в обоих мирах остается такой же, как и в породившем их мире (с точки зрения любого обитателя этих миров), но вклад каждого из них в общую энергию волновой функции Вселенной стал вполтину меньше, поскольку их амплитуды уменьшились. Каждый из миров стал немного тоньше, хотя их обитатели не замечают никакой разницы.

– Математически я тебя понимаю, – согласился отец, – но на интуитивном уровне здесь чего-то недостает. Допустим, у меня есть шар для боулинга, у него есть определенная масса и потенциальная энергия. Но в соседней комнате кто-то пронаблюдал квантовый спин, и из-за этого волновая функция раздвоилась. Теперь у нас два шара для боулинга, и энергия каждого из них такая же, как у того, что был до измерения. Разве нет?

– Здесь ты игнорируешь амплитуды веток. Вклад шара для боулинга в энергию Вселенной – это не только его масса и потенциальная энергия, эти величины еще нужно умножить на вес его ветки в волновой функции. После разделения ситуация выглядит так, будто у нас стало два шара для боулинга, но их общий вклад в энергию волновой функции такой же, как у одного шара ранее.

Ее отец, казалось, задумался.

– Не уверен, что согласен с тобой, но, думаю, ты меня уболтала, – пробормотал он.

И вновь заглянул в свой список вопросов.



– Знаешь, а у меня остался всего один вопрос. – Отец отложил телефон, сделал глоток martini и слегка наклонился вперед. – Ты

действительно в это веришь? Честно? Всякий раз, когда кто-нибудь измеряет спин частицы, появляется множество моих копий?

Алиса откинулась на спинку кресла, посмаковала вино и задумчиво посмотрела на отца.

– Действительно верю. По крайней мере, лично я нахожу эвереттовскую квантовую механику со всем тем множеством миров, которые она подразумевает, самой правдоподобной версией квантовой теории, которая мне известна. Если при этом я должна признать, что мое нынешнее «я», развиваясь, превращается во множество слегка иных будущих «я», которые не смогут пообщаться друг с другом, я могу это принять. Но я всегда готова пересмотреть свои взгляды, если в будущем появится новая информация: на основе результатов экспериментов или теоретических находок.

– Ты хороший эмпирик, – отец улыбнулся.

– Позволь мне процитировать Дэвида Дойча, – предложила Алиса. – Он как-то сказал: «Несмотря на непревзойденный эмпирический успех квантовой теории, само предположение, что *она может быть буквальным и верным описанием природы*, все еще встречают цинизмом, непониманием и даже гневом».

– Что ты хочешь этим сказать? Любой физик согласится, что квантовая механика описывает природу.

– Думаю, что Дойч, говоря о «квантовой теории», имел в виду многомировую интерпретацию. – Теперь настал черед Алисы улыбнуться. – Он имел в виду, что многие отрицают эвереттовскую квантовую механику по той простой причине, что она внутренне им претит, а не потому, что у них есть принципиальные возражения. Но, как однажды сказал философ Дэвид Льюис: «Я не знаю, как опровергнуть недоверчивый взгляд скептика».

– Надеюсь, меня ты к таким скептикам не причисляешь. – Отец выглядел слегка задетым. – Я просто пытался понять эту теорию с принципиальной точки зрения.

– Так и есть! – ответила Алиса. – Мы с тобой поговорили, и независимо от того, удалось ли мне тебя в чем-то убедить или нет, именно так и должны разговаривать вдумчивые физики. Мне важно не перетянуть всех на сторону Эверетта, а сделать более серьезным отношение ученых к проблеме понимания квантовой механики. Я бы скорее подискутировала, например, с ярым противником скрытых



переменных, чем попыталась заинтересовать ими того, кого они просто не волнуют.

Отец кивнул.

– Пришлось потратить на меня некоторое время. Но да, мне интересно, – он улыбнулся дочери. – Ведь наша задача – во всем разобраться, правда?

## Иные пути

### *Альтернативы многомировой интерпретации*

Дэвид Альберт, в настоящее время – профессор Колумбийского университета и один из ведущих исследователей основ квантовой механики, когда-то получил весьма характерный опыт аспиранта, заинтересовавшегося этой темой. Он учился в аспирантуре на физическом факультете Рокфеллеровского университета, когда прочитал книгу Дэвида Юма, английского философа XVIII века, о взаимосвязи знаний и опыта. Тогда Альберт и пришел к убеждению, что в физике недостает понимания проблемы квантового измерения (Юм ничего не знал о проблеме измерения – в отличие от Альберта). В конце 1970-х никого в Рокфеллеровском университете не интересовали размышления в таком духе, поэтому Альберт завязал знакомство с человеком, жившим на другом краю света, – это был знаменитый израильский физик Якир Ааронов. Вместе они написали несколько влиятельных статей. Но, когда Альберт попытался использовать этот материал в своей диссертации на соискание степени PhD, руководство Рокфеллеровского университета пришло в ужас. Под угрозой полного отчисления из университета Альберт был вынужден написать отдельную диссертацию по математической физике. Как он вспоминал впоследствии: «Эту тему мне навязали, считая, что она пойдет на пользу моему характеру. В ней прослеживался отчетливый карательный элемент».

Физикам не удастся прийти к консенсусу относительно того, в чем именно заключаются основания квантовой механики. Но во второй половине XX века они добились значительных успехов в согласовании точек зрения по смежному вопросу: каковы бы ни были основания квантовой механики, *говорить* о них определенно не следует. Не нужно отвлекаться на них в ущерб серьезным делам: расчетам и конструированию новых моделей полей и частиц.

Как мы знаем, Эверетт бросил академическую работу, даже не попытавшись стать профессором физики. Дэвид Бом, который учился и работал под руководством Роберта Оппенгеймера в 1940-х годах,

предложил оригинальный способ использования скрытых переменных для решения проблемы измерения. Но после семинара, на котором другой физик объяснял идеи Боба, Оппенгеймер громко усмехнулся: «Если мы не можем опровергнуть Боба, тогда мы должны все вместе игнорировать его». Джон Белл, который сделал больше, чем кто-либо другой, чтобы прояснить явно нелокальную природу квантовой запутанности, намеренно скрывал свою работу на данную тему от коллег по ЦЕРН, в кругу которых считался относительно традиционным физиком-теоретиком. У него учился Ханс Дитер Цех, который первым начал прорабатывать концепцию декогеренции еще в 1970-е, будучи молодым исследователем. Белл предупреждал Цеха, что работа над этой темой может угрожать его академической карьере. Действительно, тот столкнулся с большими трудностями при попытках опубликовать свои ранние статьи: рецензенты научных журналов характеризовали его статьи как «совершенно бессмысленные», указывая, что «квантовая теория неприменима к макроскопическим объектам». Голландский физик Сэмюэл Гаудсмит, работавший редактором в журнале *Physical Review*, в 1973 году составил служебную записку, в которой запретил журналу даже рассматривать статьи по основаниям квантовой механики, если только в них не делалось новых экспериментальных прогнозов. (Если бы эта политика действовала ранее, то журналу пришлось бы отвергнуть и статью Эйнштейна – Подольского – Розена, а также ответ Бора на нее.)

И все же, как видно из этих историй, несмотря на все чинимые им препятствия, часть физиков и философов упорно пытались лучше понять природу квантовой реальности. Многомировая интерпретация (в особенности после того, как процесс ветвления удалось прояснить с помощью декогеренции) – многообещающий подход, который, возможно, позволит разгадать загадки, связанные с проблемой измерения. Но есть и другие подходы, заслуживающие рассмотрения. Они ценны и потому, что действительно могут оказаться верными (а это всегда наилучшая причина для исследований), и потому, что при сравнении совершенно разных механизмов, на которых они основаны, мы полнее понимаем квантовую механику независимо от того, какой конкретный подход нам больше понравится.

За годы работы было предложено впечатляющее множество альтернативных формулировок квантовой теории (в соответствующей

статье английской «Википедии» отдельно упоминается шестнадцать «интерпретаций», а также есть категория «другие»). Здесь мы рассмотрим три основных подхода, конкурирующих с эвереттовским: динамический коллапс, скрытые переменные и эпистемологические теории. Список далеко не исчерпывающий, но хорошо иллюстрирующий основные стратегии, которыми пользовались ученые.



Достоинством многомировой интерпретации является простота ее базовой формулировки: существует волновая функция, эволюционирующая согласно уравнению Шрёдингера. Все остальное — это комментарии. Некоторые из этих комментариев, такие как разграничение на системы и окружающую их среду, декогеренция и ветвление волновой функции, крайне полезны и действительно незаменимы для соотнесения лаконичной красоты основополагающего формализма и нашего нестройного восприятия мира.

Как бы вы ни относились к многомировой интерпретации, в силу своей простоты она служит хорошей отправной точкой для рассмотрения альтернатив. Если вы глубоко скептически относитесь к тому, что в многомировой интерпретации предлагаются хорошие ответы на проблему вероятности, или сама идея существования всех этих миров вам глубоко неприятна, то придется вам каким-то образом модифицировать многомировую интерпретацию. Учитывая, что в многомировой интерпретации речь идет только о «волновой функции и уравнении Шрёдингера», сразу напрашиваются несколько разумных вариантов, как это сделать: можно преобразовать уравнение Шрёдингера так, чтобы множественные миры никогда не возникали; можно добавить новые переменные в дополнение к волновой функции; можно переосмыслить волновую функцию как утверждение о наших знаниях, а не как непосредственное описание реальности. Все эти дороги уже с энтузиазмом исхожены.

Сначала поговорим о возможности изменить уравнение Шрёдингера. По-видимому, такой подход находится в зоне комфорта большинства физиков: не успеет сформироваться новая успешная

теория, как теоретики уже обдумывают, как бы они могли поиграть с лежащими в основе этой теории уравнениями и улучшить ее. Сам Шрёдингер изначально надеялся, что его уравнение будет описывать волны, которые естественным образом локализуются в сгустки и, если рассматривать их издалека, ведут себя как частицы. Возможно, при некоторой доработке его уравнения можно было бы достичь этой цели и даже естественным образом решить проблему измерения, не привнося в общую картину множество миров.

Но на самом деле все сложнее, чем кажется. Если мы попробуем сделать самое очевидное – добавить в уравнение новые члены, например  $\Psi^2$ , то можем разрушить важные свойства теории, например то, что вся совокупность вероятностей в сумме дает единицу. Но физиков редко останавливают препятствия такого рода. Стивен Вайнберг, автор успешной модели, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия в Стандартной модели физики элементарных частиц, предложил толковую модификацию уравнения Шрёдингера, которая позволяет сохранять общую вероятность с течением времени. Однако все имеет свою цену: простейшая версия теории Вайнберга допускает обмен сигналами между запутанными частицами на сверхсветовой скорости, чем противоречит теореме бессигнальности, принятой в традиционной квантовой механике. Это можно исправить, но тогда происходит нечто еще более странное: в волновой функции появляются не только дополнительные ветви, но и возможность передачи сигналов между ними. Возникает феномен, который физик Джо Полчински окрестил «эвереттовским телефоном». Может, это и неплохо, если вы не прочь основывать каждый свой жизненный выбор на результатах квантовых измерений, а затем сверяться с вашими альтернативными «я», чтобы узнать, какой из них был лучшим. Но представляется, что природа устроена иначе. Причем такой подход не позволяет решить проблему измерения или избавиться от других миров.

В ретроспективе это имеет смысл. Рассмотрим электрон, чей спин направлен точно вверх. Это состояние с тем же успехом можно выразить как равную суперпозицию левого и правого спинов, где при наблюдении вдоль горизонтального магнитного поля существует 50 %-ная вероятность наблюдать любой из двух результатов. Однако именно по причине равенства двух этих вариантов сложно представить, как

детерминированное уравнение позволило бы спрогнозировать, какой из двух вариантов мы увидим (по крайней мере, без введения новых переменных, несущих дополнительную информацию). Что-то должно было нарушить баланс между левым и правым спинами.

Следовательно, нам придется мыслить радикальнее. Мы не просто возьмем уравнение Шрёдингера и осторожно его подкрутим, мы соберемся с духом и введем совершенно иной способ эволюции волновой функции, который подавляет ветвление. Множество экспериментальных данных убеждает нас, что волновые функции *обычно* подчиняются уравнению Шрёдингера, по крайней мере когда их не наблюдают. Но, может быть, в редких, но критически важных случаях они ведут себя иначе.

Чем это может быть вызвано? Мы пытаемся избежать экзистенциального ужаса, возникающего от мысли, что единственная волновая функция описывает множество копий макромиира. А если представить, что волновые функции время от времени претерпевают *спонтанный коллапс*, вдруг превращаясь из распределенных по различным вероятностям (скажем, координат в пространстве) в относительно плотно локализованные вокруг одной точки? Это и есть ключевое новое свойство моделей динамического коллапса, наиболее известная из которых называется «теория ГРВ» – по первым буквам фамилий сформулировавших ее ученых: Джанкарло Гирарди, Альберто Римини и Туллио Вебера.

Представьте себе электрон в пустом пространстве, не связанный ни с одним атомным ядром. Согласно уравнению Шрёдингера, при естественной эволюции такой частицы ее волновая функция распределяется в пространстве и становится все более диффузной. К этой картине теория ГРВ добавляет постулат, согласно которому в любой момент существует некоторая вероятность, что волновая функция радикально и мгновенно изменится. Пик новой волновой функции сам выбирается из вероятностного распределения, того же самого, которое мы использовали бы для прогнозирования координаты электрона, которое мы бы измерили в соответствии с его исходной волновой функцией. Новая волновая функция сильно сконцентрирована вокруг своей центральной точки, так что теперь, с точки зрения макроскопического наблюдателя, частица локализована в

одном месте. Коллапсы волновых функций в ГРВ реальны и случайны, а не спровоцированы измерениями.

Теория ГРВ не является какой-нибудь зыбкой «интерпретацией» квантовой механики, это ультрасовременная физическая теория со своей динамикой. Фактически эта теория постулирует в природе две новые константы: ширину новой локализованной волновой функции и вероятность-в-секунду, что произойдет ее динамический коллапс. Реалистичные значения этих параметров составляют, вероятно,  $10^{-5}$  см для ширины и  $10^{-16}$  для вероятности коллапса в секунду. Следовательно, типичный электрон эволюционирует в течение  $10^{16}$  секунд, прежде чем его волновая функция спонтанно сколлапсирует. Это примерно 300 миллионов лет. Поэтому за 14 миллиардов лет (столько времени существует наблюдаемая часть Вселенной) большинство электронов (или других частиц) успели локализоваться всего несколько раз.

Это фича, а не баг данной теории. Если вы собираетесь возиться с уравнением Шрёдингера, то лучше делать это таким образом, чтобы не жертвовать всеми удивительными успехами традиционной квантовой механики. Мы постоянно проводим квантовые эксперименты с отдельными частицами или их наборами. Случилась бы катастрофа, если бы волновые функции этих частиц то и дело спонтанно коллапсировали. Если в эволюции квантовых систем действительно присутствует по-настоящему случайный элемент, то, должно быть, такие коллапсы отдельных частиц происходят невероятно редко.

Тогда как же такая мягкая корректировка теории позволяет избавиться от макроскопических суперпозиций? На помощь нам приходит феномен запутанности, как это было с декогеренцией в многомировой интерпретации.

Допустим, мы измеряем спин электрона. Когда электрон проходит через магнит Штерна – Герлаха, волновая функция эволюционирует в суперпозицию «отклонился вверх» и «отклонился вниз». Мы определяем, каким путем он пошел, например обнаруживая отклоненный электрон на экране, который мы подключили к циферблату со стрелкой, указывающей вверх или вниз. Сторонник Эверетта скажет, что стрелка – это крупный макроскопический объект, который быстро запутывается с окружающей средой, что приводит к

декогеренции и ветвлению волновой функции. ГРВ не может апеллировать к такому процессу, но происходит нечто с ним связанное.

Дело не в том, что исходный электрон спонтанно коллапсирует: чтобы такое событие приобрело существенную вероятность, пришлось бы ждать миллионы лет. Но в стрелке нашего устройства содержится около  $10^{24}$  электронов, протонов и нейтронов. Все эти частицы очевидным образом запутаны: они находятся в разных положениях в зависимости от того, указывает ли стрелка вверх или вниз. Хотя маловероятно, что с какой-то конкретной частицей произойдет спонтанный коллапс, прежде чем мы откроем коробку, весьма высоки шансы, что хотя бы с одной из них это случится – ведь такие события должны совершаться примерно  $10^8$  раз в секунду.

Возможно, все это не слишком вас впечатляет и вы думаете, что мы даже не заметим, как такое крошечное подмножество частиц локализуется на такой маленькой стрелке. Но магия запутанности такова, что если волновая функция всего одной частицы будет спонтанно локализована, то оставшиеся частицы, с которыми она запутана, последуют за ней. Если стрелке каким-то образом «удалось» избежать локализации какой-либо из своих частиц в течение определенного периода времени, которого хватило, чтобы она эволюционировала в макроскопическую суперпозицию «вверх» и «вниз», то эта суперпозиция сразу же сколлапсирует, как только одна из частиц все-таки локализуется. Общая волновая функция очень быстро переходит от описания прибора в суперпозиции двух вариантов к одному конкретному варианту. Теория ГРВ умудряется сделать инструментальным и объективным раскол между квантовым и классическим подходами, который были вынуждены обозначить сторонники копенгагенской интерпретации. Классические свойства наблюдаются у объектов, содержащих настолько много частиц, что у этих объектов сильно возрастает вероятность серии стремительных коллапсов, которые претерпит вся волновая функция.

У теории ГРВ есть очевидные достоинства и недостатки. Основное достоинство заключается в том, что это хорошо сформулированная конкретная теория, напрямую решающая проблему измерения. Множество миров, присутствующих в эвереттовской интерпретации, устраняется благодаря серии поистине непредсказуемых коллапсов. Мы оказываемся в мире, где сохраняется успешность квантовой



теории в микромире, но в макроскопическом мире проявляются классические свойства. Это совершенно реалистичная трактовка, в которой для объяснения экспериментальных результатов не привлекается никаких зыбких допущений, связанных с сознанием. ГРВ можно считать суммой эвереттовской квантовой механики и случайного процесса, отсекающего новые ветки волновой функции по мере их появления.

Более того, ГРВ можно экспериментально проверить. Два параметра, определяющих ширину локализованных волновых функций и вероятность коллапса, не выбирались произвольно: если бы их значения были иными, то они либо не справились бы с задачей (коллапсы были бы слишком редкими или недостаточно локализованными), либо эти параметры уже были бы исключены экспериментально. Представьте, что у нас есть жидкость, образованная атомами в невероятно низкотемпературном состоянии, так что каждый атом движется очень медленно, если вообще движется.

Спонтанный коллапс волновой функции электрона в такой жидкости сообщил бы атому, в котором был этот электрон, небольшой энергетический толчок, который физики могли бы обнаружить как небольшое повышение температуры жидкости. Подобные эксперименты ведутся, их конечная цель – либо подтвердить ГРВ, либо полностью ее опровергнуть.

Такие эксперименты легче описать, чем поставить, так как количество энергии, о котором мы говорим, действительно очень мало. Тем не менее ГРВ – отличный пример на случай, если ваши знакомые станут жаловаться, что многомировая интерпретация или разные подходы к квантовой механике не поддаются экспериментальной проверке. Теории проверяются в сравнении с другими теориями, а эти две заметно отличаются в своих эмпирических прогнозах.

Среди недостатков ГРВ – тот факт, что новое правило спонтанного коллапса, мягко говоря, взято с потолка и не соответствует всему, что мы знаем о физике. Кажется подозрительным, что природа не только стала бы нарушать свои обычные законы движения через случайные промежутки времени, но и сделала бы это таким образом, чтобы мы не могли этого экспериментально обнаружить.

Другой недостаток, затрудняющий широкое распространение ГРВ и связанных с ней теорий в физическом сообществе, заключается в

следующем: неясно, как выстроить версию такой теории, которая работала бы не только с частицами, но и с полями. В современной физике фундаментальными кирпичиками природы считаются поля, а не частицы. Мы видим частицы, когда с достаточным увеличением рассматриваем вибрирующие поля, просто потому, что эти поля подчиняются законам квантовой механики. В некоторых условиях можно считать полевое описание полезным, но не обязательным и представить, что поля просто позволяют отслеживать множество частиц сразу. Однако бывают и другие условия (например, условия в ранней Вселенной или внутри протонов и нейтронов), где наличие поля необходимо. А ГРВ, по крайней мере в простой версии, представленной здесь, описывает принципы коллапса волновой функции, которые соотносятся именно с вероятностью на частицу. Это препятствие вовсе не является непреодолимым – физики-теоретики привыкли брать простые модели, работающие кое-как, а затем обобщать их до тех пор, пока они не заработают как следует. Но этот признак выдает, что подобные подходы с трудом вписываются в наши современные представления об устройстве законов природы.

ГРВ позволяет провести границу между квантовым и классическим миром, постулируя, что спонтанные коллапсы отдельных частиц происходят очень редко, а коллапсы совокупностей частиц – очень стремительно. Альтернативный подход предполагал бы, что коллапс должен происходить всякий раз, когда система достигает определенного порога, – подобно тому как рвется резиновая лента, если растянуть ее слишком сильно. Хорошо известный пример подобных разработок был предложен математиком и физиком Роджером Пенроузом, наиболее известным своими работами по общей теории относительности. В теории Пенроуза важнейшую роль играет гравитация. Он предполагает, что волновые функции спонтанно коллапсируют, когда начинают описывать макроскопические суперпозиции, у различных составляющих которых ощутимо отличаются гравитационные поля. Критерий «ощутимо отличаются» здесь оказывается сложным для формализации: отдельные электроны не коллапсируют, как бы ни были распределены их волновые функции, а вот стрелка уже достаточно велика, чтобы спровоцировать коллапс, как только она начнет эволюционировать в различные состояния.

Большинство экспертов по квантовой механике прохладно отнеслись к теории Пенроуза, поскольку скептически относятся к тому, что гравитация должна иметь какое-либо отношение к фундаментальной формулировке квантовой механики. Они убеждены, что можно говорить – и по большей части это прекрасно удастся на протяжении всей истории изучения вопроса – о квантовой механике и коллапсе волновых функций, совершенно не принимая в расчет гравитацию.

Вполне вероятно, что будет разработана точная версия критерия Пенроуза, в которой он станет рассматриваться как замаскированная декогеренция: гравитационное поле объекта можно считать частью окружающей его среды, и если два разных компонента волновой функции обладают разными гравитационными полями, то они фактически декогерируют. Сила гравитации исключительно слаба, и практически в любых ситуациях обычные электромагнитные взаимодействия вызовут декогеренцию гораздо раньше, чем в дело вступит гравитация. Но гравитация хороша своей универсальностью (у любого тела есть гравитационное поле, но не у любого – электрический заряд), поэтому хотя бы этот фактор гарантирует, что волновая функция любого макроскопического объекта обязательно претерпит коллапс. С другой стороны, ветвление в момент декогеренции уже включено в многомировую интерпретацию, и все, о чем говорит подобная теория спонтанного коллапса, сводится к «все, как у Эверетта, только новые миры не образуются, мы их стираем вручную». Кто знает? Возможно, именно так устроена природа, но большинство практикующих физиков не склонны следовать по этому пути.



С самого зарождения квантовой механики напрашивалась очевидная идея, которую стоило бы рассмотреть: что, если волновая функция не отражает всей картины и кроме нее в процессе участвуют и другие переменные? В конце концов, физики очень привыкли мыслить в терминах вероятностных распределений из опыта работы со статистической механикой, как она разрабатывалась в XIX веке. Мы не

указываем точные координаты и скорость каждого атома в емкости с газом, а учитываем лишь их общие статистические свойства. Но в классическом представлении, которое мы принимаем как должное, у каждой частицы есть определенные координата и скорость, даже если мы их не знаем. Может быть, такова и квантовая механика: есть определенные величины, связанные с предполагаемыми результатами наблюдений, но мы не знаем, каковы они, а волновая функция каким-то образом захватывает только часть статистической реальности, но не отражает всей ситуации.

Мы знаем, что волновая функция не может быть в точности такой, как классическое вероятностное распределение. В настоящем вероятностном распределении вероятности присваиваются напрямую результатам, а вероятность каждого конкретного события должна выражаться вещественным числом от нуля до единицы (включительно). Волновая функция, в свою очередь, присваивает амплитуду любому возможному результату, а амплитуды являются комплексными числами. У них есть как действительная, так и мнимая часть, каждая из которых может быть положительной или отрицательной. Возводя такие амплитуды в квадрат, мы получаем вероятностное распределение, но если мы хотим объяснить, что именно наблюдаем в эксперименте, то не можем работать с этим распределением напрямую, не опираясь на волновую функцию. Тот факт, что амплитуда может быть отрицательной, допускает интерференцию, которая наблюдается, например, в эксперименте с двумя щелями.

Есть простой способ подступить к этой проблеме: будем считать волновую функцию реальным, действительно существующим физическим явлением (а не просто удобным обобщением наших неполных знаний), но *также* вообразим, что есть и дополнительные переменные, возможно, представляющие координаты частиц. Эти дополнительные величины условно называются «скрытыми переменными», хотя некоторым сторонникам теории такое название не нравится, поскольку мы действительно наблюдаем эти переменные, когда выполняем измерение. Можно называть их просто «частицами», поскольку именно частицы обычно рассматриваются в таких опытах. В таком случае волновая функция играет роль *волны-пилота*, направляющей частицы, пока они движутся. Частицы можно сравнить

с крошечными плывущими бочонками, а волновую функцию – с волной, которая их перекачивает. Волновая функция подчиняется обычному уравнению Шрёдингера, а новое «уравнение волны-пилота» определяет, как она влияет на частицы. Эти частицы направляются туда, где волновая функция велика, убывая оттуда, где она практически равна нулю.

Впервые данную теорию представил Луи де Бройль в 1927 году на Сольвеевском конгрессе. В тот период и Эйнштейн, и Шрёдингер размышляли в том же направлении. Однако идеи де Бройля встретили на Сольвеевском конгрессе жесткую критику, в частности, со стороны Вольфганга Паули. Судя по записям с конференции, критика Паули была безосновательной и де Бройль грамотно на нее ответил. Но он был настолько обескуражен таким приемом, что забросил эту идею.

В знаменитой книге «Математические основания квантовой механики», изданной в 1932 году, Джон фон Нейман доказал теорему о сложности построения теорий со скрытыми переменными. Фон Нейман был одним из самых блестящих математиков и физиков XX века, его имя пользовалось колоссальным авторитетом среди исследователей квантовой механики. Когда кто-либо пытался предложить более конкретную формулировку квантовой механики, чем зыбкая копенгагенская интерпретация, в ответ ему обычно апеллировали к имени фон Неймана и ссылались на его доказательство. Таким образом душилась любая зарождающаяся дискуссия.

На самом деле доказательство фон Неймана было не таким обширным, как предполагало большинство заинтересованных (зачастую не читавших его книгу, которая была переведена на английский только в 1955 году). Хорошая математическая теорема дает результат, проистекающий из четко сформулированных посылок. Но если мы прибегаем к такой теореме, рассчитывая узнать что-то новое об окружающем мире, нужно тщательно проследить за тем, чтобы наши посылки действительно подтверждались в реальности. Фон Нейман сделал предположения, которые в ретроспективе мы не должны делать, если пытаемся создать теорию, которая воспроизводит предсказания квантовой механики. Он что-то доказал, но не то, что «теории со скрытыми переменными не работают». На это указывала

математик и философ Грета Херманн, но ее труды не получили широкого признания.

Тут к делу подключился Дэвид Бом, интересная и сложная фигура в истории квантовой механики. В начале 1940-х Бом, будучи аспирантом, заинтересовался политикой левого толка. Он закончил работу над Манхэттенским проектом, но был вынужден работать в Беркли, так как ему было отказано в разрешении на переезд в Лос-Аламос. После войны он стал ассистентом профессора в Принстоне и написал influential учебник по квантовой механике. В этой книге он исправно придерживался копенгагенской интерпретации, но, размышляя над связанными с ней вопросами, он стал задумываться об альтернативных подходах.

Интерес Бома к этим вопросам пробудил один из тех немногих людей, кто был равен по статусу Бору и его коллегам: сам Эйнштейн. Этот великий человек прочел книгу Бома и предложил молодому профессору встретиться у себя в кабинете, чтобы поговорить об основаниях квантовой теории. Эйнштейн объяснил свои основные претензии к ней, указав, что квантовая теория не может считаться полным описанием реальности, и призвал Бома всерьез и глубоко подумать над вопросом скрытых переменных, чем тот и занялся.

Все эти события разворачивались, пока Бом находился под грузом политических подозрений, причем в те времена, когда из-за связей с коммунистами человек мог полатиться карьерой. В 1949 году Бом давал показания перед Комиссией по расследованию антиамериканской деятельности, где отказался подставлять кого-либо из бывших коллег. В 1950 году его арестовали в Принстоне прямо у себя в кабинете за неуважительные отзывы о Конгрессе. Хотя в итоге все обвинения с него были сняты, президент университета запретил ему даже появляться в кампусе и, оказав давление на физический факультет, вынудил не продлевать с ним контракт. В 1951 году Бом, которого поддержали Эйнштейн и Оппенгеймер, наконец смог получить работу в Университете Сан-Паулу и уехал в Бразилию. Именно поэтому первый в Принстоне семинар, посвященный объяснению идей Бома, пришлось провести кому-то другому.



Ничто из этих драматичных событий не помешало Бому продуктивно размышлять о квантовой механике. Воодушевившись поддержкой Эйнштейна, он разработал теорию, подобную теории де Бройля, где частицы движутся под действием «квантового потенциала», получаемого из волновой функции. Сегодня такой подход часто называют *теорией де Бройля – Бома* или просто *бомовской механикой*. Бом разобрал эту теорию несколько подробнее, чем де Бройль, особенно в том, что касается процесса измерения.

Даже сегодня от профессиональных физиков иногда можно услышать, что невозможно построить такую теорию со скрытыми переменными, которая воспроизводит прогнозы квантовой механики, «поскольку этого не допускает теорема Белла». Но именно это и сделал Бом, по крайней мере для нерелятивистских частиц. В действительности Джон Белл был одним из немногих физиков, на которых работа Бома произвела огромное впечатление, и на разработку своей его вдохновило желание понять, как примирить существование механики Бома с теоремой фон Неймана об отсутствии скрытых переменных.

На самом деле теорема Белла доказывает, что невозможно воспроизвести квантовую механику в терминах *локальной* теории со скрытыми переменными. На создание именно такой теории долго надеялся Эйнштейн: чтобы это была модель, которая наделяла бы самостоятельной реальностью физические величины, связанные с конкретными местоположениями в пространстве, а их взаимодействия распространялись бы со световой или меньшей скоростью. Бомовская механика совершенно детерминистичная, но решительно нелокальная. Отдельные частицы могут воздействовать друг на друга мгновенно.

Бомовская механика постулирует существование как множества частиц с определенными координатами (которые остаются для нас неизвестными до тех пор, пока мы их не пронаблюдаем), так и отдельной волновой функции. Волновая функция эволюционирует в точном соответствии с уравнением Шрёдингера, при этом кажется, что она даже «не догадывается» о существовании частиц, и их взаимодействия никак на нее не влияют. Тем временем частицы перемещаются в пространстве в соответствии с направляющим уравнением, зависящим от волновой функции. Однако направление движения любой частицы зависит не только от волновой функции, но

и от координат *всех остальных частиц*, которые могут находиться в системе. В этом и заключается нелокальность: в данном случае движение частицы может зависеть от координат других частиц, которые, по идее, могут находиться сколь угодно далеко от нее. Как впоследствии выразился сам Белл, в бомовской механике «парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена разрешается таким образом, какой самому Эйнштейну понравился бы меньше всего».

Нелокальность играет критически важную роль для понимания того, как в бомовской механике воспроизводятся прогнозы обычной квантовой механики. Рассмотрим эксперимент с двумя щелями, который так наглядно иллюстрирует, что квантовые феномены одновременно обладают и волновой (мы наблюдаем интерференционные узоры), и корпускулярной (интерференция исчезает, и мы наблюдаем точки на экране детектора, когда выясняется, через какую именно щель прошли частицы) составляющими. В бомовской механике такая двойственность лишена всякой таинственности: существуют как частицы, так и волны. Мы наблюдаем именно частицы, а волновая функция влияет на их движение, но измерить ее напрямую мы не можем.

Согласно Бому, эволюция волновой функции происходит сразу через две щели, точно как в эвереттовской квантовой механике. В частности, на экране будут наблюдаться интерференционные эффекты там, где волны усиливают или гасят друг друга, достигая экрана. Но на экране мы не видим волновой функции, мы видим отдельные частицы, попадающие в экран. Частицы движутся под влиянием волновой функции, так что они с наибольшей вероятностью могут попасть в экран там, где волновая функция велика, и с меньшей – там, где она мала.

По правилу Борна вероятность наблюдать частицу в конкретной точке равна квадрату волновой функции этой частицы. На первый взгляд, этот факт сложно примирить с идеей, что координаты частиц – это совершенно независимые переменные, которые мы можем определять по собственному усмотрению. Причем бомовская механика совершенно детерминистична – в ней нет никаких по-настоящему случайных событий, в отличие от ситуации со спонтанными коллапсами в теории ГРВ. Итак, откуда же здесь берется правило Борна?



Ответ таков: хотя теоретически координаты частиц могут быть какими угодно, на практике они подчиняются естественному распределению. Допустим, у нас есть волновая функция и некоторое фиксированное количество частиц. Чтобы воспроизвести правило Борна, нам просто нужно взять за основу распределение частиц, соответствующее правилу Борна. То есть мы должны распределить координаты частиц так, чтобы результат выглядел образовавшимся спонтанно с вероятностью, заданной квадратом волновой функции. Больше частиц будет там, где амплитуда велика, меньше – там, где мала.

Такое «равновесное» распределение обладает одной приятной особенностью: правило Борна продолжает соблюдаться и с течением времени, когда система эволюционирует. Если частицы будут исходно подчиняться вероятностному распределению, такому, которое мы ожидали бы увидеть в обычной квантовомеханической картине, то эти ожидания будут оправдываться и в дальнейшем. Многие сторонники Бомы считают, что неравновесное исходное распределение будет эволюционировать в сторону равновесного, подобно газу, состоящему из заключенных в емкости классических частиц, который постепенно переходит к состоянию термодинамического равновесия. Но эта идея пока не является общепринятой. Результирующие вероятности, конечно, связаны с нашими знаниями о системе, а не с объективными частотами этих событий. Если бы мы каким-то образом смогли узнать, каковы на самом деле координаты этих частиц, а не просто их распределение, то могли бы точно предсказать результаты экспериментов, и нам вообще не приходилось бы прибегать к вероятностям.

Поэтому бомовская механика оказывается в интересном положении среди других альтернативных формулировок. Теория ГРВ в большинстве случаев хорошо проецируется на ожидания из традиционной квантовой механики, но также дает четкие прогнозы о новых феноменах, которые можно проверить. Бомовская механика, как и ГРВ, несомненно является самостоятельной физической теорией, а не просто «интерпретацией». Она *может и не* подчиняться правилу Борна, если по какой-то причине координаты наших частиц распределены неравновесно. Но если они подчиняются правилу Борна – это значит, что их распределение равновесное. А если это так, то

прогнозы бомовской механики, строго говоря, неотличимы от прогнозов обычной квантовой теории. В частности, мы увидим на экране больше попаданий частиц туда, где волновая функция велика, и меньше — там, где она мала.

По-прежнему открыт вопрос о том, что произойдет, если мы попробуем проверить, через которую из щелей прошла частица. В бомовской механике волновые функции не коллапсируют; как и в эвереттовской, они всегда подчиняются уравнению Шрёдингера. Каким же тогда образом мы можем объяснить исчезновение интерференционного узора в эксперименте с двумя щелями?

Ответ: «Как и в многомировой интерпретации». Волновая функция не коллапсирует, но эволюционирует. В частности, приходится учитывать волновую функцию детектора, а также волновые функции электронов, проходящих через щели. Бомовский мир полностью квантовый и обходится без искусственного разделения на классические и квантовые области. Как известно из размышлений о декогеренции, волновая функция детектора запутывается с волновой функцией электрона, проходящего через щель, и происходит своеобразное ветвление. Разница в том, что переменные, описывающие детектор (которых нет в многомировой интерпретации), будут находиться в местах, соответствующих одной из этих веток, а не другой. Во всех отношениях данная ситуация напоминает коллапс волновой функции, или, если хотите, это похоже на ветвление волновой функции в результате декогеренции. Но в данном случае мы не признаем реальности всех веток, а считаем, что все частицы, из которых мы состоим, находятся только в одной конкретной ветке.

Вас не удивит, что многие эвереттовцы с подозрением относятся к подобной истории. Если волновая функция Вселенной просто подчиняется уравнению Шрёдингера, то с ней будут происходить декогеренция и ветвление. И вы уже признали, что волновая функция — часть реальности. Если уж на то пошло, координаты частиц абсолютно никак не влияют на то, как эволюционирует волновая функция. Пожалуй, все, что они делают — указывают на конкретную ветку волновой функции и заставляют считать ее реальной. Поэтому некоторые эвереттовцы утверждали, что бомовская механика на практике ничем не отличается от эвереттовской, а лишь содержит некоторые избыточные дополнительные переменные, весь прок

которых в том, чтобы унять чьи-то опасения по поводу расщепления на множество «копий себя». Как выразился Дойч: «Теории волны-пилота – это теории параллельных вселенных на стадии хронического отрицания».

Мы не беремся рассудить этот спор прямо здесь и сейчас. В данном случае ясно, что бомовская механика – это конструкция, позволяющая сделать то, что многим физикам казалось невозможным: построить точную, детерминистичную теорию, которая воспроизводит все прогнозы академической квантовой механики и не требует никаких магических заклинаний по поводу процесса измерения или отличий между квантовыми и классическими мирами. Цена, которую приходится за это заплатить, – явная нелокальность в динамике.



Бом надеялся, что его новая теория получит широкое признание в физическом сообществе. Этого не произошло. Весьма эмоциональным языком, который обычен для дискуссий об основаниях квантовой механики, Гейзенберг назвал теорию Боба «избыточной идеологической надстройкой», тогда как Паули назвал ее «искусственной метафизикой». Мы уже упоминали мнение Оппенгеймера, который когда-то был наставником Боба и поддерживал его. По-видимому, Эйнштейн по достоинству оценил работу, сделанную Бомом, но считал, что итоговая конструкция у него получилась искусственной и неубедительной. Но Бом, в отличие от де Бройля, не поддавался этому давлению и продолжил разрабатывать и отстаивать свою теорию.

На самом деле его настойчивость даже вдохновила де Бройля, который к тому моменту еще не отошел от дел и активно работал (он умер в 1987 году). На закате жизни де Бройль вернулся к теориям со скрытыми переменными, продолжая развивать и оттачивать свою оригинальную модель.

Даже без учета явной нелокальности и обвинений в том, что данная теория есть не что иное, как «многомировая интерпретация в несознанке», бомовской механике присущ еще ряд важных проблем, особенно с точки зрения современного специалиста по

фундаментальной физике. Список составляющих этой теории бесспорно сложнее, чем у Эверетта, а пространство Гильберта – набор всех возможных волновых функций – в ней не больше, чем в эвереттовской. Возможность существования множества миров никуда не девается, если не стирать эти миры (как в теории ГРВ), а просто отрицать их реальность. Принципы функционирования механики Бома не назовешь элегантными. Спустя многие годы после отхода от ньютоновской механики физики продолжают интуитивно стремиться к чему-то, что напоминало бы третий закон Ньютона, согласно которому на каждое действие есть противодействие. Поэтому кажется странным, что у нас есть частицы, которые перекачивает волновая функция, тогда как сама волновая функция совершенно не испытывает воздействия со стороны этих частиц. Разумеется, квантовая механика неизбежно заставляет нас сталкиваться со странными вещами, так что данное соображение не должно быть первостепенным.

Важнее, что и теория Бома, и теория де Бройля в исходных формулировках сильно полагаются на идею о том, что в реальности существуют именно «частицы». Как и в случае с ГРВ, это оборачивается проблемой, когда мы пытаемся понять наилучшие модели мира, которыми располагаем, а именно – квантовые теории поля. Предлагались способы «бомизации» квантовой теории поля, причем в этом были достигнуты некоторые успехи: физики бывают довольно сообразительными, если захотят. Но эти результаты кажутся притянутыми за уши. Это еще не означает, что неизящные результаты – обязательно неправильные, однако это очко в пользу многомировых теорий, в которые поля или квантовая гравитация внедряются очень легко.

Рассуждая о бомовской механике, мы говорили о координатах частиц, но не об их импульсах. Это отголосок ньютоновских времен, когда считалось, что координата у частицы есть в любой момент времени, а скорость (и импульс) частицы выводится на основании ее траектории путем расчета скорости изменения этой траектории. Более современные формулировки классической механики (где-то после 1833 года) трактуют координату и импульс на равных основаниях. Когда мы переходим к квантовой механике, этот подход находит отражение в принципе неопределенности Гейзенберга, где координата и импульс представлены одинаковым образом. Бомовская механика

отменяет этот ход, считая координату первичной, а импульс — производной от нее. Но оказывается, что непосредственно измерить эти величины не удастся из-за неизбежных эффектов, оказываемых волновой функцией на координату частицы с течением времени. Итак, в конечном итоге принцип неопределенности в боровской механике продолжает соблюдаться как практический факт реальности, но в ней он лишен той естественности, какой обладает в теориях, где единственной реальной сущностью является волновая функция.

Здесь действует более универсальный принцип. В силу своей простоты многомировая интерпретация также оказывается исключительно гибкой. Уравнение Шрёдингера принимает волновую функцию и позволяет определить, как быстро она будет изменяться, — для этого нужно применить гамильтониан, который определяет, сколько энергии будет в разных компонентах квантового состояния. Дайте мне гамильтониан — и я сразу же пойму эвереттовскую версию соответствующей ему квантовой теории. Частицы, спины, поля, суперструны — не важно. Многомировая интерпретация включается без дополнительных настроек.

В других подходах требуется проделать гораздо больше предварительной работы, причем далеко не всегда понятно, выполнима ли эта работа в принципе. Приходится указать не только гамильтониан, но и конкретный способ, которым происходит спонтанный коллапс волновых функций, либо конкретный новый набор скрытых переменных, которые придется отслеживать. Это проще сказать, чем сделать. Проблема обостряется еще сильнее при переходе от квантовой теории поля к квантовой гравитации (чем, в частности, изначально руководствовался Эверетт). В квантовой гравитации сам феномен «местоположения в пространстве» проблематичен, поскольку у разных веток волновой функции будут разные пространственно-временные геометрии. В многомировой интерпретации это не проблема, а в альтернативах — без пяти минут катастрофа.

И когда в 1950-х Бом и Эверетт разрабатывали свои альтернативы копенгагенской интерпретации, и когда в 1960-х Белл доказывал свои теоремы, на работы по основаниям квантовой механики в физическом сообществе смотрели косо. Ситуация начала немного меняться с возникновением теории декогеренции и квантовой информации в

1970-х и 1980-х, теория ГРВ была предложена в 1985 году. Хотя подавляющее большинство физиков до сих пор с подозрением относится к этой области исследований (хотя бы потому, что она привлекает философов), с 1990-х в ней был выполнен огромный объем интересной и важной работы, значительная часть которой стала известна широкой общественности. Однако можно смело сказать, что большая доля современной работы по основам квантовой механики до сих пор разворачивается в контексте кубитов или нерелятивистских частиц. Как только мы перейдем к квантовым полям и квантовой гравитации, некоторые вещи, которые мы принимали как должное, станут нам недоступны. Точно так же как физикам пришлось время всерьез отнестись к квантовым основаниям, самим квантовым основаниям пора со всей серьезностью «отнестись» к теории поля и гравитации.



Размышляя над способами устранения множества миров, к признанию которых нас подталкивает голый квантовый формализм, мы попробовали отсекал миры с помощью случайного события (ГРВ), достигать некоторого порога (Пенроуз) и выбирать некоторые миры и считать их реальными, добавляя для этого дополнительные переменные (де Бройль – Бом). Что еще остается?

Проблема в том, что возникновение дополнительных веток волновой функции происходит автоматически, стоит нам поверить в волновые функции и уравнение Шрёдингера. Поэтому в альтернативах, рассмотренных нами до сих пор, от этих веток либо избавляются, либо постулируют такие условия, благодаря которым одна из этих веток выделяется на фоне остальных.

Напрашивается и третий путь: полностью отрицать реальность волновой функции.

При этом мы не собираемся отрицать центральной роли волновой функции в квантовой механике. Нет, мы можем использовать волновые функции, но при этом не заявлять, что они являются реальными феноменами. Они могут просто характеризовать наши знания: в частности, неполноту этих знаний об исходе квантовых измерений.

Такой подход к квантовой механике известен под названием «эпистемологический», поскольку в нем полагается, что в волновых функциях заключена некая часть нашего знания, в противовес «онтологическим» подходам, в которых волновая функция трактуется как описывающая объективную реальность. Поскольку волновые функции обычно обозначаются греческой буквой  $\Psi$  (пси), сторонники эпистемологического подхода к квантовой механике иногда поддразнивают эвереттианцев и других, считающих, что волновая функция реальна, называя их «пси-онтологами».

Мы уже отмечали, что эпистемологическая стратегия не может работать самым обычным и прямолинейным образом. Волновая функция – это не вероятностное распределение. Настоящие функции распределения вероятностей никогда не бывают отрицательными, поэтому и не могут приводить к интерференционным феноменам, подобным тому, что наблюдается в эксперименте с двумя щелями. Однако вместо того чтобы сдаваться, можно попробовать несколько изощреннее выразить взаимосвязь волновой функции и реального мира. Можно выстроить такой формализм, который позволил бы использовать волновые функции для расчета вероятностей, связанных с результатами экспериментов, не соотнося их при этом с какой-либо базовой реальностью. Именно такую задачу и берут на себя сторонники эпистемологических подходов.

Предпринимались многочисленные попытки интерпретировать волновую функцию в эпистемологическом ключе, как и в случае с конкурирующими моделями коллапса или теориями скрытых переменных. Один из наиболее известных подходов такого рода называется «квантовое байесианство», который разработали Кристофер Фукс, Рюдигер Шак, Карлтон Кейвс, Н. Дэвид Мермин и другие. В наши дни обычно используется сокращенное название «кьюбизм» (должен признать, название очаровательное).

Байесовский вывод предполагает, что в нашем распоряжении есть только набор степеней уверенности по поводу истинности или ложности различных посылок, и все эти степени уверенности уточняются по мере поступления новой информации. Во всех версиях квантовой механики (а на самом деле во всех научных теориях) в том или ином виде используется теорема Байеса, и во многих подходах к пониманию квантовой вероятности теорема Байеса критически важна.

Кьюбизм отличается тем, что степени уверенности по поводу квантовых явлений в нем считаются *личными*, а не универсальными. Согласно кьюбизму, волновая функция электрона – это не абсолютная и окончательная величина, по поводу которой в принципе можно прийти к общему мнению. Скорее, каждый по-своему полагает, что представляет собой волновая функция электрона, и использует это представление, чтобы спрогнозировать результаты наблюдений. Если мы проведем много экспериментов и поговорим друг с другом о своих наблюдениях, заявляют кьюбисты, то сможем прийти к определенному консенсусу относительно того, что представляют собой различные волновые функции. Но в основе своей они будут оценками наших собственных убеждений, а не объективными свойствами мира. Когда мы видим, как электрон отклоняется вверх в поле магнита Штерна – Герлаха, мир не меняется: это мы узнаем о мире что-то новое.

У такой философии есть одно прямое и бесспорное достоинство: если волновая функция не является физическим феноменом, то нечего и беспокоиться о ее «коллапсе», даже если этот коллапс предположительно является нелокальным. Если у Алисы и Боба две частицы, запутанные друг с другом, и Алиса выполняет измерение, то по обычным правилам квантовой механики состояние частицы Боба немедленно меняется. Кьюбизм уверяет нас, что обо всем этом не стоит беспокоиться, поскольку не существует такой штуки, как «состояние частицы Боба». Изменилась только волновая функция, с которой обращалась Алиса и делала на ее основе прогнозы: она была уточнена с помощью подходящей квантовой версии теоремы Байеса. Волновая функция, которая была в распоряжении Боба, вообще не изменилась. Правила игры в кьюбизме сформулированы так, что когда Боб собирается измерить свою частицу, результат будет согласовываться с тем прогнозом, который можно было бы сделать и на основании результата измерения, выполненного Алисой. Однако при этом нет никакой необходимости дополнительно предполагать, что некая физическая величина изменилась и на стороне Боба. Меняется только состояние знаний у разных людей, а знания, в конце концов, заключены у них в голове, а не распределены по всему космосу.

Размышления о квантовой механике в терминах кьюбизма привели ученых к интересным наработкам в математике вероятностей и дают представление о квантовой теории информации. Однако большинство



физиков по-прежнему хотят знать: какова реальность, если придерживаться таких взглядов? (Абрахам Пайс вспоминал, как однажды Эйнштейн спросил его: «Вы и вправду думаете, что Луна существует, лишь когда вы на нее смотрите?»))

Ответ неясен. Допустим, мы пропустили электрон через магнит Штерна – Герлаха, но решили не смотреть, куда он отклонится – вверх или вниз. С точки зрения эвереттианца, в таком случае все равно произошли декогеренция и ветвление, и вся суть в том, в какой ветке оказался каждый конкретный «двойник» из всех получившихся. Кьюбист скажет вам нечто совсем другое: для него нет таких вещей, как отклонение спина вверх или вниз. Есть только степени нашей убежденности по поводу того, что мы увидим, когда в конце концов решим посмотреть. Ложки не существует, как выяснил Нео в «Матрице». Согласно такому взгляду, переживать о «реальности» того, что мы не видим, – это ошибка, приводящая к всевозможной путанице.

Кьюбисты в основном не рассуждают о том, что представляет собой мир. По крайней мере, в рамках текущего курса исследований кьюбисты предпочитают не слишком вдаваться в вопросы, касающиеся природы реальности, при том что всех остальных эти вопросы очень волнуют. К фундаментальным составляющим теории относится множество *агентов*, которые обладают *убеждениями* и накапливают *опыт*. С такой точки зрения квантовая механика позволяет агентам навести порядок в своих убеждениях и уточнять их в свете нового опыта. Идея агента в данном случае является центральной. В этом отношении такая трактовка резко контрастирует с другими формулировками квантовой механики, рассмотренными выше, согласно которым любой наблюдатель – это просто физическая система, ничем не отличающаяся от остальных.

Иногда кьюбисты могут рассуждать о реальности как о феномене, воплощающемся по мере того, как мы наблюдаем эту реальность. Мермин писал: «Действительно, существует всеобщий внешний мир, наряду со множеством индивидуальных, личных внешних миров. Но этот общий мир должен пониматься в основе своей как конструкция, собранная общими усилиями, в которую внес вклад каждый из нас, опираясь на собственный личный опыт и воспользовавшись самым мощным человеческим изобретением: языком». Идея не в том, что реальности не существует, а в том, что реальность не ограничивается

асpekтами, которые можно ухватить с, казалось бы, объективной точки зрения любого стороннего наблюдателя. Фукс назвал такую точку зрения реализмом причастности (participatory realism): реальность есть эмерджентная совокупность всего опыта различных наблюдателей.

По меркам других подходов к квантовой механике кьюбизм относительно молод, и в нем предстоит выполнить еще немало разработок. Возможно, эта теория столкнется с непреодолимыми препятствиями и интерес к ней угаснет. Возможно, находки кьюбизма можно интерпретировать как полезный (в некоторых контекстах) способ рассуждать об опыте наблюдателя в рамках какой-нибудь другой, строго реалистической версии квантовой механики. Наконец, может оказаться, что кьюбизм или какая-то близкая к нему парадигма представляет новый, поистине революционный способ мышления о мире, в котором агенты (мы с вами) ставятся во главу угла наилучшего описания реальности.

Лично мне как человеку, весьма довольному многомировой интерпретацией (при этом я признаю, что в ней по-прежнему сохраняются открытые вопросы), все вышеперечисленное кажется адовой работой, направленной на решение проблем, которых на самом деле нет. Честно говоря, кьюбисты не менее ожесточенно воспринимают теорию Эверетта. По словам Мермина, «кьюбизм трактует [ветвление на множество одновременно существующих миров] как *доведение до абсурда* стремления материализовать квантовое состояние». Да, такова квантовая механика: что для одного – абсурд, для другого – ответ на все вопросы.



В сообществе ученых, изучающих основания физики, собрались очень неглупые люди, долго и серьезно размышлявшие над этими проблемами, но пока они не пришли к согласию относительно того, какой из подходов к квантовой механике наиболее хорош. Одна из проблем заключается в том, что люди подходят к этой проблеме с разным жизненным опытом, поэтому наиболее серьезную обеспокоенность у каждого вызывают свои соображения. Исследователи, занимающиеся фундаментальной физикой – теорией

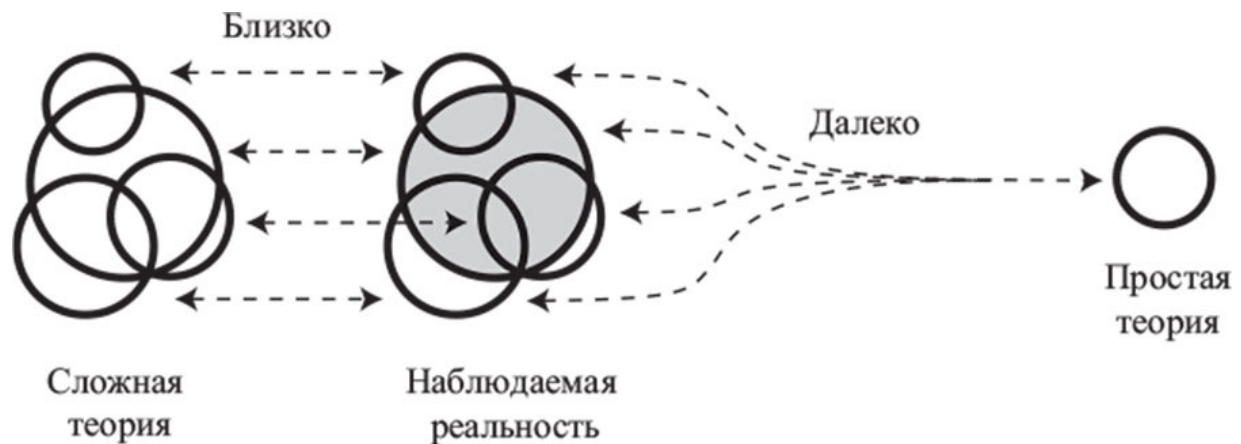
частиц, общей теорией относительности, космологией, квантовой гравитацией, – обычно предпочитают эвереттовский подход, если вообще соблаговолит высказываться по поводу оснований квантовой механики. Все потому, что многомировая интерпретация исключительно устойчива по отношению к базовому физическому материалу, который она описывает. Вы даете мне набор частиц, полей, других имеющихся составляющих, сообщаете правила, по которым они взаимодействуют, – и все эти элементы легко вписываются в эвереттовскую картину. Другие подходы обычно более придирчивы – каждый раз требуется выстраивать картину с нуля, чтобы понять, как именно трактуется каждый новый случай. И если вы признаете, что мы не знаем, какова на самом деле основополагающая теория частиц, полей и пространства-времени, это кажется утомительным, тогда как многомировая интерпретация естественным образом подходит на роль тихой гавани. Как выразился Дэвид Уоллес, «эвереттовская интерпретация (насколько это вообще приемлемо с философской точки зрения) – единственная из современных интерпретационных стратегий, справляющаяся с задачей осмысления квантовой физики в том виде, в каком мы ее сегодня знаем».

Однако есть и другая причина, более личного характера. В принципе, любой согласится, что простые и красивые идеи заслуживают большего внимания при поиске научных объяснений. Если идея проста и красива, это еще не означает, что она верна, – все зависит от данных, – но когда борются несколько конкурирующих идей и у нас не хватает данных, чтобы выбрать одну из них, естественно воспринимать самые простые и красивые как наиболее заслуживающие доверия.

Вопрос только в том, кто определяет степень простоты и красоты. С одной точки зрения эвереттовская квантовая механика совершенно проста и красива. Гладко эволюционирующая волновая функция – и все. Но в результате этих изящных постулатов получается бурно ветвящееся древо из множества вселенных – явно не образец простоты.

С другой стороны, бомовская механика сконструирована довольно бессистемно. В ней есть как частицы, так и волновые функции, и они взаимодействуют посредством нелокального уравнения, которое далеко не кажется красивым. Но включение в теорию в качестве

фундаментальных составляющих как частиц, так и волновых функций является естественной стратегией, как только мы сталкиваемся с базовыми экспериментальными требованиями квантовой механики. Иногда материя ведет себя как волна, а иногда как частица, поэтому мы включаем в теорию и то и другое. Теория ГРВ, в свою очередь, привносит в уравнение Шрёдингера внезапную стохастическую модификацию. Но, пожалуй, это наиболее простой и лобовой подход к физическому объяснению коллапса волновых функций.



Полезно различать, насколько проста сама физическая теория и насколько просто спроецировать эту теорию на наблюдаемую реальность. В том, что касается базовых составляющих, многомировая интерпретация, безусловно, настолько проста, насколько это возможно. Но разница между тем, что фактически сообщает сама теория (волновые функции, уравнение Шрёдингера), и тем, что мы наблюдаем в мире (частицы, поля, пространство-время, люди, стулья, звезды, планеты), кажется колоссальной. Другие подходы, возможно, вычурнее в своих основополагающих принципах, но их описание наблюдаемого мира гораздо понятнее.

Как базовая простота, так и близость к наблюдаемым феноменам по праву считаются достоинствами теории, но сложно понять, как уравновесить их друг с другом. Вот тут и вступает в игру личный стиль. Все подходы к квантовой механике, которые мы рассмотрели, сталкиваются с серьезными вызовами, когда мы пытаемся преобразовать эти теории в прочные основания, которые помогли бы понять физический мир. Поэтому каждому приходится самому судить о том, какие из этих проблем будут в итоге решены, а какие окажутся

фатальными для того или иного подхода. Это нормально. Действительно, очень важно, что разные люди по-разному представляют, как продвигаться в решении проблем. Это позволяет поддерживать жизнь множества идей и максимизировать вероятность того, что картинка в конце концов сложится.

Взгляд на квантовую механику, предлагаемый в многомировой интерпретации, не только прост и красив по сути, но и, кажется, готов для объяснения квантовой теории поля и природы пространства-времени. Для меня этого достаточно, чтобы смириться с тем раздражающим фактором, что каждую секунду меня воспроизводят во множестве копий. Но если окажется, что какой-то альтернативный подход позволяет более качественно ответить на самые важные наши вопросы, я с готовностью изменю свою точку зрения.

## Человеческий взгляд

### *Как жить и мыслить в квантовой Вселенной*

В течение жизни каждому из нас рано или поздно приходится принимать сложные решения. Остаться одному или вступить в брак? Сходить на пробежку или позволить себе еще пончик? Пойти в аспирантуру или в реальный мир?

Как было бы здорово, если бы можно было выбрать оба варианта, а не один. Квантовая механика предлагает такой подход: всякий раз, принимая решение, можно свериться с квантовым генератором случайных чисел. Для этой цели уже существует приложение для iPhone под названием *Universe Splitter*, серьезно!

Допустим, перед вами стоит выбор: чего бы добавить в пиццу — перчика или колбаски? (Также предположим, что вы слишком стесняетесь и это не позволяет вам дать очевидный ответ: и того и другого.) В таком случае можно открыть *Universe Splitter*, где вам предложат два текстовых поля — в одном вы вводите «перчик», в другом «колбаска». Нажимаете кнопку, и ваш телефон отправляет по интернету сигнал в лабораторию, расположенную в Швейцарии, где фотон пропускается через светоделитель (в сущности, это частично посеребренное зеркало, которое отражает одни фотоны и пропускает другие). Согласно уравнению Шрёдингера, светоделитель расщепляет волновую функцию фотона на две компоненты, направленные влево и вправо, и каждая из компонент летит к своему детектору. Когда любой из детекторов зафиксирует фотон, он выдает соответствующие показания, которые запутываются с окружающей средой и быстро приводят к декогеренции и разделению волновой функции на две части. Тот из ваших двойников, который оказался в ветке, где фотон пошел влево, видит, как на экране вспыхивает «перчик», а тот, в чьей ветке фотон пошел вправо, — «колбаска». Если оба двойника последуют первоначальному плану и воспользуются подсказкой смартфона, то в одном мире в заказе окажется перчик, а в другом — колбаска. К сожалению, два этих субъекта никак не могут связаться друг с другом и рассказать, что оказалось вкуснее.

Даже для самого закаленного в боях квантового физика это *звучит* нелепо. Но это самое простое прочтение нашего лучшего понимания квантовой механики. Естественно, возникает вопрос: что с этим делать? Если реальный мир действительно столь радикально отличается от мира нашего повседневного опыта, то должно ли это как-то влиять на нашу жизнь?

В основном – нет. Для каждого индивида в любой из веток волновой функции жизнь течет так, как если бы он жил в единственном мире с истинно стохастическими квантовыми событиями. Но эти проблемы стоят того, чтобы их исследовать.



Вы вправе делегировать все ваши сложные решения квантовому генератору случайных чисел и таким образом гарантировать, что в волновой функции окажется как минимум одна ветка, в которой будет выбрана наилучшая альтернатива. Но допустим, мы решили этого не делать. Должно ли ветвление нашего «нынешнего я» на всё новых «будущих я» как-то влиять на наш выбор? С академической точки зрения, существует вероятность, что мы получим тот или иной результат при наблюдении квантовой системы, тогда как в многомировой интерпретации реализуются все исходы с весами, равными квадрату амплитуды волновой функции. Влияет ли существование всех этих дополнительных миров на то, как мы должны действовать, с личностной или этической точки зрения?

Несложно представить, что такое возможно, но если хорошенько подумать, значение этого фактора гораздо меньше, чем может показаться. Рассмотрим злосчастный эксперимент с квантовым самоубийством или смежную идею о квантовом бессмертии. Эта идея обдумывается с тех самых пор, как была сформулирована многомировая интерпретация, – говорят, что сам Хью Эверетт верил в один из вариантов квантового бессмертия, – но популяризовал ее физик Макс Тегмарк.

Вот ситуация: вообразите, что некое огнестрельное оружие срабатывает в результате квантового измерения, как в случае отправки запроса через приложение *Universe Splitter*. Допустим, что при

квантовом измерении существует 50 %-ная вероятность, что оружие выстрелит мне прямо в голову, и 50 %-ная вероятность, что ничего не случится. Согласно многомировой интерпретации, в таком случае подразумевается существование двух веток волновой функции, в одной из которых я жив, а в другой мертв.

Далее в рамках этого мысленного эксперимента предположим, что сама жизнь – это чисто физический феномен, поэтому можно не учитывать соображений, касающихся загробного мира. С моей точки зрения, та ветка, в которой оружие выстрелило, не войдет в опыт ни одного из моих будущих двойников, так как двойник из этой версии погибнет. Но в той ветке, где оружие не выстрелило, мой двойник останется невредим и будет жить дальше. Тогда, в некотором смысле, «я буду жить вечно», если эта леденящая кровь процедура будет повторяться снова и снова. Кто-то даже может заявить, что я не должен противиться участию в таком эксперименте (по-видимому, совсем не беспокоясь о том, что обо мне подумает весь остальной мир), – в тех ветках, где оружие выстрелило, «я» в принципе не существую, тогда как в единственной ветке, где оно раз за разом не стреляет, я остаюсь совершенно невредим. (Исходная формулировка Тегмарка была не столь масштабной: он просто отметил, что экспериментатор, выживший много раз подряд, будет иметь серьезные основания согласиться с эвереттовской картиной мира.) Такое заключение резко контрастирует с традиционной стохастической формулировкой квантовой механики, где мир всего один, и мои шансы выжить в таком эксперименте будут стремительно уменьшаться.

*Крайне не рекомендую* проводить подобный эксперимент в домашних условиях. На самом деле логика, рекомендующая не волноваться о тех ветках, где вы убиты, довольно сомнительна.

Рассмотрим старую добрую картину мира, где Вселенная всего одна. Если бы вы думали, что живете в такой Вселенной, стали бы вы возражать, если бы кто-то подкрался к вам сзади и выстрелил в голову? (Опять же, абстрагируемся от мысли, что других людей это может расстроить.) Большинству из нас такое развитие событий совсем не придется по душе. Но, согласно вышеизложенной логике, вы не должны «возражать» – в конце концов, если ты умер, то больше нет того «тебя», который мог бы переживать по этому поводу.



В этом анализе упускается из виду тот факт, что *сейчас* – когда мы вполне себе живы и восприимчивы – нас огорчает перспектива смерти, тем более скорой. И такой взгляд оправдан: то, как мы воспринимаем нашу жизнь сейчас, во многом зависит от наших ожиданий о том, как она сложится. И мы вправе возражать перспективе скорой смерти, даже если после нее нас совсем не будет это волновать. Учитывая все вышесказанное, квантовое самоубийство будет таким же безрадостным и непереносимым исходом, как подсказывает наша обычная интуиция. Для меня совершенно нормально стремиться к счастливой и долгой жизни для всех моих будущих версий, которые окажутся в разных ветках волновой функции, – столь же нормально, как надеяться на долгую жизнь, если бы я думал, что мир всего один.

Эта проблема перекликается с тем, о чем мы говорили в седьмой главе: о важности трактовки индивидов из разных веток как разных людей, пусть даже они произошли от одного и того же человека, оставшегося в прошлом. В многомировой интерпретации существует важная асимметрия между тем, как мы думаем о «нашем будущем» и «нашем прошлом», и в конечном итоге эту разницу можно связать с низкой энтропией, характерной для ранней Вселенной. Любой индивид может проследить себя в прошлое до единственного человека, но при движении в будущее эти личности будут множиться. Нет в будущем такого индивида, который сможет считать себя «настоящим потомком» вашего «я», и столь же верно, что ни один человек не является суммой всех этих будущих личностей. Они все разные, подобно однойяцевым близнецам, которые развились из одной зиготы.

Нас может волновать, что происходит с нашими двойниками, живущими в других ветках, но не имеет смысла приравнивать «их» к «нам». Допустим, вы приготовились измерить спин электрона по вертикали, подготовив для этого равную суперпозицию верхнего и нижнего спинов. Тут к вам в лабораторию заходит какой-то филантроп и предлагает следующую сделку: если спин окажется верхним, он даст вам миллион долларов, а если нижним – то вы дадите ему один доллар. С вашей стороны будет разумно согласиться на такое предложение: как бы то ни было, вам предлагают ставку с равными шансами либо выиграть миллион долларов, либо потерять всего один, даже если кто-то из ваших будущих двойников наверняка поиздержится на доллар.

Но теперь предположим, что вы успели приготовить эксперимент чуть-чуть быстрее и увидели результат (нижний спин) прямо перед тем, как к вам вломился филантроп. Он ведет себя как нахальный делец и утверждает, что в другой ветке кто-то из ваших двойников получил миллион долларов, поэтому теперь в этой ветке вы должны гостю доллар.

Невозможно представить, чтобы такая ситуация вас устроила (и вы отдали бы доллар), даже если в другой ветке ваш двойник вполне доволен случившимся. Вы – не ваши двойники, а они – не часть вас. После ветвления вы – два разных человека. Ни ваш опыт, ни ваши награды нельзя считать разделенными между вами и вашими двойниками в других ветках. Не играйте в квантовую русскую рулетку, не соглашайтесь на денежные сделки с квантовыми проходимцами.



Пожалуй, такая стратегия логична, если речь идет о вашем собственном благополучии, но что если речь идет о других? Как знание о существовании других миров влияет на наши представления о моральном и этичном поведении?

Правильный подход к представлениям о морали – это вообще противоречивая тема, даже в одномировой реальности, но в данном случае показательно было бы рассмотреть две широкие области теории морали: *деонтологию* и *консеквенциализм*. Деонтологи считают, что моральное поведение зависит от следования верным правилам: любые действия по определению правильные или ошибочные, независимо от их последствий. Консеквенциалисты, что неудивительно, придерживаются альтернативной точки зрения: мы должны работать над тем, чтобы довести до максимума положительные следствия наших действий. Утилитаристы, выступающие за доведение до максимума некоторых аспектов общественного благосостояния, – это парадигматические консеквенциалисты. Есть и другие подходы, но эти два иллюстрируют основные положения.

Представляется, что факт возможного наличия других миров никак не затрагивает деонтологию. Если суть вашей теории заключается в

том, что все действия по определению правильны или неправильны независимо от последствий, то существование других миров, в которых будут эти последствия происходить, не имеет никакого значения. Типичным деонтологическим правилом является категорический императив Канта: «Поступай так, чтобы максима<sup>[19]</sup> твоей воли могла бы быть всеобщим законом». Представляется, что «всеобщий закон» здесь вполне можно было бы заменить на «закон, соблюдающийся во всех ветках волновой функции», не изменяя ни одного значительного суждения об оценке тех или иных действий.

Консеквенциализм – совершенно другое дело. Допустим, вы серьезный утилитарист и считаете, что есть величина под названием *полезность*, с помощью которой можно измерить количество благополучия, присущего сознательным существам, и что эта величина может суммироваться для всех существ для получения общей полезности, и что морально верным является такой образ действия, который эту полезность максимизирует. Далее предположим, что, на ваш взгляд, общая полезность во всей Вселенной должна выражаться некоторым положительным числом (если бы вы считали иначе, то не отказались бы от попытки уничтожить Вселенную, что было бы хорошим сюжетом о становлении суперзлодея, но не понравилось бы окружающим).

Следовательно, если значение полезности во Вселенной выше нуля, а наша цель – максимизировать полезность, то создание новой копии целой Вселенной было бы одним из наиболее доблестных поступков с моральной точки зрения, какие только можно совершить. В таком случае было бы правильно разветвлять волновую функцию Вселенной как можно чаще. Можно представить себе сборку квантового устройства под названием «квантовый максимизатор полезности – КМП» (*quantum utility maximizing device, QUMaD*): пусть это будет прибор, постоянно отражающий электроны и пропускающий их через блок, в котором у электрона измеряется сначала вертикальный спин, а затем горизонтальный. Всякий раз, когда электрон претерпевает любое из этих измерений, Вселенная раздваивается, и при этом удваивается общая полезность во всех вселенных. Собрав и включив КМП, вы станете самым высокоморальным человеком всех времен!

Впрочем, что-то здесь явно не так. Включение КМП вообще никак не скажется на жизни людей ни в этой Вселенной, ни в других. Они

даже не знают о существовании этой машины. Можем ли мы быть уверены, что этот прибор настолько восхитителен с моральной точки зрения?

К счастью, есть парочка способов выпутаться из этой загадки. Один из них – это отвергнуть изначальное предположение: может быть, серьезный утилитаризм такого рода – не лучшая моральная теория. Существует долгая и славная традиция изобретений вещей, номинально повышающих уровень полезности во Вселенной, но никак не коррелирующих с интуитивно понятной нам моралью. (Роберт Нозик вообразил «монстра полезности», гипотетическое существо, столь всецело предающееся гедонизму, что самый моральный поступок со стороны каждого – обеспечивать максимальный уровень удовольствия этому монстру независимо от того, кто в таком случае может пострадать.) КМП – просто еще один подобный пример. Простая идея суммирования полезности для разных людей не всегда приводит к тем результатам, которые мы себе представляли.

Однако есть и другое решение, которое более непосредственным образом согласуется с многомировой философией. Когда мы рассуждали о выводе правила Борна, мы затрагивали и вопрос о том, как распределить степени уверенности в условиях неопределенности самолокализации: нам известна волновая функция Вселенной, но мы не знаем, в какой из ее веток оказались. Мы пришли к выводу, что наши степени уверенности должны быть пропорциональны весу ветки, то есть квадрату соответствующей амплитуды. Этот «вес» – критически важный аспект нашего представления о мирах в эвереттовской парадигме. Это касается не только вероятностей, но и закона сохранения энергии: он работает, только если мы умножим энергию каждой ветки на соответствующий ей вес.

В таком случае целесообразно подойти с таких же позиций и к полезности. Если у нас есть Вселенная с некой известной общей полезностью и мы измеряем спин, чтобы разделить эту Вселенную на две ветки, то общая полезность после ветвления должна быть суммой весов каждой из веток, умноженных на полезности этих веток. В таком случае вероятно, что выполненное нами измерение спина не повлияет на чью-либо полезность существенным образом и общая полезность из-за нашего измерения совершенно не изменится. Так нам подсказывает интуиция. Кроме того, именно к такому выводу мы

пришли бы, избрав подход к вероятностям в рамках теории принятия решений (речь об этом шла в главе 6). С этой точки зрения многомировая интерпретация не должна заметным образом менять наших представлений о моральных действиях.

Тем не менее можно придумать систему, в которой отличия между Многомировой интерпретацией и теориями, предусматривающими коллапс, действительно будут значимы с моральной точки зрения. Допустим, есть квантовый эксперимент, который с равной вероятностью может привести к результатам А или Б, где А – это очень хорошо, а Б – тоже хорошо, но в меньшей степени, и эти эффекты в равной мере касаются каждого человека в мире. В одномировой интерпретации утилитаристский подход (который вполне можно назвать «здравомыслящим») указывает, что такой эксперимент провести целесообразно, так как огромное добро А или небольшое добро Б повысит суммарный уровень полезности в мире. Но предположим, что в вашем этическом кодексе абсолютный приоритет отдается равенству: не важно, что происходит, главное, чтобы это событие затрагивало всех в равной мере. В теориях, связанных с коллапсом, вы не знаете, каков будет результат, но любой из них приведет к сохранению равенства, поэтому проводить эксперимент все-таки стоит. Но в многомировой интерпретации, если люди в одной ветке получают А, то люди в другой ветке получают Б. Даже если между ветками невозможна ни коммуникация, ни какие-либо иные взаимодействия, такое положение дел может уязвить ваши моральные представления, и вы будете против такого эксперимента. Лично я не считаю, что неравенство между людьми, буквально обитающими в разных мирах, должно иметь для нас серьезное значение, но с логической точки зрения это возможно.

Если исключить такие искусственные конструкции, то у многомировой интерпретации, по-видимому, нет никакой моральной подоплеки. Представление о ветвлении как о «создании» совершенно новой копии Вселенной – очень яркое, но не вполне правильное. Лучше считать, что существующая Вселенная делится на почти идентичные сегменты, каждый из которых обладает меньшим весом, чем исходный. При таком подходе можно прийти к выводу, что о будущем следует думать так, как если бы мы жили в единственной стохастической Вселенной, подчиняющейся правилу Борна. Как ни

парадоксальна многомировая интерпретация на первый взгляд, в конце концов она никак не отражается на нашем подходе к жизни.



До сих пор мы говорили о ветвлении волновой функции как о явлении, которое происходит независимо от нас, поэтому нам остается просто следовать за ним. Уместен вопрос, а верна ли такая точка зрения. Всякий раз, когда я принимаю решение, создаются ли при моем выборе другие миры? Существуют ли реальности, соответствующие каждой последовательности альтернативных вариантов, которые я мог бы выбрать, вселенные, которые реализуют все возможности моей жизни?

Идея «принятия решения» отсутствует на уровне фундаментальных законов физики. Это одно из полезных приближений, один из эмерджентных феноменов, которые удобно использовать при описании явлений на уровне человека. То, что мы с вами называем «принятием решения», – это набор нейрохимических процессов, происходящих в мозге. Говорить о принятии решений – нормально, но в этом процессе не участвует ничего сверх обычной материи, подчиняющейся законам физики.

Вопрос заключается в следующем: физические процессы, происходящие у вас в голове, когда вы принимаете решение, *вызывают* ветвление волновой функции Вселенной, – значит ли это, что в каждой ее ветке принимаются разные решения? Я играю в покер и теряю все фишки после неудачного блефа. Могу ли я утешиться мыслью, что в другой ветке реальности я сыграл осторожнее?

Нет, принимая решение, вы не вызываете ветвления волновой функции. Дело в основном связано с тем, что мы понимаем (или должны понимать) под ситуацией, когда одно «обуславливает» другое. Ветвление – это результат микроскопического процесса, разрастающегося до макроскопических масштабов: система в квантовой суперпозиции запутывается с более крупной системой, которая затем запутывается с окружающей средой, что приводит к декогеренции. С другой стороны, решение – это чисто макроскопический феномен. Электроны и атомы внутри вашего мозга

не принимают никаких решений, они просто подчиняются законам физики.

Решения, выбор и их последствия – полезные концепции, если мы рассуждаем о вещах на макроскопическом, человеческом уровне. Вполне нормально считать, что выбор реально существует и имеет свои последствия, пока мы ограничиваем такие разговоры областью, в которой эти понятия применимы. Иными словами, мы можем решить, что будем говорить о человеке как о совокупности частиц, подчиняющихся уравнению Шрёдингера, и с тем же успехом о человеке можно говорить как об агенте, который обладает волей и принимает решения, влияющие на окружающий мир. Но нельзя пользоваться этими описаниями одновременно. Ваши решения не вызывают ветвления волновой функции, так как концепция «ветвление волновой функции» релевантна на уровне фундаментальной физики, а «ваши решения» релевантны на макроскопическом уровне повседневной жизни людей.

Итак, ваши решения ни в каком виде не могут вызывать ветвление. Но по-прежнему остается вопрос, а есть ли другие ветки, в которых вы приняли иные решения, нежели здесь. Действительно, они могут быть, но правильное понимание обусловленности должно формулироваться так: «произошел некоторый микроскопический процесс, вызвавший ветвление, и решения, принятые вашими двойниками в разных ветках, оказались разными», а не «вы приняли решение, и из-за этого волновая функция Вселенной разветвилась». Однако в большинстве случаев, когда вы принимаете решение, пусть даже в тот момент оно кажется вам спорным, почти весь вес будет сосредоточен в одной ветке, а не распределен равномерно по множеству альтернатив.

Нейроны нашего мозга – это клетки, состоящие из тела и отростков. Большинство этих отростков – дендриты, принимающие сигналы от окружающих нейронов, но у каждого нейрона есть один аксон, длинный отросток, по которому передаются исходящие сигналы. Заряженные молекулы (ионы) накапливаются в нейроне до тех пор, пока не достигают уровня, при котором запускается электрохимический импульс, идущий по аксону и далее по синапсам к дендритам других нейронов. Скомбинировав множество таких событий, получаем «мысль» (здесь мы опускаем некоторые сложные детали – надеюсь, нейрофизиологи меня простят).

В основном эти процессы можно считать полностью укладывающимися в классическую физику или как минимум детерминированными. В какой-то степени квантовая механика играет роль в любой химической реакции, поскольку именно квантовая механика задает правила перехода электронов из одного атома в другой или связи между двумя атомами. Но когда мы соберем в одном месте достаточно много атомов, их суммарное поведение можно описать без каких-либо отсылок к квантовым концепциям, например запутанности или правилу Борна, – в противном случае вы не смогли бы изучать в старших классах химию, не выучив сначала уравнение Шрёдингера и не беспокоясь о проблеме измерения.

Итак, «принятие решения» лучше всего рассматривать как классическое событие, а не квантовое. Хотя сами вы можете быть не уверены, какое решение в итоге примете, результат закодирован у вас в голове. Мы не вполне уверены, насколько это справедливо, поскольку до сих пор многого не знаем о физических процессах, лежащих в основе мышления. Возможно, что скорость неврологически важных химических реакций может слегка варьировать в зависимости от запутанности между различными вовлеченными атомами. Если это окажется правдой, то в определенном смысле наш мозг – это квантовый компьютер, пусть и с ограниченными возможностями.

В то же время любой честный эвереттианец признает, что в волновой функции всегда будут ветки, в которых квантовые системы вытворяют весьма маловероятные вещи. Как упоминала Алиса в главе 8, будут ветки, где я туннелирую через стену, а не отскочу от нее. Аналогично, даже если приближенная классическая модель моего мозга подразумевает, что за игрой в покер я поставлю все фишки, существует некоторая крошечная амплитуда, касающаяся группы моих нейронов, в соответствии с которой я поступлю маловероятным образом и выйду из торга. Но это не значит, что мое решение вызывает ветвление, – это я интерпретирую ветвление как факт, приводящий меня к решению.

При самом прямолинейном понимании химических реакций, происходящих у нас в голове, в основном наше мышление никак не связано с запутанностью и ветвлением волновой функции. Не стоит думать, что наше сложное решение разветвляет мир на множество экземпляров, в каждом из которых оказывается наш двойник,



поступивший по-своему. Но если вы не хотите брать на себя ответственность за решения, то всегда можете делегировать их квантовому генератору случайных чисел.



Аналогично квантовая механика никак не связана с вопросом о свободе воли. Логично предположить, что такая связь возможна, поскольку свободная воля зачастую противопоставляется детерминизму, идее о том, что будущее полностью предопределено текущим состоянием Вселенной. В конце концов, если будущее предопределено, то какое пространство остается нам для выбора? В академическом представлении квантовой механики результаты измерения поистине случайны, поэтому физика не является детерминированной. Может быть, так открывается дверца, через которую в мир может вновь проскользнуть свободная воля, некогда изгнанная за его пределы Ньютоном, предложившим концепцию классической механики, точной, как часовой механизм?

В этой области столько напутано, что не знаешь, с чего начать. В-первых, противопоставление «свободной воли» и «детерминизма» неверно по своей сути. Детерминизм должен противопоставляться «индетерминизму», а свободная воля — «несвободной воле». Определить детерминизм просто: зная точное текущее состояние системы, мы, пользуясь законами физики, можем узнать, каково будет состояние этой системы в дальнейшем. Со свободной волей сложнее. Обычно свободная воля определяется как «возможность сделать другой выбор». Таким образом, мы сравниваем то, что произошло в реальности (мы оказались в некоторой ситуации, приняли решение и действовали соответствующим образом), с иным гипотетическим сценарием (отмотали время назад и предположили, «могли бы» мы принять иное решение). Играя в такую игру, критически важно зафиксировать, что остается неизменным при сравнении реальной и гипотетической ситуаций. Абсолютно все, вплоть до последней микроскопической детали? Или мы всего лишь представляем, что фиксируем доступную нам макроскопическую информацию, но

допускаем вариации на уровне невидимых микроскопических деталей?

Допустим, мы проявим принципиальность и сравним ситуацию с тем, что произошло бы при гипотетическом перезапуске Вселенной, начиная с точно таких же исходных условий и вплоть до точного состояния каждой отдельной элементарной частицы. В классической детерминированной Вселенной результат получился бы точно таким, как и раньше, поэтому у вас не остается возможности «принять иное решение». При этом, согласно академической квантовой механике, в этой картине появляется элемент случайности, поэтому мы не сможем с уверенностью спрогнозировать окончательный результат в будущем, даже если исходные условия будут точно такими же, как раньше.

Но все это никак не связано со свободной волей. Иной результат не означает проявления какого-то личностного, надфизического влияния воли на законы природы. Это всего лишь означает, что некие непредсказуемые случайные квантовые величины на сей раз сложились иначе. Для традиционного «сильного» представления о свободе воли важно не то, подчиняемся ли мы детерминистским законам природы, а то, подчиняемся ли мы каким-либо безличностным законам вообще. Тот факт, что мы не можем предсказывать будущее, не равнозначен идее, что мы можем свободно творить его. Даже в академической квантовой механике человек все равно понимается как совокупность частиц и полей, подчиняющихся законам физики.

Если уж на то пошло, квантовая механика тоже не обязательно является недетерминированной. Контрпример – многомировая интерпретация. В ней вы совершенно детерминированным образом эволюционируете из одного индивида во множество собственных двойников, существующих в будущем. Ни о каком выборе речь не идет.

С другой стороны, можно поразмыслить и о более «слабой» трактовке свободной воли, которая касается доступных нам макроскопических знаний о мире, а не мысленных экспериментов, основанных на точных знаниях о природе вещей вплоть до микроскопических масштабов. В таком случае возникает непредсказуемость иного рода. Если перед нами человек и мы (или он, или какие-то третьи лица) владем информацией о его текущем психическом состоянии, то этим знаниям, как правило, будет

соответствовать множество конкретных конфигураций атомов и молекул в телах и мозгах этих людей. Некоторые из таких конфигураций могут приводить к существенно разным нейронным процессам, поэтому и действовать мы будем по-разному, если все эти конфигурации имеют отношение к реальности. Тогда лучшее, что мы можем сделать для описания того, как люди (или другие агенты, обладающие сознанием) действуют в реальном мире, – признать за ними наличие свободной воли, то есть способности выбирать, как поступить.

В повседневной жизни мы приписываем свободу воли и себе, и окружающим. На практике не важно, будем ли мы предсказывать будущее, опираясь на исчерпывающие знания в настоящем, – ведь таких знаний у нас нет и не будет. По этой причине философская традиция, восходящая еще к Томасу Гоббсу, предполагает наличие *компатибилизма*, то есть совместимости между основополагающими детерминированными законами и реальностью совершаемого человеком выбора. Большинство современных философов подходят к свободной воле с позиций компатибилизма (что, конечно, еще не означает правильности такого подхода). Свободная воля реальна, как и столы, и температура, и ветви волновой функции.

Что касается квантовой механики, не важно, придерживаетесь вы компатибилизма или нет. Ни в том ни в другом случае квантовая механика не должна повлиять на вашу позицию. Даже если вы не можете предсказать результат квантового измерения, этот результат происходит из законов физики, а не из вашего личного выбора. Мы не создаем мир нашими действиями, наши действия – часть этого мира.



С моей стороны было бы упущением, если бы я, говоря о человеческом факторе многомировой интерпретации, умолчал о сознании. Существует тезис с долгой историей, согласно которому человеческое сознание необходимо для понимания квантовой механики либо что квантовая механика может быть необходима, чтобы понять сознание. Во многом это связано с представлениями о

таинственности как квантовой механики, так и сознания, поэтому кажется, что между ними может быть что-то общее.

В общем и целом нельзя сказать, что это неверно. Может быть, квантовая механика и сознание каким-то образом взаимосвязаны – это гипотеза, над которой мы вправе поразмыслить. Однако согласно всему, что нам сегодня известно, убедительных доказательств такой связи не существует.

Давайте сначала разберемся, может ли квантовая механика помочь нам в понимании сознания. Вполне возможно – хотя и далеко не наверняка, – что скорости различных нейронных процессов в вашем мозге интересным образом зависят от квантовой запутанности, так что они не могут быть поняты только с помощью классических рассуждений. Однако что касается сознания в том виде, как мы привыкли о нем думать, оно не сводится только лишь к скорости нейронных процессов. Философы различают «простую проблему» сознания – понимание того, как мы воспринимаем феномены, реагируем на них, думаем о них, и «сложную проблему» – каково наше субъективное восприятие мира от первого лица, каково это быть самим собой, а не кем-то еще.

По-видимому, квантовая механика никоим образом не связана со сложной проблемой. Некоторые пытались это проверить: в частности, Роджер Пенроуз вместе с анестезиологом Стюартом Хамероффом пытались разработать теорию, согласно которой объективный коллапс волновых функций мозговых микротрубочек помогает объяснить, почему мы обладаем сознанием. Это предположение не получило широкого признания в нейрофизиологическом сообществе. Что еще важнее, непонятно, почему это вообще должно иметь значение для сознания. Можно представить, что какие-то тонкие квантовые процессы в мозге, происходящие с участием микротрубочек или каких-то совершенно иных структур, влияют на скорость срабатывания нейронов. Однако это нисколько не помогает перекинуть мостик между «срабатыванием наших нейронов» и «нашим субъективным опытом самосознания». Многие ученые и философы, и я в том числе, вполне верят, что такой мостик перекинуть можно. Но крошечное изменение в скорости того или иного нейрохимического процесса, по-видимому, не имеет отношения к тому, как это

происходит. (А если и так, то нет никаких причин, по которым такой эффект нельзя было бы воспроизвести на компьютере.)

Эвереттовская квантовая механика не может сообщить ничего особенного о сложной проблеме сознания, чего бы не сообщали и другие парадигмы, в рамках которых мир считается сугубо физическим. С такой точки зрения к релевантным фактам, касающимся сознания, относятся следующие:

1. Сознание возникает в мозге.
2. Мозг является согласованной физической системой.

Вот и все («согласованный» в данном случае означает «состоящий из взаимодействующих частей», две совокупности нейронов, находящиеся в двух невзаимодействующих ветках волновой функции – это два разных мозга). Можно расширить понятие «мозг» до «нервная система», или «организм», или «система для обработки информации», как хотите. Суть в том, что мы не делаем дополнительных допущений о сознании или личной идентичности при обсуждении многомировой интерпретации квантовой механики, это полностью механистическая теория, в которой не отводится никакой особой роли для наблюдателя или его опыта. Обладающие сознанием наблюдатели ветвятся вместе со всей остальной волновой функцией, равно как камни, реки и облака. В многомировой интерпретации задача понимания сознания столь же трудна, как и в любой другой теории, и не имеет отношения к квантовой механике.

У сознания есть множество важных аспектов, которых ученые пока не понимают. Этого следовало ожидать: человеческий разум вообще и сознание в частности – исключительно сложные феномены. Тот факт, что мы не до конца их понимаем, не должен искушать нас предлагать все новые фундаментальные физические законы, которые помогли бы справиться с этой проблемой. Законы физики и их экспериментальные подтверждения гораздо понятнее, чем работа нашего мозга и взаимосвязь мозга и разума. Возможно, когда-нибудь мы задумаемся об изменении законов физики, чтобы успешно объяснять ими сознание, но такой ход следует оставить на случай, если не останется других вариантов.



Также можно перевернуть вопрос с ног на голову. Если квантовая механика не помогает описать сознание, то, возможно, сознание играет центральную роль для описания квантовой механики?

Возможно многое. Но здесь есть еще кое-что. Учитывая, какое пристальное внимание уделено акту измерения в правилах стандартной академической квантовой теории, естественно задать вопрос, а есть ли что-либо особенное во взаимодействии сознающего субъекта и квантовой системы. Может ли коллапс волновой функции быть обусловлен сознательным восприятием определенных свойств физических объектов?

Согласно академическим взглядам, волновые функции коллапсируют в акте измерения, но что именно представляет собой «измерение», остается немного неясным. В копенгагенской интерпретации проводится различие между классическими и квантовыми областями, а измерение трактуется как взаимодействие классического наблюдателя и квантовой системы. Но не совсем понятно, где стоит провести эту линию. Так, если бы у нас был счетчик Гейгера, измеряющий излучение радиоактивного источника, то было бы естественно считать счетчик частью классического мира. Но это необязательно, даже в копенгагенской интерпретации можно представить счетчики Гейгера как квантовые системы, эволюционирующие согласно уравнению Шрёдингера. При таком подходе коллапс волновой функции обязательно наступит лишь в том случае, если результат измерения воспринимается наблюдателем, поскольку ни один человек еще не сообщал, что ему довелось оказаться в суперпозиции двух результатов измерения. Поэтому последнее место, где можно провести такую границу, – между «наблюдателями, способными засвидетельствовать, находятся ли они в суперпозиции» и «всеми остальными». Поскольку восприятие того, что ты не находишься в суперпозиции – это часть нашего сознания, не так уж безумен вопрос о том, а не сознание ли является истинной причиной коллапса.

Эту идею еще в 1939 году выдвинули Фриц Лондон и Эдмонд Бауэр, а позже ее поддержал Юджин Вигнер, получивший Нобелевскую

премию за исследование симметрии. По словам Вигнера:

Все, что, по-видимому, предоставляет квантовая механика – это вероятностные связи между последующими впечатлениями (также именуемыми «апперцепциями») сознания, и хотя разделительная линия между наблюдателем, чье сознание оказалось затронуто, и наблюдаемым физическим объектом может быть в значительной степени сдвинута в сторону первого или второго, она не может быть устранена. Возможно, преждевременно считать, что современная философия квантовой механики окажется навечно вписана в физические теории будущего, но в каком бы направлении ни стали развиваться наши будущие концепции, останется примечательным, что само изучение внешнего мира привело нас к выводу, что именно содержимое сознания есть высшая реальность.

Сам Вигнер впоследствии изменил мнение о роли сознания в квантовой теории, но это знамя подхватили другие. В принципе, это не та точка зрения, о которой благосклонно отзываются на конференциях по физике, но есть некоторые ученые, продолжающие воспринимать ее всерьез.

Если сознание действительно играет роль в процессе измерения квантовых феноменов, то что конкретно это означает? Самый прямой подход предполагает постулирование *дуалистической* теории сознания, согласно которой «разум» и «материя» должны являться двумя разными взаимодействующими категориями. Общая идея такова, что наши физические тела состоят из физических частиц, обладающих волновой функцией, которая подчиняется уравнению Шрёдингера, а сознание локализуется в отдельном нематериальном разуме, чье влияние и вызывает коллапс волновых функций, воспринятых разумным наблюдателем. Сегодня дуализм утратил былую популярность, а его расцвет пришелся на времена Рене Декарта. Основным камнем преткновения является «проблема взаимодействия». Как именно разум и материя взаимодействуют друг с другом? В данном контексте: как нематериальный разум, не представленный ни в пространстве, ни во времени, должен влиять на волновые функции и вызывать их коллапс?

Однако есть и другая стратегия, которая кажется менее неуклюжей и значительно более драматичной. Это *идеализм* в философском понимании данного слова. С философской точки зрения «идеализм» означает не «стремление к высоким идеалам», а убеждение, что основа реальности является по характеру ментальной, а не физической. Идеализм можно противопоставить физикализму или материализму, согласно которым основа реальности образована физической материей, а разум и сознание возникают на основе материи как совокупные феномены. Если физикализм утверждает, что существует всего один мир, физический, а дуализм – что в мире существует как физический, так и ментальный уровень, то идеализм настаивает на существовании лишь ментального уровня. (С логической точки зрения остается еще одна возможность, которая, правда, не пользуется популярностью, – что не существует ничего ни физического, ни ментального.)

Для идеалиста разум первичен, а то, что мы считаем «материей», есть отражение наших мыслей о мире. В некоторых версиях этой теории реальность возникает на основе коллективной деятельности отдельных разумов, тогда как в других версиях единственная концепция «ментального» лежит в основе как отдельных разумов, так и реальности, которая благодаря ним воплощается. Некоторые величайшие в истории философы, в том числе представители и восточной традиции, и западной, например Иммануил Кант, симпатизировали некоторой версии идеализма.

Несложно заметить, что квантовая механика, по-видимому, хорошо сочетается с идеализмом. Согласно идеализму, разум является первоосновой реальности, а квантовая механика (в академической формулировке) сообщает, что такие свойства, как координата и импульс, не существуют до тех пор, пока их не пронаблюдает некто предположительно разумный.

Все разновидности идеализма спотыкаются о тот факт, что реальный мир во всех ситуациях, за исключением одного неоднозначного примера – квантового эксперимента, вполне нормально работает без какого-либо участия сознающего разума. Наш ум позволяет выяснять факты о мире посредством наблюдения и эксперимента, а разные умы открывают различные аспекты мира, которые полностью согласуются друг с другом. Мы составили весьма подробное и успешное описание первых трех минут в истории Вселенной, когда ни один известный



разум о ней не размышлял. Тем временем прогресс в нейрофизиологии позволяет все точнее идентифицировать конкретные мыслительные процессы и связывать их со специфическими биохимическими событиями, происходящими в нашем материальном мозге. Если бы не квантовая механика и проблема измерения, то весь наш опыт восприятия реальности свидетельствовал бы в пользу первичности материи, из которой образуется разум, а не наоборот.

Итак, настолько ли нас не устраивает странность процесса квантового измерения, чтобы ради его объяснения мы решили отвергнуть физикализм как таковой в пользу идеалистической философии, позиционирующей разум в качестве первоэлемента реальности? Обязательно ли квантовая механика подразумевает центральность ментального?

Нет. Нам не *требуется* наделять сознание какой-то особой ролью, чтобы решить проблему квантового измерения. Мы видели несколько контрпримеров. Многомировая интерпретация – явный пример теории, позволяющей объяснить коллапс волновой функции на основании чисто механистического процесса декогеренции и ветвления. Можно поразмыслить о том, что сознание как-то участвует в этом процессе, но, учитывая все, что понимаем сегодня, строгой необходимости в этом нет. Разумеется, мы часто говорим об осознанном восприятии, пытаясь спроецировать квантовый формализм на наблюдаемый мир, но лишь в тех случаях, когда пытаемся объяснить подобный опыт как таковой. В остальном разум совершенно не участвует в данном процессе.

Всё это сложные и тонкие проблемы, а эта книга – не лучшее место для честного и исчерпывающего арбитража в споре между идеализмом и физикализмом. Идеализм – это феномен, который не так легко опровергнуть. Если кто-либо уверен в его правильности, то сложно указать ему на какой-то аспект, который однозначно изменил бы его мышление (или разум). Но идеалисты не могут утверждать, что квантовая механика вынуждает нас встать на их позиции. У нас есть очень стройные и убедительные модели мира, в которых реальность существует независимо от нас, и нет необходимости полагать, что мы создаем реальность, наблюдая ее или размышляя о ней.

# **Часть III**

## **Пространство-время**

## Почему существует пространство?

### *Эмерджентность и локальность*

Хорошо, наконец-то пришло время задуматься о реальном мире.

«Подождите-ка, — читаю я ваши мысли, — мне казалось, мы и так говорили о реальном мире. Разве не предполагается, что квантовая механика описывает реальный мир?»

Да, конечно. Но квантовая механика может описывать и множество других миров, а не только наш. Квантовая механика как таковая не является единой теорией в том смысле, что не является моделью конкретной физической системы. Как и классическая механика, это научный аппарат, воспользовавшись которым можно говорить о множестве разных физических систем. Можно говорить о квантовой теории отдельно взятой частицы, либо электромагнитного поля, либо множества спинов, либо целой Вселенной. Теперь давайте сосредоточимся на том, как могла бы выглядеть квантовая теория того мира, в котором мы живем.

К этой цели — найти подходящую квантовую теорию для реального мира — стремятся целые поколения физиков с начала XX века. По любым мыслимым меркам в этом достигнуты исключительные успехи. Важный шаг заключался в осознании того, что базовыми составляющими природы являются не частицы, а поля, заполняющие собой все пространство, — так появилась *квантовая теория поля*.

Еще в XIX веке физики, по-видимому, нащупали парадигму, согласно которой важная роль в мире отводится как полям, так и частицам: материя состоит из частиц, а силы, лежащие в основе их взаимодействий, описываются полями. Сегодня мы представляем эту картину лучше: даже частицы, которые мы так хорошо знаем и любим, на самом деле представляют собой просто вибрации полей, заполняющих окружающее нас пространство. Когда мы в физическом эксперименте видим нечто похожее на треки частиц, это свидетельствует о том, что наблюдаемое нами отличается от действительной реальности. Мы видим частицы, когда обстоятельства

к этому располагают, но, согласно нашим лучшим теориям, поля более фундаментальны.

Гравитация – это та часть физики, которая никак не хочет с удобством вписываться в парадигму квантовой теории поля. Часто приходится слышать: «У нас нет квантовой теории гравитации», но это излишне сильное утверждение. У нас есть исключительно хорошая классическая теория гравитации: общая теория относительности Эйнштейна, описывающая кривизну пространства-времени. Общая теория относительности сама по себе является теорией поля, так как описывает поле, заполняющее все пространство, в данном случае – гравитационное поле. Кроме того, мы очень хорошо разобрались, как брать классическую теорию поля и квантовать ее, получая на выходе квантовую теорию поля. Применяем эти процедуры к известным полям фундаментальной физики – и получаем так называемую *Основную теорию*<sup>[20]</sup>. Основная теория точно описывает не только физику частиц, но и гравитацию, поскольку сила гравитационного поля возрастает не слишком сильно. Ее достаточно, чтобы описать все без исключения феномены, относящиеся к нашему повседневному опыту, а также многое сверх того – столы и стулья, амёбы и котят, планеты и звезды.

Проблема в том, что Основная теория не охватывает многих ситуаций, находящихся за пределами повседневного восприятия, в том числе явления, происходящие в таких местах, где гравитация доходит до экстремальных значений, например черные дыры и момент Большого взрыва. Иными словами, у нас есть теория квантовой гравитации, которая работает, пока гравитация весьма слаба. Эта теория отлично описывает, почему яблоки падают с дерева, а Луна обращается вокруг Земли. Но это ограниченная теория: как только гравитация становится очень сильной или мы пытаемся слишком далеко экстраполировать наши вычисления, этот теоретический аппарат дает сбой. Насколько мы можем судить, такая ситуация характерна только для гравитации. В случае со всеми прочими частицами и силами квантовые теории поля, по-видимому, описывают любые ситуации, какие только можно вообразить.

Когда оказывается, что мы не способны квантовать общую теорию относительности столь же легко, как это получается с любой другой теорией поля, мы можем попробовать несколько стратегий. Во-первых,

просто хорошенько подумать: возможно, существует хороший способ напрямую проквантовать общую теорию относительности, но для этого нужны новые приемы, которые не требуются нам при работе с другими теориями поля. Другой подход – представить, что общая теория относительности не подходит для квантования. Может быть, нужно взять за основу-предшественницу другую классическую теорию, например теорию струн, и квантовать уже ее, надеясь, что в результате удастся построить квантовую теорию, которая будет включать и гравитацию, и все остальные взаимодействия. Уже несколько десятилетий физики экспериментируют с этими подходами и достигли некоторых успехов, но по-прежнему остается много нерешенных загадок.

Здесь мы рассмотрим иную стратегию – такую, которая с самого начала исходит из квантовой природы реальности. Каждый физик понимает, что в основе своей мир является квантовым, но на практике физикам не остается ничего иного, как прислушиваться к собственному опыту и интуиции, которые формировались на основе классических принципов. Существуют частицы, существуют поля, у них есть некоторые свойства, и мы можем их наблюдать. Даже при явном переходе к квантовой механике мы обычно берем классическую теорию и приступаем к ее квантованию. Но природа так не делает. Природа изначально *является* квантовой. Как настаивал Эверетт, классическая физика – это просто приближение, удобное в некоторых обстоятельствах.

Именно здесь мы подходим к моменту, когда начинает оправдываться вся та большая работа, которую мы проделали в предыдущих главах. Многомировая интерпретация отлично подходит для ситуации, когда нужно отбросить всю нашу классическую интуицию и действовать по-квантовому с самого первого шага, определяя, как наблюдаемый нами классический мир (представляющий собой приближение) проявляется из волновой функции Вселенной, пространства-времени и всего на свете.

В подходах, альтернативных многомировой интерпретации, часто требуются дополнительные переменные (как, например, в боровской механике) или правила, описывающие спонтанный коллапс волновой функции (как в ГРВ). Обычно они выводятся из нашего опыта с учетом классического предела рассматриваемой теории, и именно этот

опыт пока подводит нас в случае с квантовой гравитацией. Напротив, многомировая интерпретация не полагается ни на какую дополнительную надстройку. В конечном итоге это не теория о каких-то видах «материи», она описывает только квантовые состояния, эволюционирующие в соответствии с уравнением Шрёдингера. В обычных обстоятельствах для нас в таком случае появляется новый объем работы, поскольку приходится объяснять, почему мы вообще видим мир, состоящий из частиц и полей. Но в данном уникальном контексте квантовой гравитации это оказывается преимуществом, поскольку так или иначе от этой работы никуда не деться. Многомировая интерпретация, трактующая мир прежде всего с квантовой точки зрения, – самый подходящий вариант, когда становится очевидно, что никакая классическая теория не может служить подходящей отправной точкой для построения квантовой теории гравитации.



Прежде чем как следует углубиться в теорию квантовой гравитации, давайте выполним кое-какую подготовительную работу.

Общая теория относительности – это теория динамики пространства-времени, поэтому в данной главе мы зададимся вопросом о том, почему концепция «пространства» вообще так важна. Ответ кроется в концепции *локальности* – тела взаимодействуют, когда расположены в пространстве поблизости друг от друга. В следующей главе мы рассмотрим, как квантовые поля распространяются в пространстве и воплощают данный принцип локальности, а также помогают нам кое-что выяснить о природе пустого пространства.

Далее идет глава, в которой мы исследуем, как извлечь само пространство из квантовой волновой функции. Наконец, в последней главе мы увидим, что в условиях сильной гравитации приходится отказаться от локальности как таковой, поскольку она перестает быть центральным принципом. По-видимому, тайна квантовой гравитации теснейшим образом связана со всеми достоинствами и недостатками идеи локальности.

Следует аккуратно использовать термин «локальность», поскольку он используется в двух разных смыслах: можно говорить о *локальности измерения* и *динамической локальности*. Мысленный эксперимент ЭПР показывает, что квантовому измерению присуща некоторая нелокальность. Алиса измеряет спин своего электрона, и это сразу же повлияет на результат Боба, который попытается измерить спин своего электрона, даже если сам Боб об этом не знает. Теорема Белла предполагает, что любая теория, измерения в которой заканчиваются конкретными результатами, – в принципе, это касается всех подходов к квантовой механике, кроме многомировой интерпретации, – будет характеризоваться такого рода нелокальностью измерений. Ответ на вопрос, является ли многомировая интерпретация нелокальной в таком смысле, зависит от того, каким образом мы решим определять ветки нашей волновой функции. Есть как локальные, так и нелокальные варианты: в первых ветвление происходит только «вблизи», во втором случае – сразу во всем пространстве.

Динамическая локальность, в свою очередь, касается гладкой эволюции квантового состояния, когда не происходит ни ветвления, ни измерений. Именно в таком контексте физики ожидают, что все должно быть совершенно локальным, то есть локальные возмущения должны влиять на тела, расположенные только в непосредственной близости. Подобная локальность обусловлена одним из правил специальной теории относительности, согласно которому ничто не может перемещаться быстрее скорости света. Причем именно с такой динамической локальностью мы имеем дело, когда изучаем природу пространства и принципы его возникновения.

Имея это в виду, закатаем рукава и подробнее разберемся в том, какова структура наблюдаемой нами реальности. Мы живем в мире, который выглядит как совокупность расположенных в пространстве объектов, проявляющих свойства, аппроксимируемые классической физикой, за исключением эпизодических квантовых скачков, и этот мир проявляется из квантовой волновой функции. Эвереттовская квантовая механика претендует на то, что таких миров очень много, но в постулатах этой теории (волновые функции, их гладкая эволюция) никакие «миры» даже не упоминаются. Откуда же берутся миры и

почему эти миры приблизительно воспроизводят классическую физику?

Обсуждая декогеренцию, мы указали, что квантовую систему можно считать разделившейся на множество отдельных копий, как только она запутается с обширной окружающей средой, поскольку ничто из происходящего в одной из этих копий не будет отражаться на других копиях. Но если мы хотим быть педантичными, то на самом деле эта формулировка *позволяет* нам думать, что после декогеренции волновая функция описывает отдельные миры, но мы не *обязаны* так думать, и, более того, в этом нет никакой *необходимости*. Можно ли замахнуться на что-то большее?

Истина в том, что мы вовсе не обязаны считать, будто волновая функция описывает множество миров даже после декогеренции. Мы вполне можем говорить обо всей волновой функции как об одном целом. Просто ее удобно разделять на миры.

Многомировая интерпретация описывает Вселенную с помощью всего одного математического объекта – волновой функции. Существует множество способов *рассуждать* о волновой функции, позволяющих физически концептуализировать, что с ней происходит. Так, в некоторых случаях может быть удобно говорить о ней в терминах координат, а в других – в терминах импульса. Аналогично зачастую полезно говорить о волновой функции после декогеренции так, как будто она описывает множество различных миров. Это оправдано, поскольку происходящее в каждой ветке не влияет на события, происходящие в других. Но в конечном итоге все это также делается для нашего удобства, а не потому, что к этому нас вынуждает теория. В фундаментальном отношении данная теория имеет дело только с волновой функцией в целом.

В качестве аналогии подумайте о всей той материи, которая находится в вашей комнате. Можно описать ее, взяв в качестве подспорья классическое приближение, составив список значений координат и импульсов для каждого атома в комнате. Но это было бы безумием. Вы не располагаете такой информацией и не смогли бы ею воспользоваться, даже если бы располагали, кроме того, она вам, в сущности, и не требуется. Вместо этого вы дробите окружающую вас материю на тела, которыми удобно оперировать: стулья, столы, светильники, пол и т. д. Это описание несравнимо компактнее, чем



было бы описание каждого атома, и тем не менее дает нам хорошее представление о том, что происходит в комнате.

Точно так же нет необходимости характеризовать квантовое состояние в контексте множества миров, но так несравнимо проще управиться с рассматриваемой нами невероятно сложной ситуацией. Как подчеркивала Алиса в главе 8, миры не фундаментальны, а *эмерджентны*.

В данном случае эмерджентность не является характеристикой, указывающей на развитие событий во времени, в том смысле, как можно считать эмерджентным вылупление птенца из яйца. Эмерджентный подход – это способ описания мира, не претендующий на полноту, но позволяющий разделить реальность на удобные фрагменты. Нигде в фундаментальных законах физики вы не найдете таких понятий, как «комнаты» и «полы», – они эмерджентны. Это способы описания, позволяющие понять, что происходит, даже если мы не обладаем полной информацией о каждой молекуле и каждом атоме, которые нас окружают. Говоря, что явление эмерджентно, мы имеем в виду, что оно относится к приблизительному описанию реальности, которое справедливо на определенном (обычно макроскопическом) уровне и должно сравниваться с «фундаментальными» феноменами, которые являются элементами точного описания мира на микроскопическом уровне.

«Демон Лапласа» предполагает, что существует невообразимо мощный разум, который знает все законы физики и точное состояние мира, а также обладает неограниченными вычислительными способностями. Этот демон с абсолютной точностью знает все, что было, есть и будет. Но никто из нас не является демоном Лапласа. В лучшем случае мы обладаем частичными знаниями о состоянии мира, а наши вычислительные возможности весьма ограничены. Никто из нас не способен взглянуть на чашку кофе и рассмотреть в ней каждую частицу и каждый атом, мы наблюдаем лишь некоторые грубые макроскопические характеристики жидкости и чашки. Но этих данных может быть вполне достаточно для результативных рассуждений о кофе и прогнозирования свойств чашки кофе в самых разных обстоятельствах. Чашка кофе – это эмерджентный феномен.

То же касается миров в эвереттовской квантовой механике. Рассуждая о квантовом демоне Лапласа, то есть о существе, которое в

точности представляет квантовое состояние Вселенной, можно с уверенностью сказать, что такому существу никогда не потребуется делить волновую функцию на набор веток, описывающих совокупность миров. Но поступать так исключительно удобно и полезно, поскольку при такой постановке вопроса мы исходим из того, что разные миры не взаимодействуют друг с другом.

Это не означает, что миры не «реальны». Противопоставление «фундаментальный» и «эмерджентный» – одно, а «реальный» и «нереальный» – совсем другое. Столы, стулья и чашки кофе, вне всякого сомнения, реальны, поскольку в них воплощены подлинные закономерности Вселенной, такие, в соответствии с которыми организован мир и отражается его базовая реальность. То же самое касается эвереттовских миров. Мы прибегаем к ним, вырезая их из волновой функции для нашего же удобства, но такое «вырезание» не является произвольным. Разделить волновую функцию на миры можно правильно и неправильно, и правильные варианты деления дают нам независимые миры, подчиняющиеся аппроксимациям в виде законов классической физики. В конечном счете работоспособные варианты определяются законами природы, а не человеческой прихотью.



Эмерджентность – это не универсальная черта физических систем.

Она возникает, когда существует особый способ описания системы, требующий гораздо меньше информации, чем нужно было бы для полного представления системы, но тем не менее удобный для адекватного описания происходящих явлений. Вот почему нам удобно дробить реальность именно так, как мы это делаем, описывать столы, стулья и ветки волновой функции.

Представьте себе планету, обращающуюся вокруг Солнца. Такая планета, как Земля, состоит из  $10^{50}$  частиц. Чтобы в точности описать состояние Земли, даже на классическом уровне, потребовалось бы перечислить координаты и импульсы всех этих частиц, что выходит за рамки даже самых безумных фантазий о суперкомпьютерной мощности. К счастью, если нас интересует только орбита планеты, то абсолютное большинство этой информации совершенно не требуется.

Вместо этого можно представить Землю как материальную точку, расположенную в земном центре масс и обладающую таким же общим импульсом. Состояние данной материальной точки описывается ее координатой и импульсом, и этот совсем крошечный объем информации (шесть чисел: три координаты и три импульса<sup>[21]</sup>) – все, что требуется для расчета ее траектории (сравните это с  $6 \times 10^{50}$  чисел, которые описывали бы координаты и импульсы каждой частицы Земли). Это и есть эмерджентность: возможность схватывать важные характеристики системы, используя гораздо меньше информации, чем входило бы в исчерпывающее описание<sup>[22]</sup>.

Мы часто говорим об эмерджентных описаниях с точки зрения «удобства» в использовании, но не заблуждайтесь: понятие эмерджентности ничуть не антропоцентрично. Столы, стулья и планеты так бы и существовали, если бы не существовало людей, способных о них рассуждать. «Удобство» – это краткая характеристика, описывающая объективное физическое свойство. Оно означает, что существует точная модель системы, для построения которой требуется лишь малая толика информации, характеризующей всю систему.

Эмерджентность не возникает автоматически. Это особая ценная вещь, и если она возникает, то открывает огромные возможности для упрощения. Допустим, нам известны координаты всех  $10^{50}$  частиц на Земле, но ни для одной из них нам не известен импульс. У нас в распоряжении колоссальный объем информации, половина от всей существующей, но наша способность спрогнозировать, куда будет двигаться Земля, в данном случае равна нулю. Строго говоря, даже если бы мы знали импульсы всех частиц на Земле, кроме одной, и не имели бы об этом импульсе ни малейшего представления, то не могли бы с абсолютной точностью сказать, где Земля окажется в следующую секунду. Вполне возможно, что импульс этой единственной частицы столь же велик, как и у всех остальных, вместе взятых.

Такая ситуация в физике – общее место. Чтобы в точности спрогнозировать, что произойдет с многокомпонентной системой, нужно отслеживать информацию обо всех ее компонентах. Чуть-чуть расслабитесь – и вы уже ничего не знаете. Эмерджентность возникает, когда возможно прямо противоположное: отбросить почти всю информацию, оставив лишь малую толику (если удастся правильно

определить, что именно надо оставить), – и вы все равно сможете достаточно точно судить о происходящем.

В случае с центром масс объекта, состоящего из крошечных частиц, входящая в его эмерджентное описание информация будет того же рода, что и наша исходная информация (данные о координате и импульсе), просто ее потребуется гораздо меньше. Но на практике феномен эмерджентности более тонок: эмерджентное описание может касаться совершенно иных свойств, нежели те, с которых мы начинали.

Поговорим о воздухе в комнате. Допустим, мы поделили всю комнату на крошечные кубики, например с ребрами длиной по миллиметру каждое. В каждом из таких кубиков все равно окажется огромное количество молекул. Однако мы не станем отслеживать состояние каждой из этих молекул, а будем оперировать усредненными значениями, например плотностью, давлением и температурой воздуха в каждом кубике. Оказывается, вот и вся информация, которая нужна нам для точного прогнозирования того, что будет происходить с воздухом. Теория эмерджентности описывает иную сущность, она описывает жидкость, а не совокупность молекул, но такой подход оказывается достаточным для описания воздуха с высокой степенью точности. Для рассмотрения воздуха как жидкости требуется гораздо меньше информации, чем для рассмотрения его же в качестве совокупности частиц. «Жидкостное» описание является эмерджентным.

То же касается и эвереттовских миров. Нам не требуется отслеживать всю волновую функцию, чтобы предсказать динамику квантовой системы. Достаточно только знать, что происходит в отдельном мире. Для происходящих в мире явлений достаточно хорошее приближение можно получить с помощью классической механики, в которую будет лишь эпизодически вкрапляться квантовая – когда потребуется описать запутанность с макроскопическими системами в состоянии суперпозиции. Вот почему ньютоновских законов тяготения и уравнений движения достаточно для отправки ракет на Луну, без всяких подробных знаний о квантовом состоянии Вселенной. Наша конкретная ветка волновой функции описывает эмерджентный, почти классический мир.

Ветки волновой функции, описывающие отдельные миры, не упоминаются в постулатах многомировой интерпретации. Точно так же столы, стулья и воздух не упоминаются в постулатах Основной теории частиц и сил. По выражению философа Дэниела Деннетта, в категориях, позже перенесенных Дэвидом Уоллесом в квантовый контекст, каждый мир является эмерджентной сущностью, схватывающей «реальные закономерности», присущие основополагающей динамике. Реальная закономерность дает способ точного рассуждения о мире, не прибегая к подробному описанию этого мира на микроуровне. Именно в этом заключается бесспорная реальность эмерджентных паттернов вообще и эвереттовских миров в частности.



Поверив, что ветки волновой функции можно успешно трактовать как эмерджентные миры, следует задуматься о том, почему это множество миров получилось именно таким. Почему мы наблюдаем макроскопические объекты, обладающие вполне определенным местоположением в пространстве, а не находящиеся в суперпозициях сразу в нескольких местах? Почему «пространство» вообще является настолько центральным феноменом? Учебники по введению в квантовую механику иногда создают впечатление, что объекты начинают неизбежно подчиняться законам классической физики, как только становятся достаточно велики, но это полная ерунда. Совершенно не составляет труда представить себе волновую функцию, которая описывала бы крупный макроскопический объект во всевозможных причудливых суперпозициях. Настоящий ответ гораздо интереснее.

Мы можем подступиться к пониманию особой природы пространства, сравнив наши представления о координате и импульсе. Когда Исаак Ньютон впервые записал уравнения классической механики, привилегированная роль в них определенно отводилась координате, тогда как скорость и импульс были производными величинами. Координата описывает, «где вы находитесь в пространстве», а скорость — «как быстро вы в пространстве

перемещаетесь». Импульс же равен произведению массы на скорость. Пространство представляется основной сущностью.

Но если глубже вникнуть в проблему, оказывается, что концепции координаты и импульса более равноценны, чем кажется на первый взгляд. Пожалуй, это не должно нас удивлять: в конце концов, координата и импульс – именно те две величины, которые определяют состояние классической системы. Действительно, в гамильтоновой формулировке классической механики координата и импульс явно обозначаются как равноценные величины. Отражает ли это какую-то основополагающую симметрию, которая не очевидна при поверхностном взгляде на вещи?

С обыденной точки зрения координата и импульс кажутся совершенно разными. То, что математик назвал бы «пространством всех возможных координат», мы называем просто «пространством». Это трехмерный мир, в котором мы живем. «Пространство всех возможных импульсов» или «пространство импульсов» также является трехмерным, но нам эта концепция кажется абстрактной. Никто не верит, что мы в нем живем. Но почему нет?

Наиболее специфическое свойство пространства – это локальность. Объекты взаимодействуют, когда находятся рядом в пространстве. Два бильярдных шара отскакивают друг от друга, когда сходятся в одной и той же точке пространства. Ничего подобного не происходит с частицами, обладающими одинаковыми (или противоположными) импульсами: если они не находятся в одном и том же месте, то просто продолжают двигаться своим путем. Такая черта не является обязательной для законов физики – можно представить себе другие возможные миры, где такого бы не происходило, – но в нашем мире, по-видимому, все устроено именно так.

Рикошетирующие бильярдные шары являются классическими телами, но аналогичную ситуацию можно представить и в квантовой механике. Базовый квантовый формализм также трактует координату и импульс как равноценные феномены. Можно выразить волновую функцию, присвоив комплексную амплитуду любой координате, где может находиться частица, либо с тем же успехом ее можно выразить, присвоив комплексное число любому импульсу, которым может обладать частица. Два способа описания одного и того же базового квантового состояния эквивалентны, они выражают одну и ту же

информацию, но разными способами, что мы и наблюдали, когда обсуждали принцип неопределенности.

Выводы получаются весьма глубокими. Мы уже говорили, что волновая функция в определенный момент времени напоминает синусоиду, но так она выглядит при рассмотрении координаты, то есть с той точки зрения, с какой мы привыкли о ней рассуждать. Если выразить то же квантовое состояние в терминах импульса, то функция выглядела бы как пик в точке, соответствующей конкретному импульсу. А вот состояние с определенной координатой выглядит как синусоида, распределенная по всем возможным значениям импульса. Это позволяет предположить, что по-настоящему важен абстрактный феномен «квантового состояния», а не его конкретное представление в виде волновой функции, выраженной в терминах координаты или импульса.

Симметрию снова нарушает тот факт, что в нашем конкретном мире системы взаимодействуют друг с другом, когда расположены поблизости в пространстве. Именно так устроена динамическая локальность. Но с точки зрения многомировой интерпретации, которая трактует квантовые состояния как фундаментальные, а все остальное — как эмерджентное, напрашивается вывод, что ситуацию нужно воспринимать прямо противоположным образом: «пространственные координаты» — это переменные, в рамках которых взаимодействия выглядят локальными. Пространство не фундаментально: это просто способ представления того, что происходит с квантовой волновой функцией.



С такой точки зрения проще понять, почему эвереттовская волновая функция естественным образом делится на множество миров с приблизительно классическими свойствами. Данный феномен называется *проблемой предпочтительного базиса*. Многомировая интерпретация основана на том факте, что волновая функция Вселенной, как правило, описывает всевозможные суперпозиции, в том числе такие состояния, где в суперпозициях оказываются объекты, расположенные в совершенно разных местах. Однако мы никогда не

наблюдаем в суперпозициях ни стульев, ни шаров для боулинга, ни планет. Если судить по наблюдаемым явлениям, эти тела всегда обладают определенными координатами, а их движение подчиняется законам классической механики с очень высокой точностью. Почему мы не наблюдаем состояний, где в суперпозициях находились бы макроскопические объекты? Можно записать волновую функцию как комбинацию множества разных миров, но почему мы делим ее именно на *эти* миры?

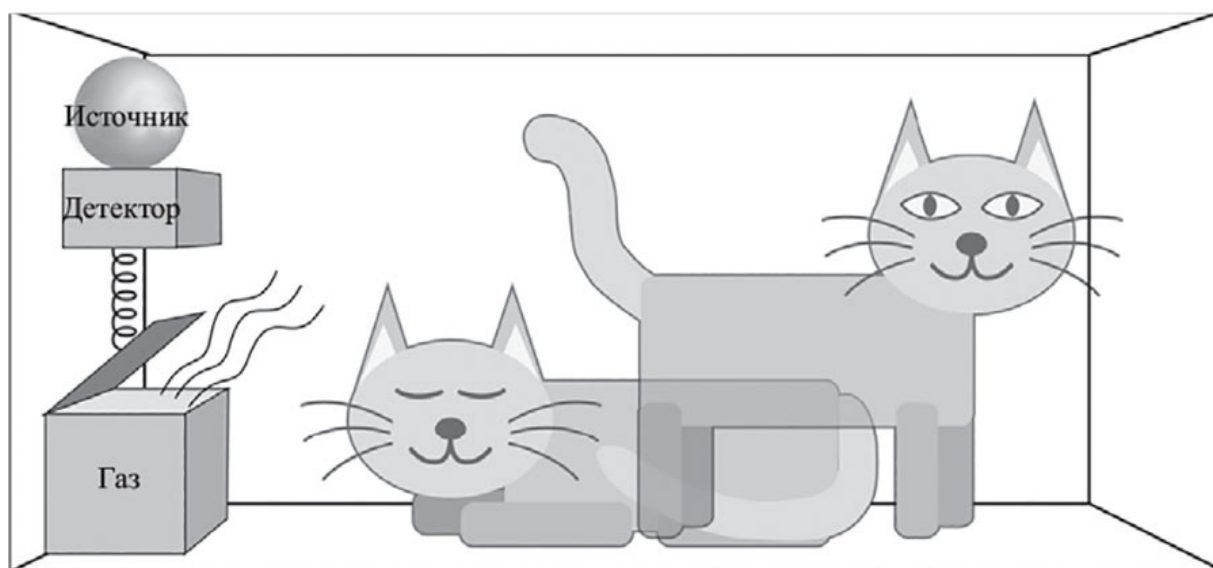
В принципе, ответ на этот вопрос был сформулирован в 1980-х. Объяснение было найдено в декогеренции, хотя исследователи до сих пор продолжают уточнять детали. Здесь было бы уместно обратиться к хорошо известному мысленному эксперименту под названием «кот Шрёдингера». Есть герметичная коробка, в которой сидит кот, и в ней – емкость с усыпляющим газом. В исходной шрёдингеровской постановке эксперимента газ был ядовитым, но незачем представлять, будто мы умерщвляем кота. (Как-то раз дочь Шрёдингера Рут предположила, что «папа просто не любил котов».)

Один из экспериментаторов взвел пружину, открывающую емкость, в результате чего газ попадет в коробку, и кот заснет. Но пружина срабатывает только после щелчка счетчика Гейгера, фиксирующего радиоактивную частицу. Рядом с детектором находится источник радиации. Нам известно, с какой частотой частицы испускаются из этого источника, поэтому можно вычислить, какова вероятность, что счетчик щелкнет и откроет емкость с газом в течение некоторого промежутка времени.

Радиоактивное излучение – это фундаментально квантовый процесс. То, что мы привыкли характеризовать как случайное испускание частицы, на самом деле представляет собой гладкую эволюцию волновой функции атомного ядра в источнике излучения. Каждое ядро эволюционирует из чистого состояния «не распался» в суперпозицию состояний «не распался» + «распался», причем вторая составляющая со временем нарастает. Распад частиц кажется случайным, так как детектор не измеряет непосредственно волновую функцию, он лишь фиксирует распавшуюся или нераспавшуюся частицу, подобно тому, как вертикальный магнит Штерна – Герлаха фиксирует только верхний или только нижний спин.



Суть данного мысленного эксперимента – вывести квантовую суперпозицию с микроуровня на макроуровень и увеличить рассматриваемую ситуацию до явно макроскопической. Это происходит, как только щелкает детектор. Вся постановка с сонным газом и котом нужна для увеличения масштаба квантовой суперпозиции и повышения ее наглядности. Слово «запутанность», которое переводится на немецкий как *Verschränkung* (дословно «ограниченность»), впервые было использовано Шрёдингером в переписке с Эйнштейном именно при обсуждении данного опыта с котом.



Эксперимент Шрёдингера был сформулирован в контексте академического подхода к проблеме измерения, где с волновой функцией происходит коллапс в тот самый момент, когда ее наблюдают. Итак, предлагает он, представьте, что мы не открываем коробку и не смотрим, что происходит внутри, до тех пор пока волновая функция не эволюционирует до равной суперпозиции состояний «как минимум одно ядро распалось» и «ни одно ядро не распалось». В таком случае волновые функции детектора, газа и кота также эволюционируют в равную суперпозицию состояний «детектор щелкнул, газ выпущен, кот спит» и «детектор еще не щелкнул, газ по-прежнему в емкости, кот бодрствует». Но вы же не полагаете всерьез, спрашивает нас Шрёдингер, что внутри коробки – суперпозиция

спящего и бодрствующего кота, которая сохранится до тех пор, пока мы не откроем ящик?

В определенном смысле Шрёдингер был прав. Принимая эвереттовскую трактовку квантовой динамики, мы признаем, что волновая функция гладко эволюционирует в равную суперпозицию двух возможностей, одна из которых – «кот спит», другая – «кот бодрствует». Однако, согласно декогеренции, кот также запутан с окружающей средой, состоящей из всех фотонов и молекул, находящихся внутри коробки. Фактическое ветвление на разные миры происходит практически сразу же после щелчка детектора. К тому моменту, как экспериментатор откроет коробку, уже будет две ветви волновой функции, в каждой из которых окажется всего один кот и один экспериментатор, а не суперпозиции котов и экспериментаторов.

Так снимается проблема, изначально беспокоившая Шрёдингера, но возникает другая. Почему когда мы открываем коробку, конкретные декогерированные квантовые состояния, которые мы видим, это либо «спящий кот», либо «бодрствующий кот»? Почему бы нам не увидеть некоторую суперпозицию того и другого? «Бодрствующий» и «спящий» вместе представляют собой всего один возможный базис для кошачьей системы, точно как «верхний спин» и «нижний спин» для электрона. Почему этот базис предпочтительнее любого другого?

С точки зрения физики для нас в данном случае важна материя – газ, молекулы, фотоны, – которая взаимодействует с рассматриваемой нами физической системой. Факт наличия или отсутствия взаимодействия конкретной частицы с котом зависит от того, где находится кот. Конкретный фотон вполне может быть поглощен бодрствующим котом, который крутится по всей коробке, но пролететь мимо кота, который свернулся и спит.

Иными словами, особенность базиса «спящий – бодрствующий» заключается в том, что отдельные состояния в рамках этого базиса описывают четкие пространственные конфигурации. А пространство – это сущность, в которой физические взаимодействия являются локальными. Частица может попасть в кота, если между ней и котом произойдет физический контакт. Две части кошачьей волновой функции, «спящий» и «бодрствующий», контактируют с разными частицами из окружающей среды и, следовательно, дают начало

разным мирам.



В принципе, это и есть ответ на вопрос, почему мы видим именно те миры, которые видим. Предпочтительный базис составляют те состояния, которые описывают когерентные объекты в пространстве, потому что такие объекты последовательно взаимодействуют со своей окружающей средой. Эти состояния часто именуются *устойчивыми*, и именно в них стрелка макроскопического измерительного прибора указывает на конкретное значение, а не находится в суперпозиции. Именно в устойчивом базисе классические приближения имеют смысл, и поэтому базисы такого рода служат основой для эмерджентных миров. Декогеренция – это феномен, в конечном итоге связывающий строгую простоту эвереттовской квантовой механики с беспорядочными частностями наблюдаемого мира.

## 12

### Мир вибраций *Квантовая теория поля*

Слово «дальнодействие», к которому обычно присовокупляют эйнштейновский эпитет «жуткое», часто всплывает в дискуссиях о квантовой запутанности и парадоксе ЭПР. Но сама идея дальнодействия гораздо старше – она восходит как минимум к Исааку Ньютону и его теории всемирного тяготения.

Если бы Ньютон просто собрал воедино базовую структуру классической механики и больше ничего в жизни не сделал, то он все равно оставался бы главным претендентом на звание величайшего физика всех времен. Но его притязания на физическую корону оказываются несомненными, поскольку он сделал гораздо больше, в том числе – ни много ни мало изобрел дифференциальное и интегральное исчисление. Но все-таки большинство людей, глядя на портрет Ньютона в его великолепном парике, думают о его теории всемирного тяготения, или гравитации.

Ньютоновский закон тяготения наиболее емко выражен в знаменитом законе обратных квадратов: сила тяготения между двумя телами пропорциональна массе каждого из них и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Таким образом, если бы мы отодвинули Луну от Земли вдвое дальше, чем она расположена сейчас, то сила притяжения между Землей и Луной уменьшилась бы в четыре раза. Воспользовавшись этим простым правилом, Ньютон показал, что для планет естественно двигаться вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, подтвердив таким образом эмпирическое наблюдение, которое сделал Кеплер многими годами ранее.

Но самого Ньютона его собственная теория так и не удовлетворила именно потому, что в ней присутствовало дальнодействие. Сила взаимодействия двух объектов зависит от того, где расположен каждый из них, и когда объект сдвигается в некотором направлении, создаваемое им гравитационное притяжение мгновенно меняется во всех точках Вселенной. Между двумя объектами нет ничего, что

опосредовало бы такое изменение, оно просто происходит. Это беспокоило Ньютона не потому, что было нелогичным или не согласовывалось с наблюдениями, а просто потому, что казалось неправильным. Можно сказать, жутким.

Непостижимо, чтобы неодушевленная грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения... Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам. Является ли, однако, этот агент материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям.

Действительно, есть «агент», благодаря которому тяготение действует именно так, а не иначе, и этот агент совершенно материален. Это гравитационное поле. Данная концепция была впервые предложена Пьером-Симоном Лапласом, который смог переформулировать теорию Ньютона таким образом, что сила тяготения стала передаваться через потенциальное гравитационное поле, а не простирается на бесконечные расстояния таинственным образом. Тем не менее изменение силы по-прежнему происходило мгновенно и сразу во всем пространстве. Так все и оставалось, пока Эйнштейн не предложил свою общую теорию относительности, согласно которой изменения гравитационного поля, как и электромагнитного, распространяются в пространстве со скоростью света. Общая теория относительности заменила лапласовский «потенциал» полевой «метрикой», которая на языке нетривиальной математики характеризует кривизну пространства-времени. Однако общая идея гравитационного поля, пронизывающего все пространство, осталась без изменений.

Идея поля, служащего переносчиком взаимодействия, концептуально привлекательна, так как воплощает идею локальности. При движении Земли направление ее гравитационного воздействия не меняется во всей Вселенной одновременно. На самом деле оно меняется именно там, где расположена Земля, а потом поле в этой точке подтягивает поле ближайших окрестностей, которое уже

воздействует на гравитационное поле в более отдаленных областях пространства, и далее эта волна распространяется со скоростью света.

Современные физики распространяют эту идею практически на все феномены во Вселенной. Основная теория была сформулирована на основе набора полей с последующим их квантованием. Даже частицы, например электроны и кварки, являются вибрациями квантовых полей. Сама по себе эта история чудесна, но цель данной главы несколько скромнее: понять, что такое «вакуум» в квантовой теории поля, то есть какое квантовое состояние соответствует пустому пространству. (Я вынес в приложение краткое обсуждение того, в каких состояниях могут находиться поля и их связи с частицами.) Позже мы поговорим о квантовой эмерджентности пространства как такового, но пока не отвлекаемся от удручающе традиционной темы и поговорим о квантовой теории поля – той, что получается в результате квантования классической теории поля в привычном пространстве.

Здесь мы, в частности, усвоим, что роль запутанности в квантовой теории поля еще принципиальнее, чем в квантовых теориях частиц. Когда нас интересовали в первую очередь частицы, запутанность могла быть как важна, так и нет в зависимости от физических обстоятельств. Можно создать состояние, включающее два запутанных электрона, но существует множество интересных состояний с участием двух электронов, которые вообще не запутаны друг с другом. Но в теории поля практически любое состояние, интересное с физической точки зрения, характеризуется огромной степенью запутанности. Даже пустое пространство, которое может показаться вам простым, описывается квантовой теорией поля как сложный набор запутанных вибраций.



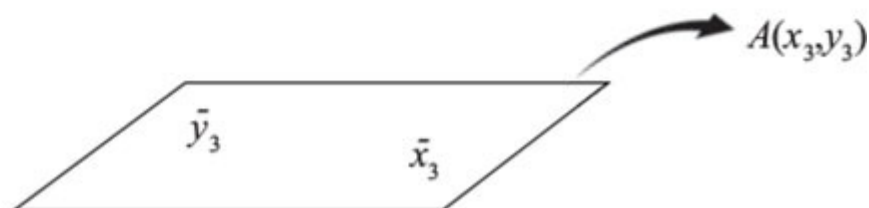
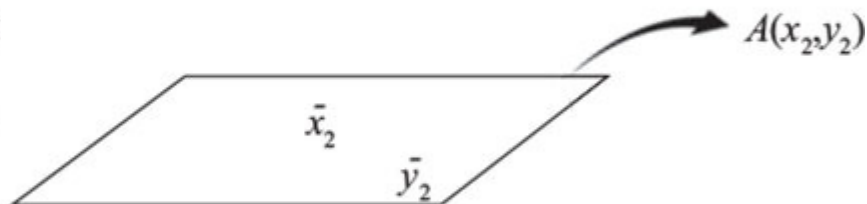
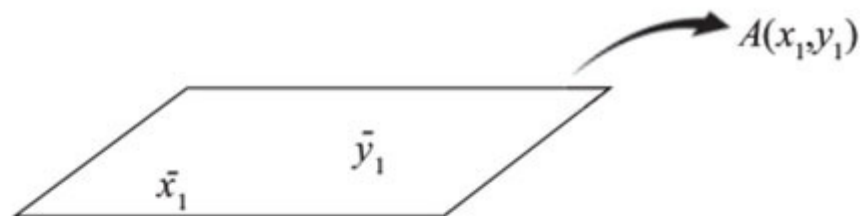
Квантовая механика началась с утверждений Планка и Эйнштейна о том, что электромагнитные волны обладают корпускулярными свойствами. Затем Бор, де Бройль и Шрёдингер предположили, что у частиц могут быть волновые свойства. Но в данном случае в игре оказываются две разновидности волнового поведения, или «волноподобия», и их следует аккуратно различать. «Волноподобие»

первого рода возникает, когда мы переходим от классической теории частиц к ее квантовой версии, получая квантовую волновую функцию набора частиц. С «волноподобием» второго рода мы имеем дело, когда мы стартуем с классической теории поля, еще до того, как дело дошло до квантовой механики. Именно к таким случаям относятся классический электромагнетизм или эйнштейновская теория гравитации. Как классический электромагнетизм, так и общая теория относительности являются теориями поля (и следовательно, волн), но сами по себе эти теории совершенно классические.

В квантовой теории поля мы исходим из классической теории поля и создаем *ее* квантовую версию. Вместо волновой функции, сообщающей нам вероятность наблюдать частицу в конкретной точке, мы имеем волновую функцию, которая сообщает нам вероятность наблюдать конкретную конфигурацию поля в пространстве. Если хотите, волновую функцию волны.

Существует много способов квантовать классическую теорию, но наиболее традиционный путь – как раз тот, который мы избрали. Размышляя о совокупности частиц, можно задать вопрос: «Где могут быть эти частицы?» Ответ для каждой отдельно взятой частицы будет просто «в любой точке пространства». Если бы частица была всего одна, то волновая функция присваивала бы амплитуду каждой точке пространства. Но, когда частиц у нас несколько, не существует отдельной волновой функции для каждой частицы. Есть одна большая волновая функция, присваивающая разные амплитуды любому возможному набору координат, где все эти частицы могут находиться в определенный момент времени. Вот так и может происходить запутанность: для каждой конфигурации частиц есть амплитуда, которую можно возвести в квадрат и таким образом получить вероятность наблюдать именно там все эти частицы одновременно.

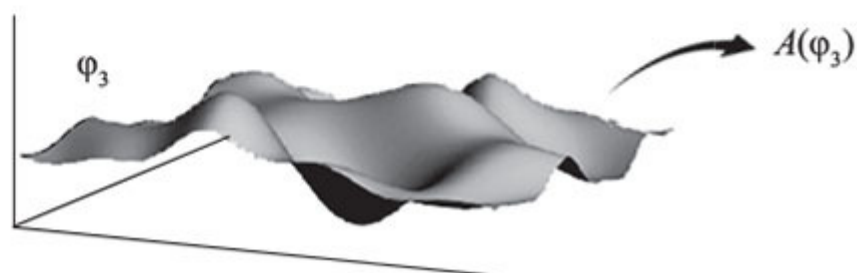
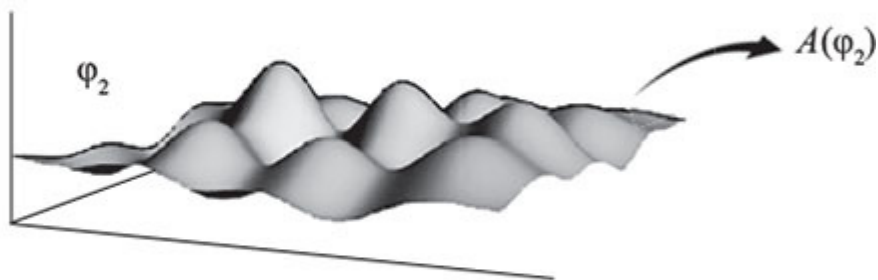
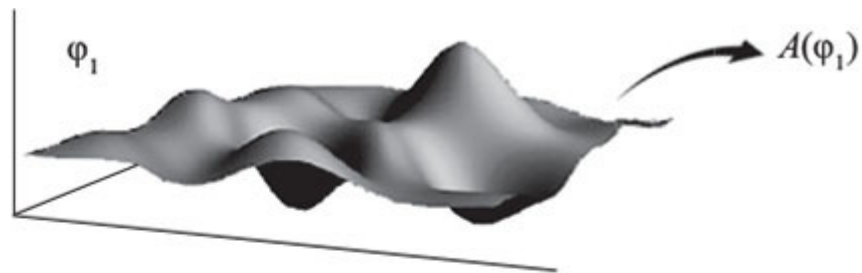
Волновая функция  
двух частиц  $x, y$   
присваивает  
амплитуду  $A$  любой  
возможной  
конфигурации этих  
частиц



То же касается полей, в случае которых «возможные конфигурации частиц» заменяется на «возможные конфигурации поля», и под конфигурацией в данном случае мы понимаем значения поля в каждой точке пространства. Волновая функция учитывает любую возможную конфигурацию поля и каждой из них присваивает амплитуду. Если бы можно было представить, что мы в состоянии наблюдать поле везде и сразу, то вероятность получить любую конкретную конфигурацию поля была бы равна квадрату амплитуды, присвоенной данной конфигурации.



Волновая  
функция поля  
присваивает  
амплитуду  $A$   
любой  
возможной  
конфигурации  
этого поля



В этом и заключается разница между классическим полем и квантовой волновой функцией. Классическое поле – это функция пространства, и классическая теория со множеством полей будет описывать множество функций пространства, накладывающихся друг на друга. Волновая функция в квантовой теории поля – это не функция пространства, а функция набора всех конфигураций всех классических полей (в Основной теории к их числу относились бы гравитационное поле, электромагнитное поле, поля различных субатомных частиц и так далее). Немного пугающий зверь, но физики научились его понимать и даже лелеять.

Все это неявно указывает на многомировую интерпретацию квантовой механики. Мы ничего не сказали здесь о декогеренции и ветвлении, но принимаем как должное, что все, в чем мы действительно нуждаемся, – это квантовая волновая функция и

подходящая версия уравнения Шрёдингера. Все остальное как-нибудь приложится. Это в точности эвереттовская ситуация. (Иногда, говоря об «уравнении Шрёдингера», имеют в виду как раз ту версию уравнения, которую изначально записал Шрёдингер, а она подходит только для нерелятивистских точечных частиц; тем не менее не составляет труда подобрать версию этого уравнения для релятивистских квантовых полей или для системы с гамильтонианом.) В других теориях часто требуются дополнительные переменные или правила, описывающие спонтанный коллапс волновых функций. При переходе к теории поля не сразу становится понятно, какие дополнительные составляющие должны быть в ней.



Если квантовая теория поля описывает мир как волновую функцию конфигурации классического поля, то мы имеем дело с ситуацией, где «волноподобие» надстроено над «волноподобием». Если задаться вопросом, насколько больше «волноподобия» можно ожидать при таком развитии событий, то ответ – «ничуть не более волнистые». И все же, когда мы наблюдаем квантовые поля, например при работе на Большом адронном коллайдере в Женеве, мы видим отдельные траектории, представляющие собой треки точечных объектов, а не диффузные волновые облака. Каким-то образом мы вернулись к частицам, хотя и добивались максимального «волноподобия».

Объяснение такой ситуации восходит к той же причине, по которой наблюдаются дискретные энергетические уровни у электронов в атомах. Электрон, движущийся в пространстве сам по себе, может обладать какой угодно энергией, но в области действия сил притяжения атомного ядра электрон словно попадает в коробку. Волновая функция падает до нуля при удалении от атома, и мы можем думать о ней, как о струне, которая закреплена с обоих концов и свободно колеблется между ними. В такой ситуации закрепленная струна может совершать лишь некоторый дискретный набор колебаний: аналогично волновая функция электрона в атоме обладает дискретным набором энергетических уровней. Всякий раз, когда волновая функция системы «ограничивается», обнуляясь в крупных/

отдаленных/экстремальных конфигурациях, она может обладать лишь дискретным набором энергетических уровней.

Вернемся к теории поля и рассмотрим очень простую конфигурацию поля, где синусоида простирается на все пространство. Такая конфигурация называется *модой* поля – ею удобно оперировать, поскольку совершенно любую конфигурацию поля можно представить в виде комбинации множества мод с разными длинами волн. Эта синусоида несет энергию, и эта энергия будет стремительно возрастать, если речь идет о все более и более высоких волнах. Наша цель – составить квантовую волновую функцию *этого* поля. Поскольку энергия поля возрастает вместе с высотой волны, по мере роста этой высоты волновая функция должна стремительно спадать, чтобы предотвратить вероятность появления очень высокоэнергетических волн. При любых раскладах оказывается, что волновая функция ограничивается (обнуляется) при очень высоких энергиях.

В результате, как и в случае с вибрирующей струной или с электроном в атоме, существует дискретный набор энергетических уровней для колебаний квантового поля. Фактически любая мода поля может быть в своем самом низкоэнергетическом состоянии, или в следующем по высоте, или в следующем и так далее. Общая волновая функция с минимальной энергией – такая, каждая мода которой обладает наименьшей возможной энергией. Это уникальное состояние, называемое *вакуум*. Когда теоретики, занимающиеся квантовой теорией поля, говорят о вакууме, они не имеют в виду межпланетное пространство, в котором почти нет материи. Под вакуумом они понимают «самое низкоэнергетическое состояние вашей квантовой теории поля».

Можно было бы подумать, что квантовый вакуум должен быть пуст и скучен, но на самом деле это дикое местечко. Электрон в атоме имеет самое низкоэнергетическое состояние, в котором он может находиться, но если трактовать это состояние как волновую функцию координаты электрона, то очертания этой функции все равно получаются интересными. Аналогично вакуумное состояние в теории поля все равно может иметь интересную структуру, если обратить внимание на отдельные фрагменты этого поля.

На следующем энергетическом уровне активность уже выше, поскольку в нем участвует следующая мода, энергия которой больше, чем у первой. Таким образом мы приобретаем некоторую свободу: могут быть состояния, образованные в основном коротковолновыми модами, состояния, образованные длинноволновыми модами, или же любая смесь мод. Общность всех этих состояний заключается в том, что каждая мода находится в своем «первом возбужденном состоянии», где ее энергия на самую малость выше минимума.

Если суммировать все это вместе, то волновая функция первого возбужденного состояния в квантовой теории поля выглядит в точности так же, как волновая функция отдельной частицы, выраженная как функция импульса, а не координаты. Как правило, в ней будут составляющие от волн разной длины, которые мы интерпретируем как разные импульсы в волновой функции частицы. Важнее всего, что состояние, устроенное таким образом, проявляет корпускулярные свойства, когда мы его наблюдаем: если мы измерим количество энергии в некоторой точке пространства (и ответом будет «я только что видел здесь частицу»), то чрезвычайно вероятно, что, посмотрев примерно туда же через секунду, вы зафиксируете такое же количество энергии, даже если изначально волновая функция была сильно распределена в пространстве. В конечном итоге вы будете наблюдать локализованную вибрацию, которая распространяется в поле и оставляет трек в приборе-детекторе, как это происходило бы с частицей. Если это выглядит как частица и крикает, как частица, то, скорее всего, это частица.

Можно ли в квантовой теории поля получить такую волновую функцию, чтобы некоторые присутствующие в ней моды находились в самом низком энергетическом состоянии, а другие – в первом возбужденном состоянии? Конечно же это будет суперпозиция состояний с нулем частиц и с одной частицей, описывающая состояние без определенного количества частиц.

Как вы могли догадаться, следующая по величине энергии волновая функция квантовой теории поля выглядит как волновая функция двух частиц. Та же история продолжается для квантовых состояний поля, соответствующих трем, четырем или любому числу частиц. Равно как мы наблюдаем кота Шрёдингера только в одном из двух состояний – он либо спит, либо бодрствует, – но не наблюдаем его в суперпозиции

этих состояний, так мы наблюдаем скопления частиц, когда измеряем слабую вибрацию квантовых полей. Выражаясь в терминологии предыдущей главы, поскольку поля вибрируют не слишком бурно, «устойчивые состояния» в квантовой теории поля выглядят как наборы из определенного количества частиц. Это мы и видим, когда смотрим на мир.

Более того, квантовая теория поля может описывать переходы между состояниями с различным числом частиц, так же как электрон в атоме может перескакивать как на более высокий, так и на более низкий энергетический уровень. В обычной квантовой механике, где центральное место отводится частицам, их количество является фиксированным. Но квантовая теория поля без проблем описывает и те частицы, которые распадаются, или аннигилируют, или рождаются при столкновениях других частиц. Это хорошо, так как подобные события происходят постоянно.

Квантовая теория поля представляет собой одну из самых триумфальных унификаций в истории физики, так как связывает воедино, казалось бы, противоположные идеи частиц и волн. Стоит нам осознать, что при квантовании электромагнитного поля возникают подобные частицам фотоны – и уже не так удивительно, что другие частицы, например электроны и кварки, тоже возникают из квантованных полей. Электроны – это колебания поля электронов, различные типы кварков – это колебания различных типов кварковых полей и так далее.

Во введении в квантовую механику частицы и волны иногда противопоставляются как две стороны одной медали, но едва ли это честная схватка. Поля более фундаментальны, именно поля дают нам лучшее представление о том, из чего состоит Вселенная. Частицы – это только то, что мы видим, рассматривая поля в подходящих обстоятельствах. Иногда обстоятельства неподходящие. Хотя мы часто говорим о кварках и глюонах как об отдельных частицах, внутри протона или нейтрона их правильнее трактовать как диффузные поля. Так, почти без риторического преувеличения, физик Пол Дэвис назвал одну из своих статей «Частиц не существует».



Нас в данном случае интересует базовая парадигма квантовой реальности, а не конкретные закономерности, связанные с частицами, их массами и взаимодействиями. Нас волнует запутанность, эмерджентность, а также ответ на вопрос о том, как классический мир возникает из ветвящейся волновой функции. К счастью, для ответов на эти вопросы можно сосредоточиться на рассмотрении вакуума в квантовой теории поля – на физике пустого пространства, где не летают никакие частицы.

Чтобы заострить внимание на примечательности вакуума в теории поля, давайте обратимся к одному из наиболее интересных его аспектов – его энергии. Соблазнительно предположить, что энергия вакуума по определению равна нулю. Но мы осторожно уйдем от такого утверждения: вакуум – это «состояние с самой низкой энергией», но не обязательно с «нулевой энергией». На самом деле эта энергия может быть вообще любой, это одна из констант природы, такой параметр Вселенной, который не определяется никаким другим набором измеримых параметров. В случае квантовой теории поля нужно просто взять и измерить, какова энергия вакуума.

Что мы и сделали, ну или, по крайней мере, нам так кажется. Сделать это не так легко: нельзя просто зачерпнуть пустое пространство, положить на чашу весов и взвесить. Решить такую задачу помогает гравитационное воздействие энергии вакуума. Согласно общей теории относительности, энергия вызывает искривление пространства-времени и как следствие – гравитацию. Энергия пустого пространства принимает особую форму: в каждом кубическом сантиметре пространства содержится строго определенное количество энергии, и эта величина неизменна в масштабах всей Вселенной, даже при расширении или искривлении пространства-времени. Эйнштейн ввел в теорию энергию вакуума в виде *космологической постоянной*, а космологи долго спорили, является ли ее значение строго нулевым или равно какому-то другому числу.

Эти споры, казалось бы, завершились к 1998 году, когда астрономы открыли, что Вселенная не просто расширяется, но расширяется с ускорением. Если посмотреть на далекую галактику и измерить скорость, с которой она от нас удаляется, то обнаружится, что с течением времени эта скорость возрастает. Это было бы крайне удивительно, если бы вся Вселенная состояла только из обычной

материи и излучения, так как и материя, и излучение оказывают притягивающий эффект, и в результате расширение должно замедляться. Воздействие положительной энергии вакуума прямо противоположно: она словно расталкивает Вселенную во все стороны, что и приводит к ускоряющемуся расширению. Две команды астрономов измерили скорости внегалактических сверхновых и расстояния до них, полагая, что измерят таким образом замедление расширения Вселенной. На самом же деле оказалось, что расширение ускоряется. Столь неожиданный результат стал неприятным сюрпризом, впечатление от которого отчасти удалось сгладить, поскольку в 2011 году за это открытие была вручена Нобелевская премия. (На самом деле это только кажется, что споры улеглись, так как по-прежнему остается возможность, что ускоренное расширение Вселенной обусловлено не энергией вакуума, а другим фактором. Но это, безусловно, ведущее объяснение как с теоретической точки зрения, так и в соответствии с наблюдениями.)

Можно было бы подумать, что на этом все. Пустое пространство обладает энергией, мы ее измерили, все в шоколаде.

Но мы можем задать и другой вопрос: какова должна быть *ожидаемая* энергия вакуума? Это довольно забавный вопрос сам по себе: ведь если речь идет о физической постоянной, то мы вообще не вправе ожидать, что она будет обладать конкретным значением. Но мы можем «на коленке» по-быстрому оценить, как велика должна быть энергия вакуума. Результат удручает.

Традиционный способ оценки энергии вакуума состоит в том, чтобы различать то, какой будет классическая космологическая постоянная, и то, как квантовые эффекты влияют на это значение. На практике все несколько иначе: природе нет дела до того, что человек привык исходить из классической физики и, опираясь на нее, выстраивать квантовую механику. Природа изначально квантовая. Но поскольку нас интересует очень грубая оценка, возможно, описанный метод нам и подходит.

Оказывается – не подходит. Квантовый вклад в энергию вакуума бесконечно велик. Подобная проблема характерна для квантовой теории поля: многие расчеты, которые мы пытаемся выполнять, постепенно включая в них квантовые эффекты, оканчиваются бессмысленными, бесконечно большими числами.

Но мы не должны воспринимать эти бесконечности чересчур серьезно. Все они в конечном итоге прослеживаются до того факта, что квантовое поле можно рассматривать как совокупность вибрирующих мод всевозможных длин волн: от невероятно длинных до нулевых. Если предположить (и на то есть очень веские причины), что классический минимум энергии у каждой моды равен нулю, то реальная энергия вакуума будет равна сумме всех дополнительных квантовых энергий каждой моды. Сложив квантовые энергии по всем этим модам, мы получим бесконечную энергию вакуума. Пожалуй, это нереалистично с физической точки зрения. В конце концов, следует ожидать, что на сверхмалых расстояниях пространство-время должно распадаться, лишаясь физического воплощения, поскольку эффекты квантовой гравитации будет невозможно игнорировать. Возможно, имеет смысл включать в расчеты только такие волны, длина которых превышает, например, планковскую. Такой подход называется *обрезанием* – квантовая теория рассматривается с учетом только тех мод, длина которых превышает некоторый минимальный предел.

К сожалению, проблему это почти не решает. Если оценить квантовый вклад в энергию вакуума с обрезанием части мод – тех волн, длина которых меньше планковской, – то получим конечный ответ, а не бесконечный, но этот результат будет в  $10^{122}$  раз выше значения, наблюдаемого в действительности. Это несовпадение, именуемое *проблемой космологической постоянной*, считается крупнейшим в истории физики расхождением между теорией и наблюдениями.

Строго говоря, проблема космологической постоянной не является конфликтом между теорией и наблюдениями. У нас нет никакого надежного теоретического прогноза относительно того, какой должна быть энергия вакуума. Столь неверная оценка связана с двумя сомнительными допущениями: во-первых, мы считаем, что классический вклад в энергию вакуума равен нулю, а во-вторых, производим обрезание на планковском масштабе. Вполне возможно, что классический вклад в эту величину, из которого следует исходить, практически так же велик, как и квантовый, но только по модулю. И сложив две эти величины, мы получим наблюдаемую «физическую» энергию вакуума, значение которой окажется относительно



небольшим. Просто мы понятия не имеем, почему такое предположение может быть верным.

Проблема не в том, что теория не согласуется с наблюдениями, а в том, что наши грубые оценки очень далеки от истины, и большинству кажется – это потому, что мы не учитываем какой-то таинственный фактор. Поскольку энергия считается чисто квантовомеханическим эффектом, а мы измеряем ее, исходя из ее гравитационного воздействия, вполне возможно, что мы не решим эту проблему, пока не получим рабочую теорию квантовой гравитации.



В научно-популярных рассуждениях о квантовой теории поля часто говорят, что вакуум полон «квантовых флуктуаций» или даже что «частицы рождаются прямо в пустом пространстве». Эта картина наглядная, но скорее ложная, чем истинная.

В пустом пространстве, которое описывает вакуум квантовой теории поля, ничто вообще не флуктуирует. Квантовое состояние абсолютно стационарно. Представление о частицах, которые рождаются из ничего, совершенно не соответствует реальности, в которой состояние в один момент времени абсолютно не отличается от состояния в любой другой момент. Несомненно, в энергии пустого пространства присутствует и сугубо квантовая доля, но ошибочно говорить, что данная энергия является следствием «флуктуаций», если на самом деле такие флуктуации отсутствуют. Система мирно пребывает в квантовом состоянии с минимальным уровнем энергии.

Почему же тогда физики только и говорят о квантовых флуктуациях? Это все тот же феномен, о котором мы уже говорили: так уж устроены люди, что нам неодолимо хочется *считать реальным именно то, что мы видим*, несмотря на то что квантовая механика позволяет нам понимать гораздо глубже. Теории со скрытыми переменными – наш «прогиб» именно в этом направлении, ведь в них признается реальность не гладко эволюционирующей волновой функции, а иных составляющих.

Эвереттовская квантовая механика ясна: пустое пространство описывается стационарным и неизменным квантовым состоянием, где

в каждый отдельный момент ничего не происходит. Но если присмотреться как следует к результатам измерения квантового поля в некоторой небольшой области пространства, то мы увидим полную сумятицу. А если посмотрим туда же через секунду – мы увидим уже иную сумятицу. В таком случае ужасно тянет заключить, что в пустом пространстве что-то движется, даже если мы на это не смотрим. Но на самом деле все иначе. Здесь мы видим проявление феноменов, о которых рассуждали в контексте принципа неопределенности: при рассмотрении квантового состояния мы обычно видим что-то совсем не похожее на состояние, существовавшее до начала наблюдения.

Чтобы прояснить этот момент, давайте представим измерение, более осуществимое с экспериментальной точки зрения. Будем измерять не значение поля в каждой его точке, а общее количество частиц, присутствующих в вакуумном состоянии квантовой теории поля. В идеальном мире, какой бывает в мысленных экспериментах, можно представить, что такой эксперимент проводится во всем пространстве одновременно. Поскольку, по условиям эксперимента, мы находимся в самом низкоэнергетическом состоянии, неудивительно, что мы нигде не обнаружим никаких частиц, – это абсолютно точно. Пространство пустое. Но в реальном мире мы вынуждены проводить такой эксперимент в конкретной области пространства, например в нашей лаборатории, задаваясь вопросом, сколько же частиц именно в этой области пространства. Какой ответ мы получим?

Вопрос кажется несложным. Если нигде в пространстве никаких частиц нет, то мы определенно не увидим частиц и в нашей лаборатории, верно? Увы, нет. Квантовая теория поля устроена иначе. Даже в вакуумном состоянии, если экспериментальное зондирование проводится в некоторой ограниченной области пространства, всегда существует небольшая вероятность наблюдать одну или даже несколько частиц. Как правило, эта возможность будет крайне невелика и на самом деле не должна волновать нас при постановке реалистичного эксперимента, – но она будет. Верно и обратное: найдутся такие квантовые состояния, в которых локальный эксперимент не выявит никаких частиц, но в целом у таких состояний будет более высокая энергия, чем у вакуумного состояния.

Наверное, хочется спросить: а частицы *точно* там есть? Как во всей Вселенной может быть ноль частиц, но при этом сохраняться

вероятность увидеть частицы в каждом конкретном месте?

Но ведь мы имеем дело не с теорией частиц, а с теорией полей. Частицы наблюдаются, когда мы особым образом подходим к рассмотрению этой теории. Мы должны спрашивать не сколько здесь частиц на самом деле, а каковы возможные результаты измерения, если пронаблюдать квантовое состояние данным конкретным образом. Измерение при постановке вопроса «сколько частиц в целой Вселенной?» принципиально отличается от измерения в формулировке «сколько частиц в этой комнате?». Настолько отличается, что, как и в случае с координатой и импульсом, ни в одном квантовом состоянии невозможно получить определенные ответы на оба вопроса сразу. Количество частиц, которые мы видим, не является абсолютной реальностью, оно зависит от того, как мы смотрим на состояние.



Здесь мы непосредственно подходим к важному свойству квантовой теории поля: запутанности между разными частями поля в разных областях пространства.

Допустим, мы разделили Вселенную на две части, проложив где-нибудь через пространство воображаемую плоскость. Для нашего удобства назовем эти части «левая» и «правая». С классической точки зрения поля находятся везде, поэтому для построения любой конкретной конфигурации поля нам потребуется указать, какова динамика этого поля как в левой, так и в правой части. Если по разные стороны проведенной нами границы обнаружится несовпадение между значениями поля, это будет свидетельствовать о резкой разрывности всего профиля данного поля. Такое можно себе представить, но для изменений от точки к точке полю нужна энергия, поэтому такой разрыв подразумевает, что в данной точке поля сосредоточено большое количество энергии. Вот почему для обычных конфигураций полей характерны довольно гладкие, а не резкие изменения.

На квантовом уровне классическое утверждение «значения поля по обе стороны границы обычно совпадают» принимает вид «поля в левой и правой частях обычно слегка запутаны друг с другом». Можно считать, что квантовые состояния двух частей Вселенной не запутаны,

но тогда на границе между ними будет сосредоточено бесконечное количество энергии.

Эти рассуждения можно развивать далее. Допустим, мы разделили все пространство на равновеликие области. С классической точки зрения в каждой из этих областей с полем будет что-то происходить, но, чтобы уйти от бесконечных значений плотности энергии, эти значения на границах областей должны совпадать. Следовательно, в квантовой теории поля все, что происходит в одной такой области, должно быть сильно запутано с происходящим в соседних областях.

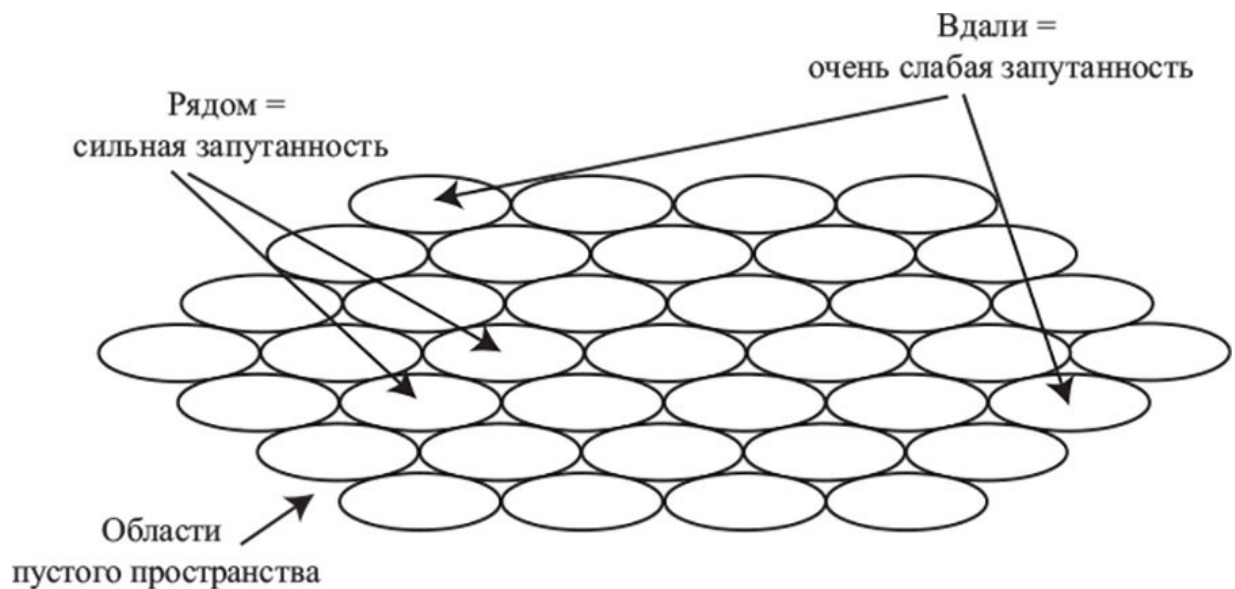
Это еще не все. Если область запутана с соседними, а эти соседние области запутаны с прилегающими к ним, то очевидно, что поля в нашей исходной области должны быть запутаны с полями не только соседних областей, но и тех, что расположены «через одну». (С логической точки зрения это не обязательно, но в данном случае кажется логичным, а тщательные расчеты подтверждают, что все действительно так.) Область будет значительно слабее запутана с областями, расположенными «через одну» от нее, чем с прилегающими, но некоторая запутанность все равно будет. Действительно, такое поведение поля прослеживается во всем пространстве: поля в любой области запутаны с полями в любой другой области во Вселенной, хотя степень запутанности становится все меньше и меньше по мере того, как мы рассматриваем все более удаленные друг от друга области.

Это может показаться натяжкой, поскольку, строго говоря, мы имеем дело с бесконечным количеством областей в бесконечно большой Вселенной. Могут ли поля в одной маленькой области, скажем в одном кубическом сантиметре, действительно быть запутаны с полями из любого другого кубического сантиметра пространства Вселенной?

Да, могут. В теории поля даже единственный кубический сантиметр (или область любого другого размера) содержит бесконечное количество степеней свободы. Напомню, что в главе 4 мы определили *степень свободы* как количество переменных, которое необходимо для полного описания состояния системы, например «координата» или «спин». В теории поля в любой конечной области пространства существует бесконечное количество степеней свободы: для каждой точки пространства значение поля в данной точке является отдельной

степенью свободы. При этом даже в небольшой области пространства существует бесконечное количество таких точек.

С квантовомеханической точки зрения пространство всех возможных волновых функций некоторой системы является гильбертовым пространством данной системы. Соответственно, гильбертово пространство, описывающее любую область в квантовой теории поля, является бесконечномерным, поскольку у нее бесконечное количество степеней свободы. Как мы убедимся, в правильной теории реальности это может и не подтвердиться: есть основания полагать, что на квантовую гравитацию в каждой области пространства приходится конечное количество степеней свободы. Но квантовая теория поля без гравитации допускает бесконечное количество степеней свободы даже в самой маленькой области.



Эти степени свободы в значительной мере запутаны со степенями свободы в других областях пространства. Чтобы показать, насколько сильно, представим, что мы начинаем с состояния вакуума, берем одну из таких областей объемом один кубический сантиметр и беспокоим квантовые поля внутри нее. Под словом «беспокоим» мы понимаем любое мыслимое воздействие на это поле именно в таком крошечном регионе – например, измерение поля или иное взаимодействие с ним. Мы знаем, что измерение квантового состояния приводит к его

переходу в другое квантовое состояние (фактически же каждое новое состояние попадает в новую ветку волновой функции). Как думаете, можно ли, беспокоя состояние в одной строго конкретной области, немедленно изменить состояние вне этой области?

Если вы немного знаете теорию относительности, то вам, наверное, хочется ответить «нет» – требуется время, чтобы какое угодно воздействие могло распространиться в отдаленные области пространства. Но затем мы вспоминаем мысленный эксперимент ЭПР, где выполненное Алисой измерение спина может повлиять на квантовое состояние спина Боба независимо от того, как далеко друг от друга находятся Алиса и Боб. Секретный компонент – это запутанность. А мы только что сказали, что вакуумное состояние в квантовой теории поля отличается сильной запутанностью, настолько, что любая область пространства запутана с любой другой областью. Так что вы уже начинаете задумываться, может ли наше воздействие на поле в одной области спровоцировать резкие изменения его состояния во всем остальном пространстве, даже в очень отдаленных областях.

Конечно же, может. Возбудив квантовое поле в крошечной области пространства, можно превратить квантовое состояние Вселенной *буквально в любое другое состояние*. В науке такой результат описывается *теоремой Рее – Шлидера*, также именуемой *теоремой Тадж-Махала*. Дело в том, что эта теорема подразумевает, что, не выходя из комнаты, я могу провести эксперимент и получить результат, согласно которому на Луне находится копия Тадж-Махала (или любого другого здания в любой другой точке Вселенной).

Пока не воодушевляйтесь. Мы не можем целенаправленно вызвать появление Тадж-Махала или гарантированно проделать подобное с любым физическим объектом. В примере ЭПР Алиса может измерить спин у своего электрона, но не может точно знать, каков окажется результат этого измерения. Согласно теореме Рее – Шлидера, если мы измеряем квантовые поля локально, то можем получить такой результат измерения, который будет означать, что на Луне внезапно возник Тадж-Махал. Но, как бы мы ни старались, вероятность получить такой результат будет невероятно крошечной. Практически всегда локальные измерения ничуть не затрагивают отдаленные

области мира. Как и многие впечатляющие результаты квантовой механики, этот весьма далек от практики.

В определенных кругах популярны послеобеденные дискуссии на тему «Следует ли удивляться теореме Рее – Шлидера?». Конечно, кажется странным, что мы можем провести у себя в подвале измерение, которое превращает состояние Вселенной буквально во что угодно. Как ни удивительно, ситуация именно такова. На что ваш оппонент может заметить, что если вы понимаете запутанность, то осознаёте: технически такие вещи возможны, но настолько маловероятны, что практически не имеют значения – в любом случае удивляться не следует. Если посмотреть на эту проблему под верным углом, то потенциальная возможность возникновения Тадж-Махала на Луне существовала всегда, в какой-то крошечной части квантового состояния. Наш эксперимент просто выудил ее из вакуума, создав условия для подходящего ветвления волновой функции.

Я думаю, что удивляться – нормально. Но гораздо важнее понимать насыщенность и сложность вакуума. В квантовой теории поля даже пустое пространство может быть очень интересным.

## **Дышать в безвоздушном пространстве**

### ***Как отыскать гравитацию в квантовой механике***

Квантовая теория поля позволяет успешно объяснить все до одного эксперименты, когда-либо поставленные человеком. Когда заходит вопрос об описании реальности, это лучший подход из всех, что у нас есть. Поэтому очень хочется считать, что все физические теории будущего окажутся вписаны в широкую парадигму квантовой теории поля или, возможно, небольших ее вариаций.

Но гравитация, по крайней мере когда становится сильной, плохо поддается описанию в квантовой теории поля. Поэтому в данной главе мы поговорим о том, можно ли продвинуться в решении этой проблемы, если подступиться к ней с другой стороны.

Вторя Фейнману, физики любят напоминать друг другу, что никто как следует не понимает квантовую механику. Тем временем они также давно жалуются, что никто не понимает квантовую гравитацию. Может быть, два этих непонимания связаны между собой. Гравитация, характеризующая состояние пространства-времени как такового, а не частицы и поля, движущиеся в пространстве-времени, крайне нелегко поддается описанию в квантовых терминах. Пожалуй, это не должно нас удивлять, если мы признаем, что не полностью понимаем саму квантовую механику. Возможно, размышляя об основаниях квантовой теории, – в частности, о многомировой интерпретации, согласно которой в мире фундаментальна только волновая функция, а вся остальная реальность проявляется из нее, – удастся в новом свете увидеть, как искривленное пространство-время формируется на квантовом фундаменте.

Задачу, которую мы перед собой поставили, можно назвать обратным проектированием. Вместо того чтобы брать классическую общую теорию относительности и пытаться квантовать ее, мы попробуем найти место для гравитации в самой квантовой механике. То есть возьмем базовые составляющие квантовой теории – волновые



функции, уравнение Шрёдингера, запутанность – и попробуем понять, в каких условиях мы можем получить эмерджентные ветки волновой функции, которые выглядят как квантовые поля, распространяющиеся в искривленном пространстве-времени.

Вплоть до этого момента все, о чем мы говорили в книге, можно было отнести либо к хорошо разобранным и установившимся доктринам (например, основы квантовой механики), либо как минимум к правдоподобным и уважаемым гипотезам (многомировая интерпретация). Теперь мы достигли пределов той теории, которую уверенно понимаем, и отправляемся на неизведанную территорию. Мы обсудим спекулятивные идеи, которые могут оказаться важны для понимания квантового пространства-времени и квантовой космологии. А могут и не оказаться. Только спустя годы, возможно, десятилетия дальнейших исследований, можно будет дать уверенный ответ. Как бы то ни было, считайте, что эти идеи должны натолкнуть вас на дальнейшие размышления. В любом случае воспринимайте эти идеи как побуждение к дальнейшим размышлениям и следите за тем, куда заведет дискуссия в будущем. Однако не забывайте о внутренней неопределенности, которая возникает при борьбе с трудными задачами на самом краю нашего понимания.



Альберт Эйнштейн однажды сказал коллеге: «Для занятий квантовой теорией моему мозгу требуется больше смазки, чем для исследования теории относительности». Следует отметить, что именно благодаря теории относительности Эйнштейн стал интеллектуальной суперзвездой.

Теория относительности, как и квантовая механика, – это не конкретная научная теория, а целый аппарат, в рамках которого могут формулироваться различные теории. Все релятивистские<sup>[23]</sup> теории разделяют общее представление о природе пространства и времени, в котором физический мир описывается в контексте событий, происходящих в едином унифицированном «пространстве-времени». Даже до появления теории относительности в ньютоновской физике можно было рассуждать о пространстве-времени: существует

трехмерное пространство и одно измерение времени, и, чтобы локализовать событие, произошедшее во Вселенной, нужно указать, где это событие происходит в пространстве, и время, когда оно произошло. Но до Эйнштейна не было особой мотивации для комбинации пространства-времени в единую четырехмерную концепцию. Когда же появилась идея относительности, это стало естественным шагом.

Существует две крупные идеи, объединенные под названием «теория относительности»: специальная теория относительности и общая теория относительности. *Специальная теория относительности* была сформулирована в 1905 году и основана на идее о том, что любой, кто измеряет скорость света в вакууме, получит одно и то же значение. Соотнесение этого понимания с позицией, согласно которой не существует абсолютной системы координат для описания движения, напрямую подводит нас к идее о том, что время и пространство «относительны». Пространство-время является универсальным и одинаковым для всех, но когда мы делим его на «пространство» и «время», эти элементы уже будут отличаться для разных наблюдателей.

Специальная теория относительности – это аппарат, в который входит множество конкретных физических теорий, и все они называются релятивистскими. Классический электромагнетизм, сформулированный Джеймсом Клерком Максвеллом в 1860-х годах, – это релятивистская теория, пусть даже она и была предложена раньше, чем теория относительности. Потребность лучше понять симметрию электромагнетизма стала движущей силой, благодаря которой прежде всего была сформулирована теория относительности. (Иногда слово «классический» употребляют в неверном смысле, включая в него понятие «нерелятивистский», но лучше в данном случае придерживаться значения «неквантовый».) Квантовая механика и специальная теория относительности на 100 % совместимы друг с другом. Квантовые теории поля, используемые в современной физике частиц, являются релятивистскими до мозга костей.

Другая крупная идея, связанная с относительностью, появилась десятью годами позже, чем специальная теория относительности. Это была *общая теория относительности* Эйнштейна, теория гравитации и искривленного пространства-времени. Важнейшее открытие

Эйнштейна заключалось в том, что четырехмерное пространство-время не является просто статичным фоном, на котором разворачивается все самое интересное в физике, но живет собственной жизнью. Пространство-время может изгибаться и морщиться, и это происходит с ним в ответ на присутствие материи и энергии. В школе мы изучаем законы геометрии на плоскости, сформулированные Евклидом, согласно которым две параллельные прямые никогда не пересекаются, а сумма углов треугольника всегда равна 180 градусам. Эйнштейн осознал, что пространство-время обладает неевклидовой геометрией, где эти почтенные факты не всегда соответствуют действительности. Так, исходно параллельные лучи света могут сфокусироваться, пока летят сквозь пустое пространство. Последствия этого искривления и есть то, что мы называем гравитацией. Общая теория относительности сопровождалась массой умопомрачительных следствий – в частности, подразумевала расширение Вселенной и существование черных дыр. Правда, физикам потребовалось немало времени, чтобы осознать эти следствия.

Специальная теория относительности – это научный аппарат, а общая теория относительности – это конкретная теория. Точно так же как законы Ньютона управляют эволюцией классической системы, а уравнение Шрёдингера управляет эволюцией квантовой волновой функции, есть уравнение, выведенное Эйнштейном, которое управляет кривизной пространства-времени. Как и в случае с уравнением Шрёдингера, интересно посмотреть, как выглядит уравнение Эйнштейна, даже если не вдаваться во все его детали:

$$R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

В основе уравнения Эйнштейна лежит зубодробительная математика, но сама его идея проста и емко сформулирована Джоном Уилером: материя сообщает пространству-времени, как ему искривляться, а пространство-время сообщает материи, как ей двигаться. В левой части формулы описывается кривизна пространства-времени, а правая характеризует величины, имеющие энергетическую природу, среди которых импульс, давление и масса.

Общая теория относительности – классическая. Геометрия пространства-времени уникальна, эволюционирует детерминированно,

и, в принципе, ее можно измерить со сколь угодно высокой точностью, не потревожив. С появлением квантовой механики совершенно логично была предпринята попытка «проквантовать» общую теорию относительности и таким образом получить квантовую теорию гравитации. Оказалось, это проще сказать, чем сделать. Особенность теории относительности в том, что это теория пространства-времени, а не теория материи, находящейся в пространстве-времени. Другие квантовые теории описывают волновые функции, позволяющие присваивать вероятности сущностям, наблюдаемым в конкретных точках пространства и в строго определенные моменты времени. Напротив, квантовая гравитация должна быть квантовой теорией пространства-времени как такового. Поэтому с ней возникают некоторые проблемы.

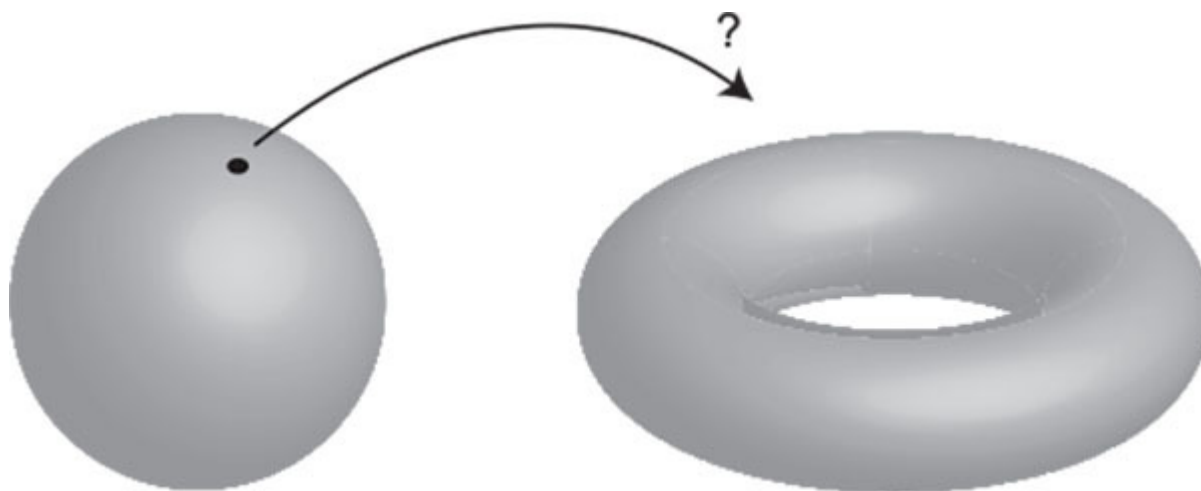
Естественно, Эйнштейн был одним из первых, кто осознал эту проблему. В 1936 году он размышлял о том, насколько сложно даже представить, каким образом можно было бы применить принципы квантовой механики к описанию природы пространства-времени:

Утверждают, что успех метода Гейзенберга может быть приведен к чисто алгебраическому методу описанию природы, то есть исключению из физики непрерывных функций. Но тогда нужно будет в принципе отказаться от пространственно-временного континуума. Можно думать, что человеческая изобретательность в конце концов найдет методы, которые позволят следовать этому пути. Но в настоящее время такая программа смахивает на попытку дышать в безвоздушном пространстве.

Здесь Эйнштейн рассуждает о гейзенберговском подходе к квантовой механике, который, как вы помните, описывает ее в терминах явных квантовых скачков, не пытаясь дополнить эту картину деталями происходящих при этом микроскопических процессов. Эти опасения сохраняются и в том случае, если перейти на более шрёдингеровские представления о волновых функциях. Предположительно нам нужно знать волновую функцию, которая присваивает амплитуды вероятности различным возможным геометриям пространства-времени. Но если мы, к примеру, представим

две ветки такой волновой функции, описывающие различные геометрии пространства-времени, то не будет уникального способа указать, что два события в двух ветках соответствуют «одной и той же» точке в пространстве-времени. Иными словами, не будет уникальной проекции между двумя этими геометриями.

Рассмотрим двумерную сферу и тор. Допустим, ваш друг выбирает точку на сфере, а ваша задача – выбрать «ту же самую» точку на торе. Вас это озадачит, и неспроста: эта задача неосуществима.



Очевидно, пространство-время не может играть в квантовой гравитации той же центральной роли, которую играет в остальных физических дисциплинах. Не существует единого пространства-времени, есть суперпозиция множества разных геометрий пространства-времени. Нельзя спросить, какова вероятность обнаружить электрон в конкретной точке пространства, поскольку нет объективного способа указать, о какой точке мы говорим.

Таким образом, квантовой гравитации присущ набор фундаментальных проблем, отличающих ее от других квантовомеханических теорий. Эти проблемы могут вывести нас на важные следствия, касающиеся природы нашей Вселенной, в том числе касающиеся вопроса о том, с чего она началась и было ли у нее вообще начало. Можно даже задать вопрос о том, фундаментальны ли время и пространство сами по себе или они проявляются на фоне чего-то более глубокого.



Как и основы квантовой механики, дисциплина квантовой гравитации условно игнорировалась на протяжении десятилетий, пока физики занимались другими вопросами. Условно, но не совсем: Хью Эверетт предложил многомировую интерпретацию отчасти потому, что размышлял о квантовой теории всей Вселенной, где важная роль отводится гравитации. Его наставнику Джону Уилеру квантовая гравитация не давала покоя годами. Но даже если не учитывать концептуальных проблем, существовали и другие препятствия, не позволявшие добиться серьезного прогресса в квантовании гравитации.

Серьезная помеха связана со сложностью получения прямых экспериментальных данных. Гравитация – это очень слабое взаимодействие, сила электрического отталкивания между электронами примерно в  $10^{43}$  раз превышает их гравитационное притяжение. В любом реалистичном эксперименте с участием всего нескольких частиц, где мы могли бы ожидать проявления квантовых эффектов, гравитация совершенно ничтожна по сравнению с другими взаимодействиями. Можно представить, что мы в состоянии соорудить настолько мощный ускоритель частиц, в котором их столкновения происходили бы при планковских энергиях, – вот в такой ситуации квантовая гравитация уже стала бы важна. Но, к сожалению, если масштабировать технологии, используемые в современных установках, то диаметр такого ускорителя составит не один световой год. В настоящее время такой проект технологически неосуществим.

С этой теорией сопряжены не только концептуальные проблемы, упомянутые выше, но и технические. Общая теория относительности – классическая теория поля. Поле, рассматриваемое в ней, называется *метрикой*. (Член  $g_{\mu\nu}$  в середине уравнения Эйнштейна как раз представляет метрику, остальные величины зависят от нее.) Слово «метрика» восходит к греческому *метрон* – «подлежащее измерению», поле метрики как раз и позволяет нам провести измерение. Если мы знаем траекторию в пространстве-времени, метрика сообщает, какое расстояние соответствует данной траектории. В принципе, метрика дополняет теорему Пифагора, которая соблюдается в евклидовой

планиметрии, но в искривленном пространстве-времени должна быть обобщена. Если мы знаем длину каждой кривой, этого достаточно, чтобы зафиксировать геометрию пространства-времени в каждой его точке.

Пространство-время обладает метрикой даже в специальной теории относительности и, если уж на то пошло, в ньютоновской физике. Но эта метрика застывшая, неизменная и плоская – согласно ей, кривизна пространства-времени в любой точке является нулевой. Главная идея общей теории относительности состояла в том, чтобы превратить метрическое поле в нечто динамическое, подверженное влиянию материи и энергии. Можно попробовать квантовать это поле, как мы поступили бы с любым другим. Небольшая рябь в квантованном гравитационном поле выглядела бы как частицы под названием *гравитоны* – подобно фотонам, которые, по сути, являются рябью электромагнитного поля. Никому еще не удалось зафиксировать гравитон и, возможно, не удастся, поскольку сила гравитации до невероятности слаба. Но если придерживаться основополагающих принципов общей теории относительности и квантовой механики, то существование гравитонов неизбежно.

Далее мы можем задаться вопросом, что происходит, когда гравитоны рассеиваются при соударении друг с другом или иными частицами. К сожалению, мы обнаруживаем, что теория прогнозирует бессмыслицу, если вообще что-то прогнозирует. Для расчета любой интересующей нас величины необходимо бесконечное множество входных параметров, поэтому теория здесь лишена всякой прогностической силы. Можно ограничиться «эффективной» теорией гравитационного поля, где мы соглашаемся ограничиться рассмотрением длинных волн при низких энергиях. Такая теория позволяет нам рассчитать гравитационное поле Солнечной системы даже в контексте квантовой гравитации. Но если мы стремимся получить полную теорию или по крайней мере теорию гравитации, которая работала бы при любых возможных энергиях, – то мы в тупике. Здесь требуется что-то радикальное.

Самым популярным современным подходом к квантовой гравитации является *теория струн*, в которой частицы заменяются маленькими петлями или сегментами одномерной «струны». (Не спрашивайте, из чего состоят струны, – из того же, что и все остальное.) Сами струны

невероятно малы, настолько, что при наблюдении на расстоянии кажутся нам точечными частицами.

Исходно теория струн была предложена, чтобы продвинуться в понимании сильного ядерного взаимодействия, но в этом она не помогла. Одна из проблем заключалась в том, что эта теория неизбежно прогнозирует существование частиц, которые выглядят и ведут себя в точности как гравитоны. Изначально этот момент казался раздражающим, но вскоре физики задумались: «Хм-м, гравитация же существует. Может быть, теория струн – это и есть квантовая теория гравитации?» Оказывается, это действительно так, более того, здесь имеется бонус: теория дает конечные прогнозы относительно всех физических величин, не требуя бесконечного количества входных параметров. Популярность теории струн взлетела в 1984 году, когда Майкл Грин и Джон Шварц продемонстрировали, что она математически непротиворечива.

Сегодня теория струн – это самый разрабатываемый подход к исследованию квантовой гравитации, далеко обходящий все прочие, хотя и у других идей есть свои приверженцы. Второй по популярности подход называется *петлевая квантовая гравитация*, которая начиналась с попыток напрямую проквантовать общую теорию относительности путем хитрого подбора переменных. В рамках этой теории мы не пытаемся рассмотреть кривизну пространства-времени в каждой его точке, а изучаем, как вращаются векторы при их движении по замкнутым петлям в пространстве. (Если пространство плоское, они вообще не вращаются, тогда как в искривленном пространстве они могут вращаться очень сильно.) Теория струн претендует на звание теории всех сил и материи сразу, тогда как петлевая квантовая гравитация нацелена конкретно на гравитацию. К сожалению, в этих теориях существуют препятствия, не позволяющие собирать экспериментальные данные, и они одинаково непреодолимы для всех альтернатив, поэтому в настоящее время мы не можем определить, какой из подходов правильный (и найден ли таковой вообще).

Тогда как теория струн достигла некоторых успехов в решении технических проблем квантовой гравитации, она практически не пролила света на проблемы концептуальные. Действительно, один из способов осмысления различных подходов, принятый среди исследователей квантовой гравитации, – поставить вопрос о том, как



мы должны думать о концептуальной стороне вещей. Теоретик-струновик, по-видимому, считает, что если найти решение всех технических сложностей, то концептуальные проблемы в конце концов решатся сами собой. Все, кто думает иначе, могут предпочесть петлевую квантовую гравитацию или любой другой из альтернативных подходов. Когда данные не позволяют дать однозначного ответа, мнения превращаются в глубоко укоренившиеся догмы.

Теория струн, петлевая квантовая гравитация и другие идеи следуют общей логике: они стартуют с классических переменных, которые затем квантуются. В рамках того подхода, о котором мы говорим в этой книге, все должно быть немного иначе. Природа изначально квантовая, она описывается волновой функцией, которая эволюционирует согласно соответствующей версии уравнения Шрёдингера. Такие феномены, как «пространство», «поля», «частицы», удобны при рассуждении о волновой функции в пределах классической физики. Мы не хотим начинать с частиц и полей, а затем квантовать их, мы собираемся извлечь их из исходно квантовой волновой функции.



Как найти «пространство» в волновой функции? Мы хотим найти в волновой функции черты, которыми она напоминает известное нам пространство, в частности такую составляющую, которая соответствовала бы метрике, помогающей определять расстояния. Итак, давайте подумаем, в каком виде расстояния представлены в обычной квантовой теории поля. Для простоты будем учитывать только расстояния в пространстве, а позднее поговорим о том, как в эту картину может вписываться время.

В квантовой теории поля есть один раздел, где расстояния фигурируют в самом очевидном виде, и об этом мы говорили в предыдущей главе: в пустом пространстве поля в различных его областях запутаны друг с другом, но чем дальше эти области расположены друг от друга, тем меньше между ними запутанность. Концепция «запутанности», в отличие от «пространства», всегда доступна нам в любой абстрактной квантовой волновой функции. Итак, возможно, здесь мы сможем найти точку опоры, рассмотрев

структуру запутанности состояний и воспользовавшись ею для определения расстояний. В данном случае нам требуется количественная мера того, насколько запутанной является квантовая подсистема. К счастью, такая мера существует: это энтропия.

Джон фон Нейман продемонстрировал, как в рамках квантовой механики вводится понятие энтропии, которое существует параллельно с классической энтропией. Согласно объяснению Людвигу Больцмана, мы исходим из набора составляющих, которые могут смешиваться друг с другом различным образом, – таковы, например, атомы и молекулы в жидкости. В таком случае энтропия – это способ подсчета количества способов, которыми можно упорядочить эти составляющие так, чтобы на макроуровне система внешне выглядела одинаково. Энтропия связана со степенью неведения: при рассмотрении состояний с высокой энтропией мы не так много можем сказать о микроскопических деталях системы, если судим о ней только по ее наблюдаемым макроскопическим свойствам.

Энтропия в трактовке фон Неймана сугубо квантовомеханическая по природе и возникает в результате запутанности. Рассмотрим квантовую систему, разделенную на две части. Это могут быть два электрона или два квантовых поля в разных областях пространства. Система в целом, как обычно, описывается волновой функцией. У нее есть вполне определенное квантовое состояние, даже если результаты измерений этой системы мы можем спрогнозировать только с некоторой вероятностью. Если две части этой системы запутаны, то для всей этой системы есть всего одна волновая функция, а не отдельная волновая функция для каждой из двух частей. Иными словами, части системы не находятся в определенных квантовых состояниях сами по себе.

Фон Нейман показал, что во многих отношениях факт отсутствия у запутанных подсистем собственных волновых функций аналогичен тому, как если бы у них были волновые функции, просто не известные нам. Квантовые подсистемы очень напоминают классическую ситуацию, допускающую множество разных состояний, которые на макроуровне выглядят одинаково. Причем такую неопределенность можно количественно выразить через величину, которая сегодня называется «*энтропия запутанности*». Чем выше энтропия квантовой подсистемы, тем сильнее эта подсистема запутана с внешним миром.

Вернемся к примеру с двумя кубитами, один из которых у Алисы, а другой у Боба. Вполне возможно, что они не запутаны, то есть у каждого кубита собственная волновая функция, соответствующая, например, равной суперпозиции верхнего и нижнего спинов. В данном случае энтропия запутанности у каждого кубита равна нулю. Даже если нам доступно лишь вероятностное прогнозирование результатов измерений, каждая из подсистем все равно остается в определенном квантовом состоянии.

Но представьте, что два кубита запутаны и находятся в равной суперпозиции состояний «оба спина верхние» и «оба спина нижние». У кубита Алисы нет собственной волновой функции, поскольку он запутан с кубитом Боба. Действительно, Боб мог бы измерить спин своего кубита и вызвать ветвление волновой функции так, чтобы кубит Алисы тоже раздвоился на два варианта, у каждого из которых — определенное состояние спина. Но ни одна из копий Алисы не знает, что это за состояние. Алиса оказывается в неведении и способна предсказать только то, что ее спин может с пятидесятипроцентной вероятностью оказаться верхним или нижним. Обратите внимание на тонкую разницу: Алисин кубит не находится в квантовой суперпозиции, где она не знает, каков будет результат измерения; он в таком состоянии, где при измерении в каждой из веток будет получен определенный результат измерения, но Алиса не будет знать, какое это состояние. Следовательно, мы считаем, что ее кубит обладает ненулевой энтропией. Идея фон Неймана заключалась в том, что мы должны приписать кубиту Алисы ненулевую энтропию даже до того, как Боб измерит свой, поскольку, в конце концов, она даже не знает, выполнит ли он измерение. Это и есть энтропия запутанности.



Рассмотрим, как энтропия запутанности проявляется в квантовой теории поля. Давайте ненадолго отвлечемся от гравитации и рассмотрим область пустого пространства в состоянии вакуума, обозначенную границей, которая отделяет внутреннюю область от внешней. Пустое пространство сильно текстурировано, в нем полно квантовых степеней свободы, каждую из которых можно считать

колебательной модой полей. Эти моды внутри области будут запутаны с модами извне, поэтому с каждой областью связана своя энтропия, даже если общее состояние – это просто вакуум.

Мы даже можем вычислить, какова эта энтропия. Ответ: она бесконечна. Такое осложнение часто встречается в квантовой теории поля: оказывается, что на многие вопросы, очевидно важные с физической точки зрения, находятся только «бесконечные» ответы, поскольку существуют бесконечно разнообразные варианты возможных колебаний поля. Но, как и в случае с энергией вакуума в предыдущей главе, мы можем прибегнуть к обрезанию, то есть рассматривать моды, начиная лишь с некоторой минимальной длины волны. Результирующая энтропия получается конечной, и, оказывается, она пропорциональна площади той области, в границах которой она определяется. Несложно понять почему: колебания поля в одной области запутаны с колебаниями во всех прочих областях, но большая часть запутанности сосредоточена в близлежащих областях. Общая энтропия некоторой области пустого пространства зависит от величины запутанности между данной областью и другими, находящимися за ее пределами, а эта величина пропорциональна площади рассматриваемой области.

Это интригующее свойство квантовой теории поля. Выберите некоторую область в пустом пространстве, и окажется, что энтропия этой области будет пропорциональна площади ее границы. Это соотношение связывает геометрическую величину, то есть площадь области, с «материальной» величиной – с количеством энтропии внутри данной области. Все это отдаленно напоминает уравнение Эйнштейна, которое также связывает геометрию (кривизну пространства-времени) с «материальной» величиной (энергией). Есть ли здесь в самом деле какая-то связь?



Такая связь возможна, как отмечается в провокационной статье Теда Джекобсона, гениального физика из Мэрилендского университета. Эта статья вышла в 1995 году. В обычной квантовой теории поля, не учитывающей гравитацию, энтропия пропорциональна площади в состоянии вакуума, но в более высокоэнергетичных состояниях это правило может не соблюдаться. Джекобсон постулировал, что в гравитации есть что-то особенное: когда в расчеты включается гравитация, энтропия области *всегда* пропорциональна площади ее границы. Едва ли мы могли ожидать подобного от квантовой теории поля, но, возможно, как раз это и происходит, когда в игру вступает гравитация. Мы можем представить, что так оно и есть, и посмотреть, что в таком случае будет.

А будут настоящие чудеса. Джекобсон предположил, что площадь поверхности пропорциональна энтропии той области, которую она охватывает. Площадь – это геометрическая величина, невозможно рассчитать площадь поверхности, не обладая некоторыми знаниями о геометрии того пространства, к которому она относится. Джекобсон отметил, что можно соотнести площадь очень небольшой поверхности с той самой геометрической величиной, которая фигурирует в левой части уравнения Эйнштейна. Тем временем энтропия сообщает нам кое-что о «материи» в широком смысле: о том веществе, которым наполнено пространство-время. Концепция энтропии исходно возникла в рамках термодинамики, где соотносилась с количеством теплоты, которую теряет система. Теплота – это одна из форм энергии. Джекобсон утверждает, что эту энтропию можно напрямую соотнести с членом «энергия», расположенным в правой части уравнения Эйнштейна. С помощью таких маневров ему удалось *вывести*

уравнение Эйнштейна для общей теории относительности, а не просто постулировать его, как это сделал Эйнштейн.

Чтобы сказать то же самое более прямо, рассмотрим небольшую область в плоском пространстве-времени. У нее есть определенная энтропия, поскольку моды внутри этой области запутаны с модами вовне. Теперь предположим, что мы немного изменим квантовое состояние, так чтобы степень запутанности рассматриваемой области с остальными снизилась и, следовательно, снизилась ее энтропия. В представлении Джекобсона, в ответ на это немного уменьшается и площадь области. И Джекобсон показывает, что такой отклик геометрии пространства-времени на изменения в квантовом состоянии эквивалентен эйнштейновскому уравнению общей теории относительности, которое связывает кривизну с энергией.

С этого начался всплеск интереса к так называемой энтропийной, или термодинамической, гравитации. Важные вклады в эти исследования были сделаны также Тхану Падманабаном (2009) и Эриком Верлинде (2010). Поведение пространства-времени в общей теории относительности можно рассматривать просто как естественную тенденцию систем стремиться к конфигурациям с более высокой энтропией.

Это весьма радикальная смена перспективы. Эйнштейн мыслил в терминах энергии, конкретной величины, связанной с определенными конфигурациями материи во Вселенной. Джекобсон и другие настаивают, что можно прийти к тем же выводам, размышляя об энтропии – совокупном феномене, возникающем в результате взаимодействия множества малых составляющих системы. Такая простая смена точки зрения может стать решающим шагом к открытию фундаментально квантовой теории гравитации.



Джекобсон не ставил своей целью предложить теорию квантовой гравитации, он предложил новый способ вывода эйнштейновского уравнения для классической общей теории относительности, где квантовые поля действуют как источник энергии. Такие термины, как «площадь» и «область пространства», наводят на мысль, что в

вышеизложенной дискуссии пространство-время трактуется как осязаемый, классический феномен. Но учитывая центральную роль, которая отводится энтропии запутанности в его выводах, сам собой возникает вопрос, можно ли адаптировать базовые идеи Джекобсона к такому подходу, который изначально является более квантовым, где само пространство возникает из волновой функции.

В многомировой интерпретации волновая функция — лишь абстрактный вектор, живущий в гильбертовом пространстве, математической конструкции с очень высокой размерностью. Обычно волновые функции делаются так: берется классический феномен, а затем квантуется, в результате чего мы сразу получаем средство для описания того явления, которое должна представлять волновая функция, то есть базовые составляющие этой волновой функции. Но в данном случае мы не можем позволить себе такой роскоши. У нас есть только само состояние и уравнение Шрёдингера. Мы абстрактно рассуждаем о «степенях свободы», но они не являются квантованной версией какой-либо очевидной классической величины. Они — квантовомеханические сущности, из которых проявляется и пространство-время, и все остальное. Джон Уилер любил говорить о «бытии из бита» («It from Bit»), предполагая, что физический мир (каким-то образом) возник из информации. Сегодня, когда пристальное внимание уделяется запутанности квантовых степеней свободы, принято говорить о «бытии из кубита» (It from Qubit).

Вновь обратимся к уравнению Шрёдингера и отметим, что, согласно этому уравнению, скорость изменения волновой функции во времени зависит от гамильтониана. Как вы помните, гамильтониан позволяет описать, сколько энергии содержится в системе, а также компактно выразить всю ее динамику. Стандартная черта гамильтониана в реальных условиях заключается в его динамической локальности — подсистемы взаимодействуют только с теми подсистемами, которые расположены поблизости, а не с теми, что находятся далеко. Взаимодействия могут распространяться в пространстве, но не быстрее скорости света. Итак, любое событие, происходящее в некоторый момент времени, воздействует только на то, что находится поблизости.

Учитывая, какую задачу мы перед собой поставили — определить, как из абстрактной квантовой волновой функции возникает

пространство, — мы не можем позволить себе начать с отдельных частей и разобраться в их взаимодействиях. Мы знаем, что означает «время» в данном контексте — оно, кстати, присутствует в уравнении Шрёдингера и обозначено буквой  $t$ , — но у нас нет частиц, или полей, или даже координат в трехмерном мире. Мы словно оказались в безвоздушном пространстве, и нам нужно найти кислород как и где угодно.

К счастью, именно в данном случае обратное проектирование работает весьма хорошо. Мы не будем начинать с отдельных компонентов системы и выяснять, как они взаимодействуют, а пойдем другим путем. Имея целостную систему (абстрактную волновую функцию) и ее гамильтониан, можем ли мы каким-либо разумным способом разложить ее на подсистемы? Все равно как если бы вы всю жизнь покупали нарезанный хлеб, а затем вам дали целую буханку. Можно представить множество способов ее нарезать, но есть ли среди них один, который явно лучше всех?

Да, есть, если мы считаем, что локальность — важное свойство окружающего мира. Можно решать эту задачу бит за битом, или кубит за кубитом, в любом темпе.

В общем виде квантовое состояние можно рассматривать как суперпозицию множества базисных состояний с определенной фиксированной энергией. (Точно так же, как произвольное спиновое состояние электрона можно рассматривать как суперпозицию электрона, который определенно имеет спин вверх, и электрона, который определенно имеет спин вниз.) Гамильтониан говорит нам, каково будет точное значение энергии для каждого возможного состояния с определенным значением энергии. Имея такой список всех возможных значений энергий, можно задать вопрос, подразумевает ли какой-то конкретный способ разделения волновой функции на подсистемы, что эти подсистемы взаимодействуют «локально».

Фактически при наличии случайного списка энергий мы не найдем способа разделить волновую функцию на локальные подсистемы, но при наличии подходящего гамильтониана такой способ будет ровно один. Требование, чтобы физика выглядела локально, подсказывает нам правильную совокупность степеней свободы, по которым можно разложить нашу квантовую систему.



Иными словами, нам не приходится начинать с набора фундаментальных первокирпичиков реальности, а потом складывать из них мир. Можно начать с мира и задать вопрос, существует ли способ, позволяющий представить мир в виде совокупности фундаментальных первокирпичиков. При наличии подходящего гамильтониана такой способ будет, и все имеющиеся у нас данные о мире, наше восприятие мира – все это подсказывает, что подходящий нам гамильтониан действительно существует. Легко вообразить возможные миры, где законы физики были бы совершенно не локальными. Но сложно представить, какова была бы жизнь в таком мире или была бы она в принципе возможна, ведь локальность физических взаимодействий помогает навести во Вселенной порядок.



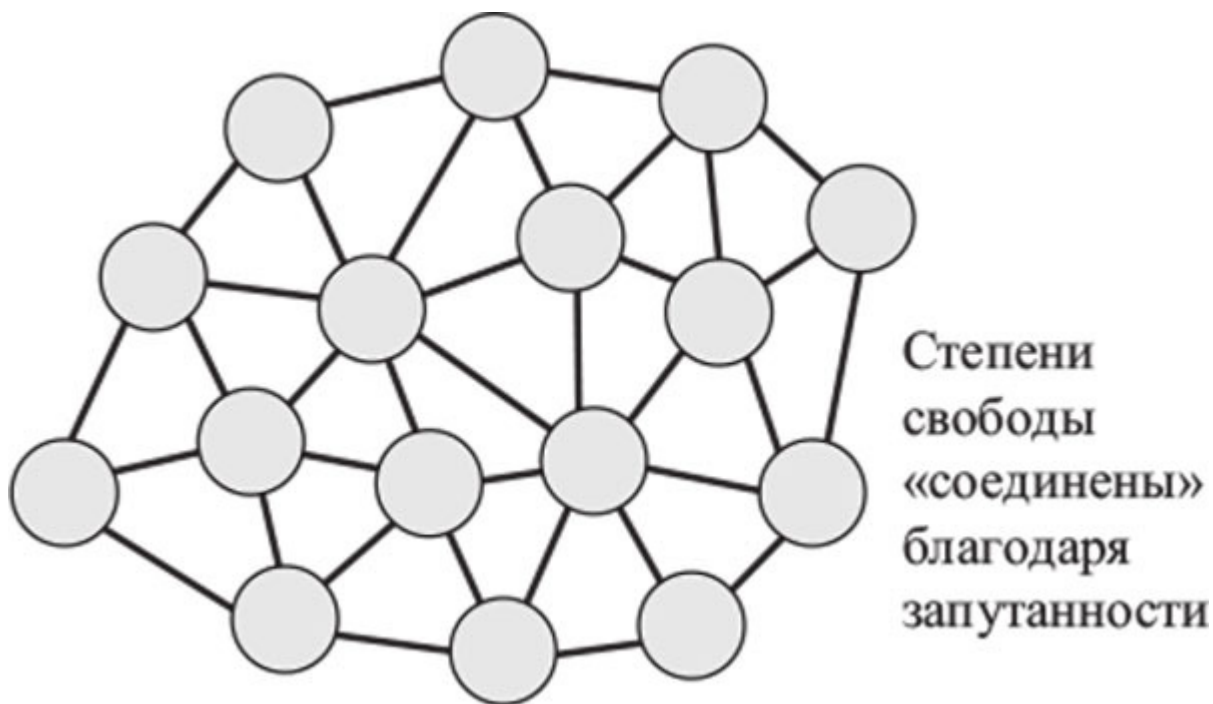
Возможно, перед нами постепенно начинает вырисовываться, как из волновой функции проявляется пространство. Когда мы говорим, что существует уникальный способ разделить нашу систему на степени свободы, которые локально взаимодействуют с соседними, мы на самом деле имеем в виду исключительно то, что каждая из степеней свободы взаимодействует лишь с небольшим количеством других степеней свободы. Понятия «локальный» и «ближайший» не навязаны нам изначально – они обусловлены тем, что эти взаимодействия очень особенные. Правильно говорить не о том, что «степени свободы взаимодействуют, только когда находятся поблизости друг от друга», а что «мы считаем две степени свободы ближними, если они взаимодействуют друг с другом, и дальними, если не взаимодействуют». Длинный список абстрактных степеней свободы связывается в сеть, где каждая степень свободы соединена с небольшим количеством других степеней свободы. Эта сеть образует «каркас», лежащий в основе самого пространства.

Это только начало, но мы и не будем этим ограничиваться. Например, если нас спрашивают, насколько далеко два города расположены друг от друга, то, как правило, ожидают более конкретного ответа, чем просто «далеко» или «близко». Необходимо точное расстояние, и именно его обычно позволяет вычислить метрика

пространства-времени. В нашей абстрактной волновой функции, разделенной на степени свободы, мы еще не построили полной геометрии, а только определили, что такое «далеко» и что такое «близко».

Мы можем добиться большего. Вспомните, за что интуитивно зацепился Джекобсон, изучая свойства вакуума квантовой теории поля, и что помогло ему вывести уравнение Эйнштейна: площадь поверхности пропорциональна энтропии той области, которую она охватывает. В текущем контексте, где квантовое состояние описывается в терминах абстрактных степеней свободы, мы не знаем, что может пониматься под «площадью». Но у нас есть запутанность между степенями свободы, и для любой совокупности таких степеней мы можем вычислить их энтропию.

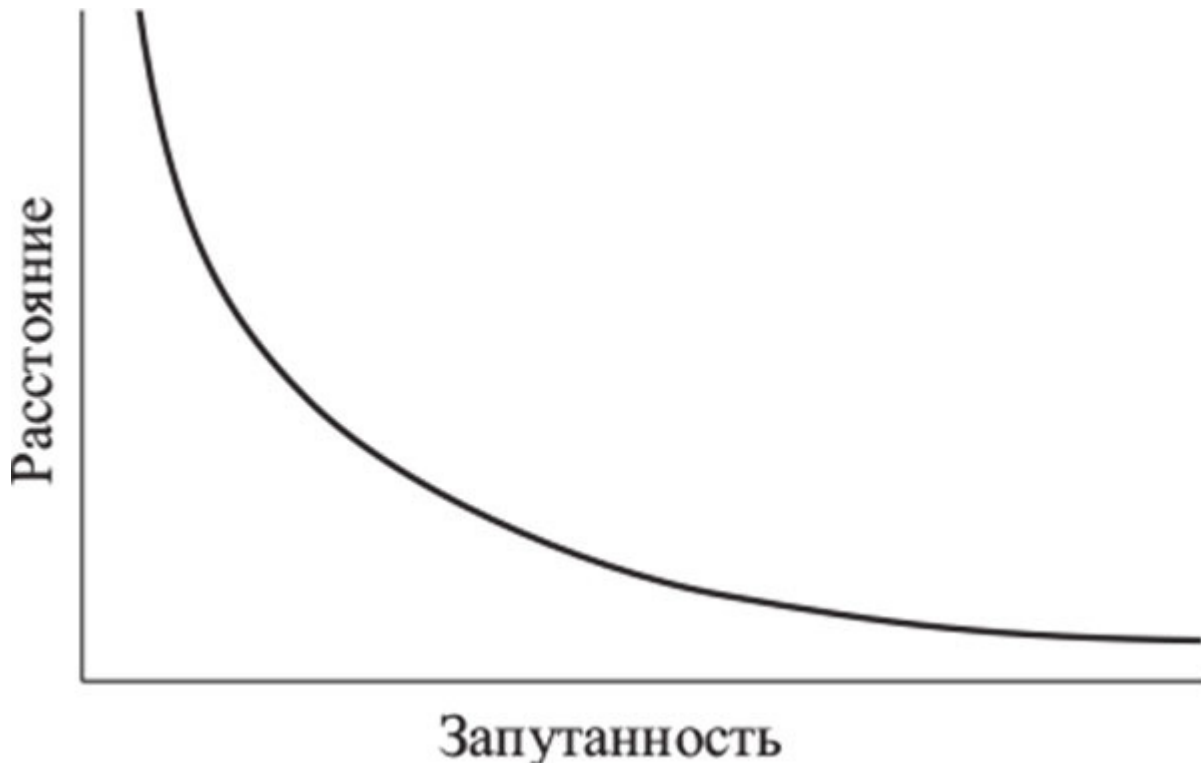
Итак, вновь вооружившись философией обратного проектирования, можно *определить*, что «площадь» совокупности степеней свободы должна быть пропорциональна ее энтропии запутанности. Фактически мы можем проделать это для любого возможного подмножества степеней свободы, приписывая некоторую площадь любой поверхности, которую мы можем вообразить и очертить в нашей сети. К счастью, математики давным-давно выяснили, что знания площади любых возможных поверхностей в некоторой области пространства достаточно для того, чтобы полностью определить ее геометрию; это полностью эквивалентно знанию метрики в любой точке. Иными словами, если: (1) знать, как запутаны наши степени свободы, и (2) постулировать, что энтропия любой совокупности степеней свободы задает площадь той области, что ограничивает эту совокупность, то можно в полной мере определить геометрию нашего проявляющегося пространства.



Можно описать эту конструкцию в эквивалентных, но чуть менее формальных терминах. Выберем две степени свободы в нашем пространстве-времени. Как правило, между ними должна обнаружиться некоторая запутанность. Если бы это были моды вибрирующих квантовых полей в состоянии вакуума, то мы бы точно знали, какова степень этой запутанности: она была бы высокой, если бы они располагались вблизи друг от друга, и низкой, если бы они находились далеко друг от друга. Теперь мы просто рассматриваем ситуацию с обратной точки зрения. Если степени свободы запутаны сильно, то мы *определяем* их как расположенные близко друг к другу, а чем дальше они друг от друга – тем меньше запутанность между ними. Пространственная метрика проявилась из структуры запутанности квантового состояния.

Такой подход несколько необычен, даже для физиков, поскольку мы привыкли мыслить в терминах частиц, движущихся в пространстве, а само пространство принимать как данность. Как мы знаем из мысленного эксперимента ЭПР, две частицы могут быть полностью запутаны независимо от того, насколько далеко они расположены друг от друга, – не существует прямой связи между удаленностью и запутанностью. Но здесь мы говорим не о частицах, а о степенях свободы тех фундаментальных составляющих, из которых складывается

само пространство. Они не запутаны каким-либо привычным образом, а сплетены как струны в очень специфическую структуру<sup>[24]</sup>.



Теперь можно воспользоваться уловкой Джекобсона, связывающей энтропию и площадь. Если мы знаем площадь любой поверхности в нашей сети, то знаем геометрию этой сети, а если знаем энтропию каждой области, то можем судить об энергии, заключенной в этой области. Я занимался проработкой этого подхода в статьях, опубликованных в период с 2016 по 2018 год совместно с моими коллегами Чунчжуном (Чарльзом) Као и Спиридоном Михалакисом. Очень схожие идеи исследовали Том Бэнкс, Уилли Фишлер, Стив Гиддингс и другие физики, готовые размышлять над идеей о том, что пространство-время не фундаментально, а проявляется из волновой функции.

Мы пока не обладаем достаточной уверенностью, чтобы просто сказать: «Да, эта эмерджентная геометрия в пространстве эволюционирует именно таким образом, что описывает пространство-время, подчиняющееся эйнштейновскому уравнению общей относительности». Это наша конечная цель, но мы ее пока не

достигли. Что мы можем сделать, так это составить список требований, при которых именно так все и происходит. Отдельные требования кажутся оправданными – например, что «на больших расстояниях физика выглядит как эффективная квантовая теория поля», – но многие другие до сих пор остаются недоказанными, и пока самые точные результаты можно получить лишь для ситуаций, где гравитационное поле относительно слабо. Пока у нас нет средств для описания черных дыр или Большого взрыва, но есть несколько многообещающих идей.

Такова жизнь физика-теоретика. У нас нет многих ответов, но давайте не будем упускать из виду нашу общую цель: начиная с абстрактной волновой функции, мы чертим дорожную карту возникновения пространства с геометрией, определяемой квантовой запутанностью, и похоже, что эта геометрия подчиняется динамическим законам общей теории относительности. В этой гипотезе столько допущений и подводных камней, что даже непонятно, с какого из них начинать. Но здесь вырисовывается весьма реальная перспектива, что путь к пониманию Вселенной лежит не через квантование гравитации, а через обнаружение гравитации в квантовой механике.



Возможно, вы заметили кое-какой дисбаланс в этих рассуждениях. Мы задавались вопросом, как пространство-время может возникнуть из запутанности, присущей квантовой гравитации. Но если быть честными, на самом деле мы смотрели только на то, как возникает пространство, а время воспринимали как должное, как нечто, что просто идет «в нагрузку». Возможно, такой подход совершенно оправдан. Хотя в теории относительности пространство и время трактуются как равноценные феномены, для квантовой механики это, как правило, несвойственно. В частности, в уравнении Шрёдингера время и пространство понимаются весьма по-разному: уравнение буквально описывает, как квантовое состояние меняется во времени. «Пространство» может входить или не входить в это уравнение в зависимости от того, какую систему мы рассматриваем, но время

фундаментально. Возможно, что симметрия между пространством и временем, известная нам из теории относительности, не встроена в квантовую гравитацию, а проявляется на уровне классического приближения.

Тем не менее крайне интересно, не является ли время, подобно пространству, эмерджентным феноменом, а не фундаментальным и может ли это быть как-то связано с запутанностью. Ответ на оба вопроса утвердительный, хотя детали в обоих случаях остаются несколько схематичными.

Если принять уравнение Шрёдингера безоговорочно, то представляется, что время является его фундаментальной составляющей. Действительно, из него прямо следует, что Вселенная бесконечно простирается в прошлое и будущее почти для всех квантовых состояний. Вы можете подумать, что это не сочетается с растиражированным мнением, что Вселенная началась с Большого взрыва, но на самом деле мы даже не уверены, что это мнение истинно. Это прогноз классической общей теории относительности, а не квантовой гравитации. Если квантовая гравитация работает согласно некоторой версии уравнения Шрёдингера, то почти для всех квантовых состояний время продолжается от минус бесконечности в прошлом до плюс бесконечности в будущем. Большой взрыв мог быть просто переходным этапом, а до него могла существовать бесконечно древняя Вселенная.

В этих выкладках делается оговорка «почти», так как существует одна лазейка. Согласно уравнению Шрёдингера, скорость изменения волновой функции зависит от того, сколько энергии в квантовой системе. Что, если мы имеем дело с системой, энергия которой строго равна нулю? Тогда, согласно уравнению, эта система вообще не изменяется, время в ней исчезает.

Первое, что приходит в голову – весьма маловероятно, чтобы энергия Вселенной была строго равна нулю, но общая теория относительности подсказывает, что не стоит быть столь категоричными. Естественно, кажется, что повсюду вокруг – сущности, обладающие энергией, это и звезды, и планеты, и межзвездное излучение, а также темная материя, темная энергия и так далее. Но если разобраться с математикой, то оказывается, что вклад в общую энергию Вселенной вносит и само гравитационное поле,

энергия которого, как правило, отрицательна. В замкнутой Вселенной, такой, которая смыкается сама с собой и приобретает компактную геометрию, как трехмерная сфера или тор, а не простирается в бесконечность, гравитационная энергия как раз гасит положительную энергию всех остальных физических существ. Энергия замкнутой Вселенной равна нулю независимо от того, что находится внутри этой Вселенной.

Это классическое утверждение, но есть и его квантовомеханический аналог, сформулированный Джоном Уилером и Брюсом Деви́ттом. Уравнение Уилера – Деви́тта просто сообщает, что Вселенная как функция времени вообще не меняется.

Это кажется безумным или как минимум вопиюще противоречит нашему повседневному опыту. Кажется, что Вселенная определенно меняется. В квантовой гравитации эту загадку называли *проблемой времени*, и, возможно, именно здесь нам может прийти на выручку феномен эмерджентного времени. Если квантовое состояние Вселенной подчиняется уравнению Уилера – Деви́тта (это возможно, но далеко не наверняка), то время должно быть эмерджентным, а не фундаментальным.

Одно из возможных объяснений такого устройства предложили Дон Пейдж и Уильям Вуттерс в 1983 году. Представьте себе квантовую систему, которая состоит из двух частей: 1) часов и 2) всей остальной Вселенной. Представьте, что и часы, и вся остальная система эволюционируют во времени как обычно. Теперь будем делать снимки квантового состояния с регулярными интервалами, например каждую секунду или раз в планковскую единицу времени. На каждом таком снимке квантовое состояние описывает часы, показывающие определенное время, и остальную систему в той конфигурации, в которой она находилась в тот момент. Так у нас набирается коллекция мгновенных квантовых состояний системы.

Самое классное в квантовых состояниях – возможность напрямую их складывать (в виде суперпозиций), получая новые состояния. Итак, давайте соберем новое квантовое состояние, сложив все наши мгновенные снимки. Это новое квантовое состояние не развивается во времени: оно просто существует в том виде, в каком мы собрали его вручную. Часы не показывают никакого конкретного времени, а

находятся в суперпозиции всех моментов времени, в которые делались эти снимки. Не слишком похоже на наш мир.

Но здесь есть один нюанс: внутри этой суперпозиции всех мгновенных снимков состояние часов запутано с состоянием остальной системы. Если мы пронаблюдаем состояние часов и увидим, что они показывают конкретное время, то оставшаяся часть Вселенной окажется зафиксирована именно в том состоянии, в котором оказалась наша исходная система именно в тот момент времени:

$$\begin{aligned}\Psi &= (\text{система в момент } t = 0, \text{ часы} = 0) \\ &+ (\text{система в момент } t = 1, \text{ часы} = 1) \\ &+ (\text{система в момент } t = 2, \text{ часы} = 2) \\ &+ \dots\end{aligned}$$

Иными словами, «на самом деле» в состоянии суперпозиции нет времени, это состояние полностью статично. Но из-за запутанности возникает взаимосвязь того, что показывают часы, и того, что происходит во всей остальной Вселенной. Причем состояние остальной Вселенной оказывается в точности таким, как если бы она развивалась из исходного состояния с течением времени. Мы заменили фундаментальный феномен «время» на формулировку «то, что показывают часы в этой части общей квантовой суперпозиции». Таким образом, время проявилось из статического состояния благодаря «магии» запутанности.

Остается невыясненным, на самом ли деле энергия Вселенной равна нулю и, следовательно, время эмерджентно или же она не равна нулю, и тогда время фундаментально. В нынешней ситуации целесообразно считать оба варианта возможными и исследовать как первый, так и второй.



## **За пределами пространства и времени**

### ***Голография, черные дыры и пределы локальности***

До своей смерти в 2018 году Стивен Хокинг был самым известным из ныне живущих ученых с хорошим отрывом от конкурентов. Такой известностью он пользовался совершенно заслуженно – Хокинг не только был харизматичной и влиятельной публичной фигурой с вдохновляющей биографией, но и сделал невероятно значительный вклад в науку.

Величайшее достижение Хокинга заключалось в том, что ему удалось продемонстрировать, что с учетом эффектов квантовой гравитации черные дыры оказываются «не такими уж черными», как он любил говаривать. На самом деле черная дыра непрерывно испускает в пространство частицы, и эти частицы уносят ее энергию, вследствие чего черная дыра уменьшается в размерах. Осознание этого факта привело одновременно и к глубоким открытиям (у черных дыр есть энтропия), и к неожиданным загадкам (куда уходит информация, когда черная дыра сначала образуется, а затем испаряется?).

Черные дыры испускают излучение. Причем, те выводы, которые следуют из этой удивительной идеи, – наилучшая из имеющихся у нас подсказок о природе квантовой гравитации. Не подумайте, что Хокинг соорудил сначала полную теорию квантовой гравитации, а затем, воспользовавшись ею, продемонстрировал, что черные дыры излучают. Нет, он применил разумное приближение, считая само пространство-время классическим и расположив поверх него динамические квантовые поля. Тем не менее мы надеемся, что такое приближение вполне справедливо. Хотя некоторые загадочные аспекты, обнаруженные Хокингом, заставляют в этом усомниться. Через сорок пять лет после публикации первой статьи Хокинга на эту тему попытки осмыслить излучение черных дыр остаются одним из самых активных направлений в современной теоретической физике.

Тогда как до решения этой задачи еще далеко, один вывод кажется ясным: простая картина, которую мы набросали в предыдущей главе и согласно которой пространство появляется из набора запутанных ближайших степеней свободы, — это, вероятно, еще не вся история. Это очень хорошая история, и, наверное, она хороша в качестве исходной позиции для создания теории квантовой гравитации. Но она слишком серьезно полагается на идею локальности — все, что происходит в некоторой точке пространства, может непосредственно воздействовать лишь на точки, расположенные в непосредственной близости. Черные дыры, насколько мы их понимаем, указывают на то, что природа устроена тоньше. В некоторых ситуациях мир выглядит как совокупность степеней свободы, взаимодействующих только со своими ближайшими соседями, но когда гравитация усиливается, эта простая картина рассыпается. Тогда степени свободы не распределяются в пространстве, а «втискиваются» на общую поверхность, и «пространство» оказывается лишь голографической проекцией информации, содержащейся внутри черной дыры.

Безусловно, локальность играет важную роль в нашей повседневной жизни, но представляется, что фундаментальная природа реальности не сводится к тем явлениям, которые обладают конкретными координатами в пространстве. Опять же, здесь нам снова может помочь многомировая интерпретация квантовой механики. При других подходах пространство принимается как данность и вся работа ведется в контексте пространства. Но эвереттовская философия, центральное место в которой отводится волновой функции, позволяет признать, что пространство может выглядеть принципиально по-разному в зависимости от того, с какой точки зрения мы его рассматриваем, а может и вообще оказаться концептуально бесполезным. Физики по-прежнему сражаются со следствиями, вытекающими из этой идеи, но она уже успела привести нас к некоторым любопытным результатам.



В общей теории относительности черная дыра — это область пространства-времени, которая искривлена настолько сильно, что оттуда ничего не может вырваться, даже свет. Граница черной дыры,

отделяющая ее от внешнего мира, называется *горизонтом событий*. Согласно классической теории относительности, площадь горизонта событий может только увеличиваться, черные дыры растут по мере того, как в них попадают материя и энергия, но не могут сбрасывать свою массу в окружающий мир.

До 1974 года все считали, что в природе так все и устроено, пока Хокинг не объявил, что квантовая механика все меняет. При наличии квантовых полей черные дыры должны естественным образом испускать частицы в окружающую среду. Эти частицы образуют спектр абсолютно черного тела, поэтому у каждой черной дыры есть температура: сравнительно массивные черные дыры холоднее, тогда как очень маленькие черные дыры невероятно горячие. Формула для вычисления температуры излучения черной дыры высечена на могильном камне Хокинга в Вестминстерском аббатстве.

Частицы, излучаемые черной дырой, уносят с собой энергию, из-за чего черная дыра постепенно теряет массу и наконец полностью испаряется. Хотя было бы неплохо зафиксировать излучение Хокинга в телескоп, этого не удастся сделать ни с одной из известных нам черных дыр. Хокинговская температура черной дыры, сравнимой по массе с Солнцем, составит около 0,00000006 кельвина. Любой подобный сигнал не будет виден на фоне других источников, например таких, как реликтовое микроволновое излучение, отголосок Большого взрыва; температура этого излучения составляет 2,7 кельвина. Даже если бы такая черная дыра совершенно не росла за счет аккреции материи и энергии, потребовалось бы около  $10^{67}$  лет, чтобы она полностью испарилась.

Есть стандартная история, которую рассказывают в ответ на вопрос, почему черные дыры излучают. Я ее рассказываю, Хокинг ее рассказывал, все ее рассказывают. История такова: согласно квантовой теории поля, вакуум напоминает булькающее варево из частиц, которые возникают и сразу же исчезают, как правило, парами, и каждая такая пара состоит из частицы и античастицы. Обычно мы этого не замечаем, но поблизости от горизонта событий черной дыры одна из этих частиц может свалиться в черную дыру и никогда уже не выбраться оттуда, а другая частица улетает в окружающий мир. Тому, кто наблюдает за этим издали, будет казаться, что ускользнувшая частица обладает положительной энергией, поэтому для достижения

равновесия та частица, что упала в черную дыру, должна иметь отрицательную энергию. Поглощая такие частицы с отрицательной энергией одну за другой, черная дыра постепенно теряет массу.

С эвереттовской точки зрения, согласно которой первична волновая функция, можно описать этот процесс еще точнее. История с появлением и исчезновением частиц – наглядная метафора, помогающая интуитивно понять физику этого процесса. Но на самом деле у нас есть только квантовая волновая функция полей, расположенных поблизости от черной дыры. Причем эта волновая функция не статична: она эволюционирует, в данном случае давая чуть уменьшившуюся черную дыру и частицы, разлетающиеся от нее во все стороны. Ситуация вполне схожа с процессами, происходящими в атоме: электроны, имея небольшой избыток энергии, перескакивают в состояния с более низкой энергией, излучая при этом фотоны. Разница только в том, что атом в конце концов достигает состояния с наименьшей возможной энергией и остается в нем, тогда как черная дыра (насколько мы понимаем) просто испаряется без остатка, в последний момент взрываясь, давая вспышку высокоэнергетических частиц.

Хокинг изложил идею об излучении черных дыр с их последующим испарением, пользуясь методами традиционной квантовой теории поля, но в контексте искривленного пространства-времени из общей теории относительности, а не в контексте физики частиц, где гравитация не учитывается. Результат Хокинга не является сугубо квантово-гравитационным, само пространство-время здесь трактуется с классической точки зрения, а не как часть волновой функции. Однако этот сценарий, по-видимому, вполне понятен и без глубоких знаний квантовой гравитации. Насколько известно физикам, излучение Хокинга – устойчивый феномен. Иными словами, везде, где мы усматриваем квантовую гравитацию, должны воспроизводиться результаты Хокинга.

Здесь возникает проблема, которая получила печальную известность в среде физиков-теоретиков как «информационный парадокс черных дыр». Как вы помните, квантовая механика в многомировой интерпретации – детерминированная теория. Случайный компонент в ней только кажущийся, он возникает из-за неопределенности самолокализации, когда волновая функция ветвится, и мы не знаем, в

которой из веток оказались. Но, по расчетам Хокинга, изучение черных дыр не является детерминированным: оно полностью случайно, даже без какого-либо ветвления. Если исходить из точного квантового состояния, описывающего материю, которая коллапсирует и образует черную дыру, не существует способа, который позволил бы точно вычислить квантовое состояние излучения, испускаемого черной дырой. По-видимому, информация, описывающая исходное состояние, теряется.

Предположим, вы взяли книгу – например ту, что сейчас читаете, – бросили ее в огонь и дождались, пока она полностью сгорит. (Не волнуйтесь, всегда можно купить новую.) Может показаться, что информация, содержащаяся в книге, утрачена в пламени. Но если воспользоваться имеющейся у физиков сверхспособностью и поставить мысленный эксперимент, то становится понятно, что эта потеря только кажущаяся. В принципе, если бы мы могли перехватить каждый фотон, всю теплоту, каждую пылинку и пепел, поднявшиеся с этого костра, а также в совершенстве знали законы физики, то могли бы реконструировать все, что попало в огонь, в том числе все слова со страниц книги. В реальном мире такого никогда не произойдет, но физика говорит, что это возможно.

Большинство физиков полагают, что именно так и должны быть устроены черные дыры: бросаешь туда книгу, и вся информация, что была на ее страницах, должна оказаться зашифрована в излучении, испускаемом черной дырой. Однако, согласно хокинговской теории излучения черных дыр, происходит нечто иное: информация, попадающая в черную дыру, по-настоящему уничтожается.

Конечно, вполне возможно, что это предположение верно и что испарение черной дыры совершенно не похоже на обычный костер. В любом случае не похоже, чтобы мы могли это как-то проверить – тем или иным образом. Но большинство физиков считают, что информация сохраняется и что на самом деле она как-то выходит из черной дыры. Они подозревают, что секрет может быть раскрыт, когда мы лучше поймем квантовую гравитацию.

Это легче сказать, чем сделать. Одно из представлений о том, почему черные дыры, собственно, черны, связано с тем, что для выхода из черной дыры необходимо иметь возможность двигаться со сверхсветовой скоростью. Данная проблема не касается хокинговского

излучения, так как оно возникает непосредственно перед горизонтом событий, а не в глубинах черной дыры. Но любая книга, которую мы бросим в черную дыру, улетит прямо в ее недра вместе со всей информацией. Можно спросить, а не копируется ли эта информация каким-то образом и не уносится ли вместе с излучением, пока книга падает за горизонт событий. К сожалению, это противоречит базовым принципам квантовой механики: существует так называемая *теорема о запрете клонирования*, согласно которой невозможно скопировать квантовую информацию, не уничтожив ее исходный экземпляр.



Другая возможность, по-видимому, заключается в том, что книга падает все глубже, но когда она достигает сингулярности в недрах черной дыры, вся информация из нее каким-то образом переносится в излучение, исходящее с горизонта событий. К сожалению, такой процесс требует сверхсветовой коммуникации. Либо, что эквивалентно – динамической нелокальности, когда события в одной точке немедленно влияют на события, происходящие очень далеко. Именно такая нелокальность невозможна, согласно обычным правилам квантовой теории поля. В этом кроется ключ к разгадке: правила квантовой теории необходимо кардинально пересмотреть, как только в игру вступает квантовая гравитация<sup>[25]</sup>.

Предположение Хокинга о том, что черные дыры испускают излучение, не возникло из ниоткуда. Оно было выдвинуто в ответ на гипотезу Якова Бекенштейна, который в те времена также был аспирантом Джона Уилера в Принстоне, о том, что у черных дыр должна быть энтропия.

Одно из обоснований идеи Бекенштейна заключалось в том факте, что, согласно классической общей теории относительности, площадь горизонта событий черной дыры ни при каких условиях не может уменьшаться. Эта формулировка подозрительно напоминает второй закон термодинамики, согласно которому энтропия замкнутой системы не может уменьшаться ни в коем случае. Физики, вдохновившись этим сходством, тщательно сформулировали аналогию между законами термодинамики и свойствами черных дыр, и, согласно этой аналогии, масса черной дыры подобна энергии термодинамической системы, а площадь горизонта событий подобна энтропии.

Бекенштейн предположил, что это более чем аналогия. Площадь горизонта событий не просто *подобна* энтропии, это и *есть* энтропия черной дыры, или она как минимум пропорциональна энтропии. Хокинг и другие физики сначала приняли эту гипотезу в штыки – ведь если у черной дыры есть энтропия, как у обычной термодинамической системы, то у нее должна быть и температура, а значит, и излучение! Хокинг, вначале намеревавшийся развенчать это смехотворное утверждение, в итоге показал, что оно совершенно верное. В настоящее время энтропия черной дыры называется энтропией *Бекенштейна – Хокинга*.

Одна из причин, по которым этот результат кажется столь провокационным, заключается в следующем: с классической точки зрения кажется, что у черных дыр нет никакой энтропии. Это просто области пустого пространства. Энтропия возникает в системе, образованной из атомов или других крошечных составляющих, которые можно упорядочивать множеством разных способов, не изменяя при этом внешнего вида системы на макроуровне. Каковы должны быть подобные составляющие черной дыры? Предполагается, что ответ даст квантовая механика.

Естественно предположить, что энтропия черной дыры Бекенштейна – Хокинга – это разновидность энтропии запутанности. Внутри черной

дыры существуют определенные степени свободы, и они запутаны с внешним миром. Что же они собой представляют?

На первый взгляд можно предположить, что эти степени свободы – просто моды колебаний квантовых полей внутри черной дыры. С такой точкой зрения возникает пара проблем. Во-первых, согласно квантовой теории поля, реальный ответ на вопрос о том, какова энтропия области пространства, – «бесконечная». Мы можем добиться конечного числа, если решим игнорировать часть мод – те, что возникают на самых малых длинах волн, но в данном случае приходится произвольно обрезать часть энергий колебаний рассматриваемого квантового поля. Энтропия Бекенштейна – Хокинга, в свою очередь, выражается конечным числом, и точка. Во-вторых, энтропия запутанности в теории поля должна точно зависеть от того, сколько полей в нее включено – электроны, кварки, нейтрино и так далее. Формула энтропии черной дыры, выведенная Хокингом, вообще не содержит таких составляющих.

Если мы можем просто связать энтропию черной дыры с квантовыми полями, живущими внутри нее, то в качестве альтернативы можно предположить, что само пространство-время состоит из квантовых степеней свободы и формула Бекенштейна – Хокинга характеризует запутанность между степенями свободы внутри черной дыры и степенями свободы вне ее. Если это звучит слишком расплывчато, то лишь потому, что так оно и есть. Мы не вполне понимаем, что представляют собой степени свободы пространства-времени или как они друг с другом взаимодействуют. Но общие принципы квантовой механики все равно должны соблюдаться. Если существует энтропия и эта энтропия возникает из-за запутанности, то должны быть степени свободы, которые могут запутываться с остальной частью мира самыми разными способами, даже если с классической точки зрения черная дыра совершенно безлика.

Если так все и есть, то количество степеней свободы в черной дыре не бесконечно, но в самом деле очень велико. В центре нашей галактики Млечный Путь расположена сверхмассивная черная дыра, с которой связан радиоисточник Стрелец А\*. Наблюдая за вращением звезд вокруг этой черной дыры, можно измерить ее массу: она составляет 4 миллиона солнечных масс. Эта величина соответствует



энтропии  $10^{90}$ , что превышает энтропию всех известных частиц в наблюдаемой части Вселенной. Количество степеней свободы в квантовой системе должно быть как минимум равным ее энтропии, поскольку энтропия обусловлена именно этими степенями свободы, запутанными с внешним миром. Таким образом, в этой черной дыре должно быть не менее  $10^{90}$  степеней свободы.

Тогда как мы обычно уделяем внимание видимой материи, которую наблюдаем во Вселенной – веществу, излучению и так далее, – почти все квантовые степени свободы Вселенной невидимы, и вся их роль заключается в сшивании пространства-времени воедино. В объеме пространства, сопоставимом с размерами взрослого человека, должно быть как минимум  $10^{70}$  степеней свободы: нам это известно, поскольку такова была бы энтропия черной дыры, занимающей подобный объем. Но в теле человека всего около  $10^{28}$  частиц.

Можно считать, что каждая частица – это «включенная» степень свободы, тогда как все остальные степени свободы спокойно «отключены» в состоянии вакуума. С точки зрения квантовой теории поля человек или вещество в центре звезды почти не отличаются от вакуума.



Может быть, тот факт, что энтропия черной дыры пропорциональна ее площади, – как раз то, чего и следовало ожидать. В квантовой теории поля естественно, что область пространства обладает энтропией, пропорциональной площади границы этой области, а черная дыра – просто область пространства. Но проблема кроется чуть глубже. Тот факт, что энтропия пропорциональна площади границы, характерен для области, находящейся *в состоянии вакуума*. Но черная дыра не является частью вакуумного состояния, там именно черная дыра, и пространство-время существенно искривлено.

У черных дыр есть весьма примечательное свойство: они представляют собой состояния с *наивысшей энтропией*, которой может обладать область пространства заданного размера. Этот провокационный факт был впервые замечен Бекенштейном, а потом

уточнен Рафаэлем Буссо. Если взять за основу регион в состоянии вакуума, а затем пытаться увеличивать его энтропию, то придется увеличивать и его энергию. (Поскольку мы начинали с вакуума, энергия в данном случае может только расти.) Итак, вместе с энтропией увеличивается и энергия. В конце концов, в фиксированную область пространства у вас будет закачено настолько много энергии, что этой области ничего не останется, кроме как схлопнуться в черную дыру. Это предел. Вы не сможете представить область пространства с еще большей энтропией, чем область, в которой уже находится черная дыра.

Такой вывод принципиально отличается от того, чего мы могли бы ожидать в рамках обычной квантовой теории поля, не учитывающей гравитацию. В обычной теории нет предела энтропии, уместящейся в конкретном регионе, так как нет и предела энергии, которую можно закачать в область пространства. Все потому, что квантовая теория поля предполагает наличие бесконечного множества степеней свободы, даже в области конечного размера.

По-видимому, с гравитацией все иначе. Существует максимальная энергия и максимальная энтропия, способные уместиться в конкретной области, что, по-видимому, подразумевает, что в этой области есть лишь конечное число степеней свободы. Каким-то образом эти степени свободы запутываются именно таким подходящим образом, что из них складывается геометрия пространства-времени. Это касается не только черных дыр: для каждой области пространства-времени существует некоторое максимальное значение энтропии (это энтропия, которую имела бы черная дыра данного конкретного размера) и, следовательно, эта область имеет конечное количество степеней свободы. Это верно даже для Вселенной в целом: из-за наличия энергии вакуума пространство расширяется с ускорением, а значит, вокруг нас есть горизонт, который очерчивает протяженность наблюдаемой части космоса. В данной наблюдаемой части космоса существует максимальная конечная энтропия, поэтому для описания всего, что мы видим и когда-либо увидим, требуется конечное число степеней свободы.

Если эта линия рассуждений верна, то из нее немедленно проистекает одно глубокое следствие для многомировой интерпретации квантовой механики. Конечное число степеней

свободы подразумевает существование конечномерного гильбертова пространства для системы в целом (в данном случае – для любой выбранной нами области пространства). Это, в свою очередь, означает, что количество веток волновой функции конечно. Вот почему еще в главе 8 Алиса осторожно высказывалась по поводу того, «бесконечно» ли количество миров в волновой функции. Во многих простых квантовомеханических моделях, в том числе в той, где фиксированный набор частиц равномерно движется в пространстве, а также в обычной квантовой теории поля гильбертово пространство является бесконечномерным, а потому и количество миров может быть потенциально бесконечным. Но гравитация, по-видимому, кардинально меняет эту картину. Она отменяет существование большинства этих миров, поскольку в них слишком много энергии оказалось бы сосредоточено в каждой одной локальной области пространства.

Поэтому вполне вероятно, что в реальной Вселенной, где определено существует гравитация, эвереттовская квантовая механика описывает конечное количество миров. И это количество, упомянутое Алисой в связи с размерностью гильбертова пространства, равно.

Теперь понятно, откуда взялось это число: оно получается в результате вычисления энтропии, которой будет обладать наблюдаемая нами часть Вселенной, когда значение энтропии в ней достигнет максимума. В таком случае, действуя в обратном направлении, можно вычислить, насколько велико должно быть гильбертово пространство, чтобы уместить такое количество энтропии. (Размер наблюдаемой части Вселенной зависит от энергии вакуума, поэтому степень  $10^{122}$  является соотношением между планковскими масштабами и космологической постоянной, о которой шла речь в главе 12.) Мы не можем быть абсолютно уверены в базовых принципах квантовой гравитации, чтобы утверждать, что существует лишь конечное количество эвереттовских миров, но такая предельность их количества кажется разумной. По крайней мере, это многое бы упростило.



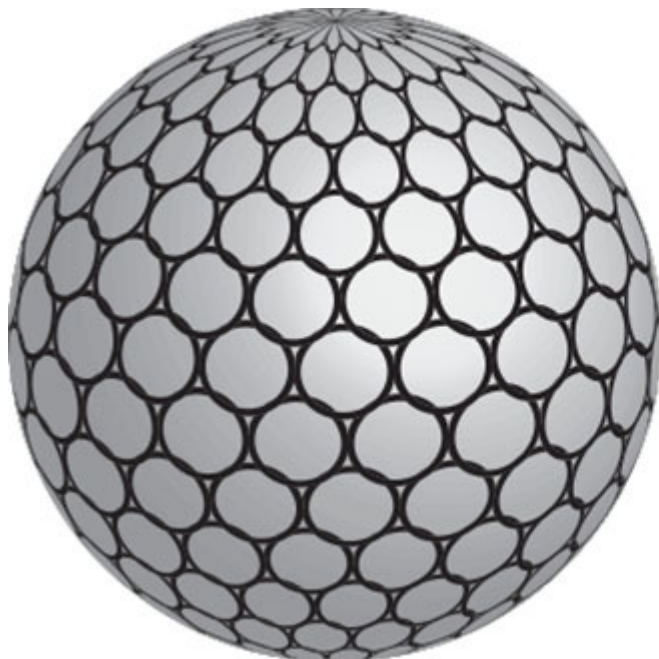
Природа черных дыр, связанная с максимальной энтропией, тоже имеет важные следствия для квантовой гравитации. В классической общей теории относительности недра черной дыры, расположенные между горизонтом событий и сингулярностью, не выделяются ничем особенным. Там есть гравитационное поле, но в остальном для объекта, падающего в черную дыру, эта область выглядит как пустое пространство. Согласно трактовке, приведенной нами в последней главе, квантовая версия «пустого пространства» аналогична «совокупности степеней свободы пространства-времени, запутанных друг с другом таким образом, что из них возникает трехмерная геометрия». В данном описании подразумевается, что степени свободы более или менее равномерно распределены во всем объеме наблюдаемого нами пространства. Если бы так и было, то состояние с максимумом энтропии в такой форме предполагало бы запутанность всех этих степеней свободы с внешним миром. Следовательно, энтропия была бы пропорциональна объему области, а не площади ее границы. Что же случилось?

Здесь нам поможет подсказка, связанная с информационным парадоксом черных дыр. Проблема в том, что не существует очевидного способа передать информацию из упавшей в черную дыру книги в льющееся с горизонта событий излучение Хокинга, по крайней мере если сигналы движутся не быстрее, чем со скоростью света. Поэтому возникает следующая безумная идея: может быть, вся информация о состоянии черной дыры, ее «недрах» и горизонте — может существовать на самом горизонте, а не лежать где-то в глубине. Тогда состояние черной дыры в некотором смысле «живет» на двумерной поверхности, а не распределено во всем ее трехмерном объеме.

Эта идея была впервые разработана Герардом т'Хоофтом и Леонардом Сасскиндом в 1990-х годах и основывалась на статье Чарльза Торна, написанной в 1978 году. Она известна под названием «голографический принцип». В обычной голограмме свет падает на двумерную поверхность и выстраивается в трехмерное изображение.

В соответствии с голографическим принципом явно трехмерные недра черной дыры отражают информацию, закодированную на двумерной поверхности горизонта событий. Если это правда, то, может быть, не так уж сложно получить информацию из черной дыры, считав

эти данные из ее излучения, поскольку эта информация всегда будет находиться на горизонте событий.



Информация,  
содержащаяся в черной дыре,  
голографически закодирована  
на горизонте событий

Физики по-прежнему не пришли к общему мнению о точном значении голографического принципа применительно к реальным черным дырам. Это просто способ подсчета количества степеней свободы или следует считать, что это полноценная теория, описывающая горизонт событий и физику черной дыры? Мы этого не знаем, но есть другой контекст, в котором голография весьма точна: речь о гипотезе *AdS/CFT-дуальности*, предложенной Хуаном Малдасеной в 1997 году. AdS в данной аббревиатуре означает «пространство анти-де Ситтера» — гипотетическое пространство-время, в котором нет никаких источников материи, кроме отрицательной энергии вакуума (в противоположность положительной энергии вакуума нашего реального мира). CFT в данном случае означает «конформная теория поля». Это особая разновидность квантовой теории поля, которая может быть определена на бесконечно далекой границе AdS. Согласно Малдасене, эти две теории неявно эквивалентны друг другу. Эта мысль исключительно провокационна, и вот по каким причинам. Во-первых, AdS-теория содержит гравитацию, тогда как CFT — это обычная теория поля, в которой никакой

гравитации нет. Во-вторых, размерность границы пространства-времени меньше, чем у самого пространства-времени. Например, если рассматривать теорию о четырехмерном пространстве AdS, то она будет эквивалентна трехмерной конформной теории поля. Сложно представить более яркий пример голографии в действии.

Чтобы обсудить детали AdS/CFT-соответствия, потребовалось бы написать отдельную книгу. Но стоит отметить, что в настоящее время ведется множество исследований, посвященных связи между геометрией пространства-времени и квантовой запутанностью. Как отмечали Шинсей Рю, Тадаши Такаянаги, Марк ван Раамсдонк, Брайан Свингл и другие в начале 2000-х, существует непосредственная связь между запутанностью в граничной CFT и результирующей геометрией пространства AdS. Поскольку AdS/CFT относительно хорошо определены на уровне моделей квантовой гравитации, стремление понять эту связь является темой активных исследований, ведущихся на протяжении нескольких последних лет.

Увы, все это не касается реального мира. Все самое интересное, что связано с AdS/CFT, касается соотнесения компонентов внутренней структуры, где действует гравитация, с граничными компонентами, где гравитация отсутствует. Но существование границы – очень специфичная черта пространства анти-де Ситтера, что требует существования отрицательной энергии вакуума. А наша Вселенная, по-видимому, обладает положительной, а не отрицательной энергией вакуума.

Есть старый анекдот о пьянице, который ищет под уличным фонарем потерянные ключи. Прохожий спрашивает его, уверен ли он, что потерял ключи именно здесь, на что пьяница отвечает: «Нет, я потерял их где-то в другом месте, но здесь так хорошо видно!» В игре с квантовой гравитацией AdS/CFT-соответствие – это ярчайший в мире фонарь. Изучая эту теорию, удалось открыть множество увлекательных концепций, которые оказались полезны для физиков-теоретиков, но нет способа, который позволил бы с помощью этих знаний напрямую объяснить, почему яблоки падают с деревьев или любые другие аспекты гравитации в окружающем нас пространстве. Стоит продолжать поиски, но важно не упускать из виду нашей цели: понять тот мир, в котором мы живем.



Следствия голографического принципа для черных дыр, реально существующих в нашем мире, не столь очевидны, как в воображаемом AdS/CFT-мире. Утверждаем ли мы, что общая теория относительности совершенно неверно трактует природу недр черной дыры (и на самом деле черная дыра не пустая) и что на самом деле наблюдатель, падающий в черную дыру, врежется в голографическую поверхность прямо на горизонте событий? Нет, мы этого не утверждаем – ну, по крайней мере, этого не утверждают большинство приверженцев голографического принципа. На самом деле они апеллируют к родственной и не менее поразительной идее, которая называется *комплементарностью черных дыр*. Эта идея была выдвинута Сасскиндом и другими учеными, при этом авторы идеи намеренно пользовались терминологией, которая напоминает о боровской философии квантового измерения.

Версия комплементарности, касающаяся черных дыр, указывает, что на самом деле все устроено несколько тоньше, чем «черная дыра напоминает обычный вакуум» или «вся информация о черной дыре закодирована на горизонте событий». Фактически оба эти утверждения верны, но нельзя говорить в одном контексте сразу и о первом, и о втором. Либо, как предпочел бы выразиться физик, два эти утверждения не кажутся одновременно верными любому конкретному наблюдателю. С точки зрения наблюдателя, падающего за горизонт событий, черная дыра выглядит как обычный вакуум, а наблюдателю, находящемуся вдали от черной дыры, вся информация кажется рассредоточенной по горизонту событий.

Даже при том, что такие свойства являются фундаментально квантовомеханическими, можно сказать, что ранее был известен их аналог в классической физике. Подумайте, что происходит с книгой (или звездой, или чем угодно) при попадании в черную дыру, если рассматривать ситуацию с точки зрения классической общей теории относительности. Книге «кажется», что она падает прямо в глубины дыры. Но рядом с горизонтом событий происходит сильное искривление пространства-времени, поэтому, с точки зрения внешнего наблюдателя, все будет иначе. Он увидит, что книга постепенно

замедляется, приближаясь к горизонту событий, по пути краснеет и тускнеет. Наблюдатель даже не увидит, как книга пересечет горизонт событий: ему будет казаться, что книга просто застыла, а не упала в дыру. Исходя из этого, физики разработали представление, именуемое *мембранной парадигмой*, согласно которому можно смоделировать физические свойства черной дыры, вообразив, что на ее горизонте событий находится мембрана, для которой можно вычислить определенные физические характеристики, например температуру и электрическую проводимость. Изначально мембранная парадигма считалась удобным упрощением, позволяющим облегчить вычисления, связанные с черными дырами. Но комплементарность постулирует, что сторонние наблюдатели действительно видят черную дыру таким образом, как будто там, где должен находиться горизонт событий, она представляет собой вибрирующую квантовую мембрану.

Если вы привыкли считать пространство-время фундаментальным феноменом, то такая картина может показаться вам совершенно бессмысленной. У пространства-времени есть определенная геометрия и больше ничего. Но с квантовомеханической точки зрения это совершенно правдоподобно: существует волновая функция Вселенной, и различные наблюдения могут давать разные результаты относительно ее характеристик. С тем же успехом можно сказать, что количество частиц в некотором состоянии зависит от того, как его наблюдают.

Мир – это квантовое состояние, эволюционирующее в гильбертовом пространстве, и физическое пространство проявляется из него. Не следует удивляться тому, что в одном и том же квантовом состоянии возможны разные представления положения и локальности в зависимости от того, какие наблюдения мы над ним осуществляем. Согласно идее комплементарности черных дыр, не имеют смысла вопросы «Какова геометрия пространства-времени?» или «Где находятся степени свободы?», но возможны вопросы о том, каково квантовое состояние или что видит конкретный наблюдатель.

Эта картина отличается от рассмотренной нами в предыдущей главе, где степени свободы были распределены в сети, заполняющей пространство, и, запутываясь, определяли эмерджентную геометрию. Но та картина применима лишь в условиях слабой гравитации, и черные дыры в нее определенно не вписываются. С точки зрения,



представленной в данной главе, все равно можно говорить об абстрактных степенях свободы, которые, объединяясь, образуют пространство-время, но «где они находятся» зависит от того, как их наблюдают. Само пространство не фундаментально — это просто удобная концепция для рассуждения с определенных точек зрения.



Надеюсь, в этих последних главах мне удалось донести, какие важные следствия может иметь многомировая интерпретация в контексте давней проблемы квантовой гравитации. Честно говоря, многие физики, занимающиеся этими проблемами, не считают, что пользуются многомировой интерпретацией, хотя на самом деле именно это они и делают. И уж точно они не пользуются ни скрытыми переменными, ни концепцией динамического коллапса, ни эпистемологическим подходом к квантовой механике. Как бы то ни было, когда требуется понять, каким образом квантовать саму Вселенную, многомировая интерпретация представляется самым прямолинейным подходом к решению этой задачи.

Верна ли обрисованная нами картина, где запутанность между степенями свободы каким-то образом приводит к тому, что они, складываясь воедино, определяют геометрию нашего приблизительно классического пространства-времени? Никто не знает наверняка. Исходя из современного состояния наших знаний не вызывает сомнений, что и пространство, и время могут проявиться из абстрактной волновой функции в устраивающем нас виде. Все ингредиенты есть, и не лишне надеяться, что спустя еще несколько лет работы мы увидим эту картину гораздо четче. Если мы научимся абстрагироваться от наших классических предубеждений и примем уроки квантовой механики за чистую монету, то, возможно, наконец поймем, как из волновой функции извлекается наша Вселенная.

## Эпилог

### *Все – квантовое*

Как бы Эйнштейн отнесся к многомировой интерпретации квантовой теории? Вероятно, с отторжением, по крайней мере сначала. Но ему пришлось бы согласиться, что в этой идее есть аспекты, которые очень хорошо сочетаются с его представлениями о правильном устройстве природы.

Эйнштейн умер в Принстоне в 1955 году, как раз в то время, когда Эверетт бился над формулировкой своей идеи. Эйнштейн был убежденным приверженцем принципа локальности, и его крайне беспокоило жуткое дальное действие, проистекающее из квантовой запутанности. В этом смысле его вполне могли ужаснуть как многомировая интерпретация, так и голографический принцип – идеи, согласно которым само пространство является эмерджентным, а не фундаментальным. Идея о том, что реальность описывается вектором в необъятном гильбертовом пространстве, а не сводится к материи и энергии в старом добром четырехмерном пространстве-времени, явно не показалась бы ему конгениальной. Однако ему, вполне возможно, понравилось бы достижение Эверетта, который вернул наилучшее имеющееся у нас описание Вселенной к такой картине, где Вселенная переживает определенную, детерминированную, эволюцию. Такая позиция лишний раз подтверждает, что реальность в конечном итоге принципиально познаваема.

На склоне лет Эйнштейн припоминал такую историю из детства:

Чудо такого рода я испытал ребенком в четыре или пять лет, когда отец показал мне компас. То, что эта стрелка вела себя так определенно, никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти себе место в моем неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню еще и сейчас – или мне кажется, что я помню, – что этот случай произвел на меня глубокое и длительное впечатление. За вещами должно быть что-то еще, глубоко скрытое.

Мне кажется, что во многом здесь отражена самая суть эйнштейновского скепсиса относительно квантовой механики. Возможно, он в голос возражал против индетерминизма и нелокальности, но по-настоящему не давало ему покоя ощущение, что копенгагенская интерпретация подменяет лаконичную строгость хороших научных теорий зыбкой парадигмой, центральная роль в которой отводится кое-как сформулированному понятию «измерения». Он постоянно был в поиске глубоко скрытых явлений, в поиске принципа, который вернул бы стройность явлениям, скатившимся в мистику. Едва ли он подозревал, что «глубоко скрытыми» могут быть другие ветви волновой функции.

Разумеется, не так важно, что именно мог думать Эйнштейн: научные теории переживают расцвет и упадок не потому, что мы умеем вызывать из прошлого воображаемые призраки ушедших гениев, надеясь на их одобрение.

И все же стоит сверять курс с этими великими мыслителями прошлого, хотя бы для того чтобы проследить связи между историческими научными дебатами и теми исследованиями, что ведутся сегодня. Проблемы, о которых шла речь в этой книге, проистекают непосредственно из дискуссий, которые в 1920-х годах вели Эйнштейн, Бор и другие ученые. После Сольвеевского конгресса мнения в физическом сообществе тяготели к точке зрения Бора, а копенгагенская интерпретация превратилась в укоренившуюся догму. Она зарекомендовала себя как исключительно точный метод для прогнозирования результатов экспериментов и проектирования новых технологий. Но до звания фундаментальной теории она, мягко говоря, не дотягивает.

Я привел аргументы в пользу того, что многомировая интерпретация является наиболее многообещающей формулировкой квантовой механики. И я глубоко уважаю сторонников других подходов, с которыми часто и продуктивно беседовал. Но меня расстраивают физики-профессионалы, отмахивающиеся от трудов по основаниям науки и не считающие такие проблемы достойными серьезного рассмотрения. Надеюсь, что после прочтения этой книги вы если и не перейдете на сторону эвереттианцев, то хотя бы уверитесь в необходимости наведения порядка в квантовой механике.

Я с оптимизмом смотрю на развитие событий. На современном этапе изучение основ квантовой механики – это не просто междусобойчик престарелых физиков, судачащих о фантастических идеях за бокалом виски после завершения основной работы. Многие из недавних достижений в развитии наших представлений о квантовой физике прямо или косвенно подстегнуты развитием технологических инноваций: речь о квантовых вычислениях, квантовой криптографии и квантовой информации в более общем смысле. Мы достигли рубежа, на котором уже нет смысла проводить четкую границу между квантовой и классической физикой. Все квантовое. Такое положение дел подвигло физиков несколько серьезнее отнестись к основаниям квантовой механики и привело нас к новым открытиям, которые, возможно, помогут объяснить эмерджентность пространства и времени как таковых.

Думаю, в ближайшем будущем мы увидим значительный прогресс в разгадке этих сложных головоломок. Хочется верить, что схожие убеждения разделяют и мои двойники, обитающие в других ветках волновой функции.

# Приложение

## *История виртуальных частиц*

Наши рассуждения о квантовой теории поля, изложенные в главе 12, могли бы показаться уморительно оригинальными большинству практикующих физиков, работающих в этой области. Нас интересовали только состояние вакуума, а также конфигурация квантовых полей, заполняющих пространство, которая обладает минимальным уровнем энергии. Но это всего лишь одно состояние из бесконечного количества возможных. Большинству физиков интересны как раз все прочие состояния – те, в которых просматриваются движущиеся частицы, взаимодействующие друг с другом.

Просто потому, что говорить о «координате электрона» привычно, физики обычно только и говорят о частицах, хотя нам доподлинно известно, что следует говорить о волновой функции электрона, да и сами физики в курсе, что мир состоит из полей, а не из частиц. Эти ученые даже говорят, что занимаются «физикой частиц», что их с виду ничуть не коробит. Понятно почему: ведь видим мы именно частицы, независимо от того, что происходит на более глубоком уровне.

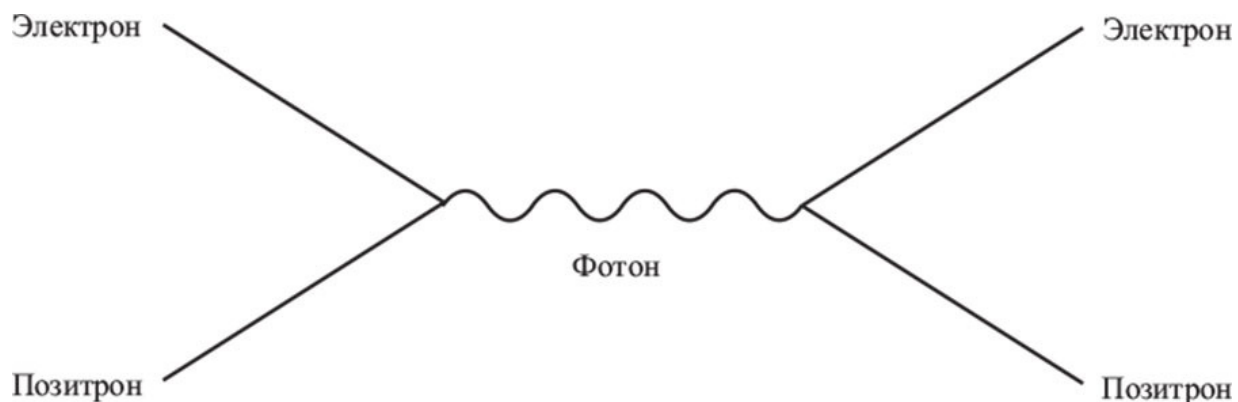
Хорошая новость – да, так поступать нормально, пока мы отдаем себе отчет в своих действиях. Во многих контекстах вполне допустимо рассуждать о природе так, *словно* в ней действительно существуют совокупности частиц, перемещающихся в пространстве, сталкивающихся друг с другом, рождающихся и аннигилирующих, иногда возникающих из ниоткуда.

Если обстоятельства располагают, то свойства квантовых полей можно смоделировать как многократные взаимодействия множества частиц. Это может казаться естественным, когда квантовое состояние описывает фиксированное количество частицеподобных вибраций поля, значительно удаленных и находящихся в «блаженном неведении» о существовании друг друга. Но если придерживаться правил, то и на языке частиц можно выразить даже такие ситуации, в которых несколько вибрирующих полей расположены одно над другим, именно тогда, когда «полевые» свойства наиболее важны.

Это важнейшее открытие принадлежит Ричарду Фейнману, разработавшему знаменитый научный аппарат под названием «диаграммы Фейнмана». Создавая первую версию этих диаграмм, Фейнман надеялся таким образом предложить альтернативу квантовой теории поля, базирующуюся на концепции частиц, но у него получилось нечто иное. Диаграммы Фейнмана оказались одновременно поразительно наглядным образным подходом и невероятно удобным вычислительным методом, применимым в рамках общей парадигмы квантовой теории поля.

Диаграмма Фейнмана – это просто рисунок из черточек, на котором представлены движущиеся частицы, взаимодействующие друг с другом. Время на рисунке откладывается слева направо. Здесь есть исходный набор частиц, которые затем перемешиваются, – в ходе этого процесса различные частицы рождаются или исчезают и, наконец, формируется окончательный набор частиц. Физики пользуются этими диаграммами не только для определения допустимости тех или иных процессов, но и для точного расчета той вероятности, с которой может произойти конкретный процесс. Например, если вас интересует, на какие частицы и как быстро может распасться бозон Хиггса, то вам придется провести расчеты с использованием множества диаграмм Фейнмана, каждая из которых описывает небольшой вклад в окончательный ответ. Аналогично с помощью этих диаграмм можно узнать, какова вероятность, что электрон и позитрон рассеются друг на друге.

Вот простая диаграмма Фейнмана. На картинке показано, как электрон и позитрон, обозначенные прямыми линиями, влетают на картинку с левой стороны, сталкиваются и аннигилируют с образованием фотона (волнистая линия), который некоторое время летит дальше, а затем вновь превращается в пару из электрона и позитрона. Существуют конкретные правила, согласно которым физики присваивают определенные числа любой подобной диаграмме, характеризуя таким образом вклад каждой из них в общий процесс «рассеяние электрона и позитрона».



История, которую мы рассказываем, основываясь на диаграммах Фейнмана, – это просто история. Это не совсем верно, что электрон и позитрон превращаются в фотон, а затем возвращаются обратно. Во-первых, фотоны движутся со скоростью света, а электронно-позитронные пары (как сами частицы, так и центры масс каждой такой пары) – нет.

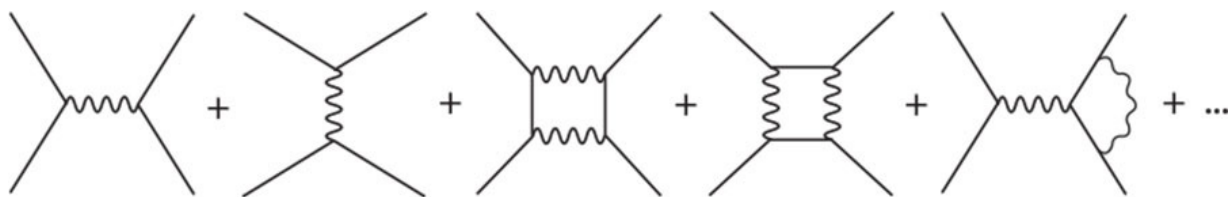
На самом деле поле электронов и поле позитронов постоянно взаимодействуют с электромагнитным полем. Колебания любого поля, обладающего электрическим зарядом, например электронного или позитронного, обязательно сопровождаются и слабыми колебаниями электромагнитного поля. Когда колебания двух таких полей (которые мы интерпретируем как электрон и позитрон) оказываются близко друг к другу или друг на друга накладываются, между всеми полями возникает притяжение и отталкивание, из-за чего исходные частицы рассеиваются в определенном направлении. Озарение Фейнмана заключалось в том, что можно рассчитать происходящие в теории поля события, представив, что перед нами совокупность частиц, разлетающихся в пространстве определенным образом.

Это исключительно удобно при вычислениях. Практикующие специалисты по физике частиц постоянно пользуются диаграммами Фейнмана, иногда они им даже сняты. Однако, занимаясь подобными расчетами, приходится идти на некоторые концептуальные компромиссы. Частицы, находящиеся внутри диаграмм Фейнмана (а не те, которые входят в диаграммы слева или выходят справа), не подчиняются традиционным правилам, характерным для обычных частиц. Например, они не обладают той массой или энергией, которая есть у обычной частицы. Они подчиняются собственному специфическому набору правил.

Это не должно удивлять, поскольку «частицы» внутри диаграмм Фейнмана – это никакие не частицы, а удобные математические фантомы. Чтобы не забывать об этом, их принято называть виртуальными частицами. Виртуальные частицы – это просто инструмент для вычисления свойств квантовых полей с помощью представления, что обычные частицы превращаются в странные частицы с невозможными энергиями, после чего между ними начинается «толкотня». Масса реального фотона строго равна нулю, но масса виртуального фотона может быть любой. Под виртуальными частицами понимаются неуловимые возмущения волновой функции совокупности квантовых полей. Иногда их называют флуктуациями или просто «модами» (имея в виду колебания поля с определенной длиной волны). Но все их называют частицами, и их с успехом можно изображать в виде черточек на диаграммах Фейнмана. Частицы так частицы.



Диаграмма рассеяния электрона и позитрона, которую мы начертили, – не единственная возможная, а всего лишь одна из бесконечного количества таких диаграмм. Согласно правилам игры, мы должны суммировать все возможные диаграммы, в которых наборы входящих и исходящих частиц одинаковы. Можно перечислить такие диаграммы в порядке возрастания сложности, так что в последующих диаграммах будет все больше и больше виртуальных частиц.



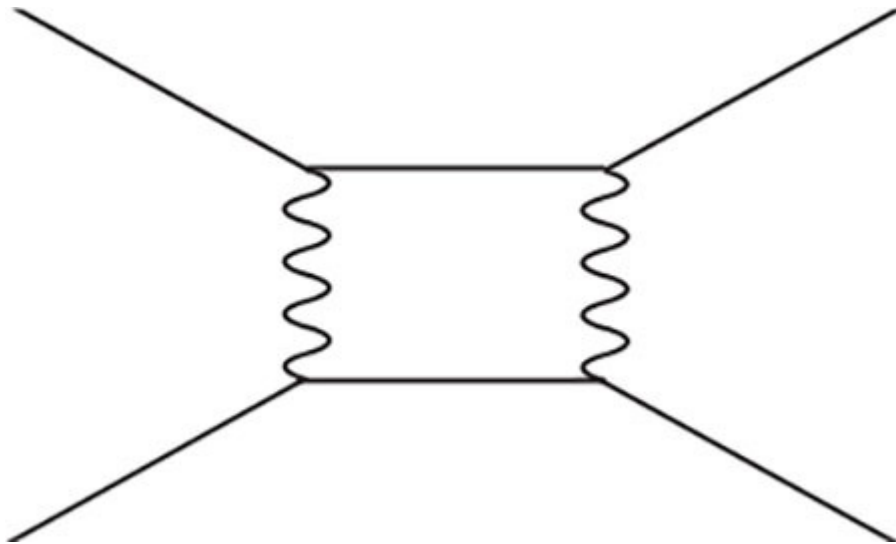
Итоговое число, которое мы получим, – это амплитуда. Возведя ее в квадрат, мы узнаем, с какой вероятностью может произойти изображенный на диаграмме процесс. Воспользовавшись диаграммами Фейнмана, можно вычислить вероятность того, что две частицы,



столкнувшись, рассеются друг на друге, либо что одна частица распадется на несколько других, либо что одни частицы превратятся в другие.

Здесь есть очевидный повод для беспокойства: если таких диаграмм бесконечно много, то как сложить их и получить осмысленный результат? Дело в том, что чем сложнее диаграмма, тем меньше ее вклад в общую картину. Даже если диаграмм бесконечно много, сумма наиболее сложных из них оказывается совсем крошечной. На практике факты свидетельствуют, что часто удается получить весьма точные ответы, просчитав лишь несколько первых диаграмм в бесконечном ряду.

На пути к этому красивому результату, правда, есть одна тонкость. Представьте себе диаграмму, в которой есть петля, то есть где линии некоторой совокупности частиц образуют замкнутый контур. Вот электрон и позитрон, обменивающиеся двумя фотонами:



Каждая линия соответствует частице, обладающей определенным количеством энергии. Когда линии сходятся, энергия сохраняется: например, если одна частица распадается надвое, то сумма энергий двух этих частиц должна равняться энергии первой частицы. Но совершенно не важно, на какие доли дробится эта энергия, важно лишь, чтобы суммарная энергия сохранялась. На самом деле, поскольку логическая основа, подведенная под виртуальные частицы,

хромает, энергия одной из частиц даже может оказаться отрицательной, а энергия другой частицы может превышать исходную.

Таким образом, когда мы просчитываем процесс, описываемый диаграммой Фейнмана, в которой есть внутренний замкнутый контур, по любой из линий в петле может проходить сколь угодно большое количество энергии.

К сожалению, при попытке рассчитать вклад таких диаграмм в окончательный ответ результат может оказаться бесконечно велик. В этом как раз и заключается причина тех злосчастных бесконечностей, которые стали бичом квантовой теории поля. Очевидно, вероятность любого конкретного взаимодействия не может превышать 1, поэтому бесконечный ответ означает, что где-то мы свернули не туда.

Фейнман и другие физики смогли разработать процедуру, позволяющую справляться с такими бесконечностями, — сегодня она именуется *ренормализацией* или *перенормировкой*. При наличии совокупности квантовых полей, взаимодействующих друг с другом, нельзя просто взять и сначала рассматривать их по отдельности, а затем просуммировать взаимодействия, касающиеся каждого из них. Поля постоянно и неизбежно влияют друг на друга. Даже при наличии небольшого колебания электронного поля, которое нам хотелось бы считать отдельным электроном, мы неизбежно получим сопутствующие ему колебания электромагнитного поля, а также колебания всех прочих полей, с которыми взаимодействует электронное. Все равно, что взять ноту на пианино в выставочном зале, где стоит много пианино: остальные инструменты начнут тихонько вторить этой ноте, из-за чего по залу разнесется слабое эхо тех нот, которые вы берете. На языке диаграмм Фейнмана это означает, что даже изолированной частице, движущейся в пространстве, на самом деле сопутствует целое облако виртуальных частиц.



Таким образом, полезно различать, с одной стороны, «голые» поля и их свойства в воображаемом мире, где все взаимодействия просто

отключаются, и, с другой стороны, «физические» поля, сопровождающиеся другими полями, с которыми они взаимодействуют. Бесконечности, которые у вас получаются, если вы станете просто считать «в лоб», наивно перешелкивая тумблеры в диаграммах Фейнмана, возникают попросту из-за попыток работать с голыми полями, тогда как на практике мы наблюдаем физические. Корректировка, которую требуется внести при переходе от первых ко вторым, иногда именуется «вычитанием бесконечности для получения конечного ответа», но это название не вполне верное. В физике не бывает бесконечных значений и никогда не было. Бесконечности, которые удалось «замаскировать» первопроходцам квантовой теории поля, – это просто искажение, вызванное слишком большой разницей между взаимодействующими и невзаимодействующими полями. (С проблемой точно такого рода мы сталкиваемся в квантовой теории поля, когда пытаемся оценить энергию вакуума.)

Тем не менее перенормировка дает важные физические откровения. Когда мы хотим измерить некоторую характеристику частицы, например ее массу или заряд, то «испытываем» ее, наблюдая, как она взаимодействует с другими частицами. Согласно квантовой теории поля, частицы, которые мы наблюдаем, – это не просто точечные объекты: каждая из них окружена облаком других виртуальных частиц или (точнее) другими квантовыми полями, с которыми она взаимодействует. А взаимодействие с облаком отличается от взаимодействия с точкой. Две частицы, которые врезаются друг в друга на большой скорости, будут проникать глубоко в облака друг друга, наблюдая относительно компактные колебания, в то время как две частицы, которые медленно проходят мимо, будут «видеть» друг друга как (относительно) крупные пухлые шары. Соответственно, наблюдаемая масса или заряд частицы зависит от энергии тех частиц, с помощью которых мы на нее смотрим. Это не метафора, а прогноз для экспериментов, который безошибочно подтвержден реальными данными в физике частиц.

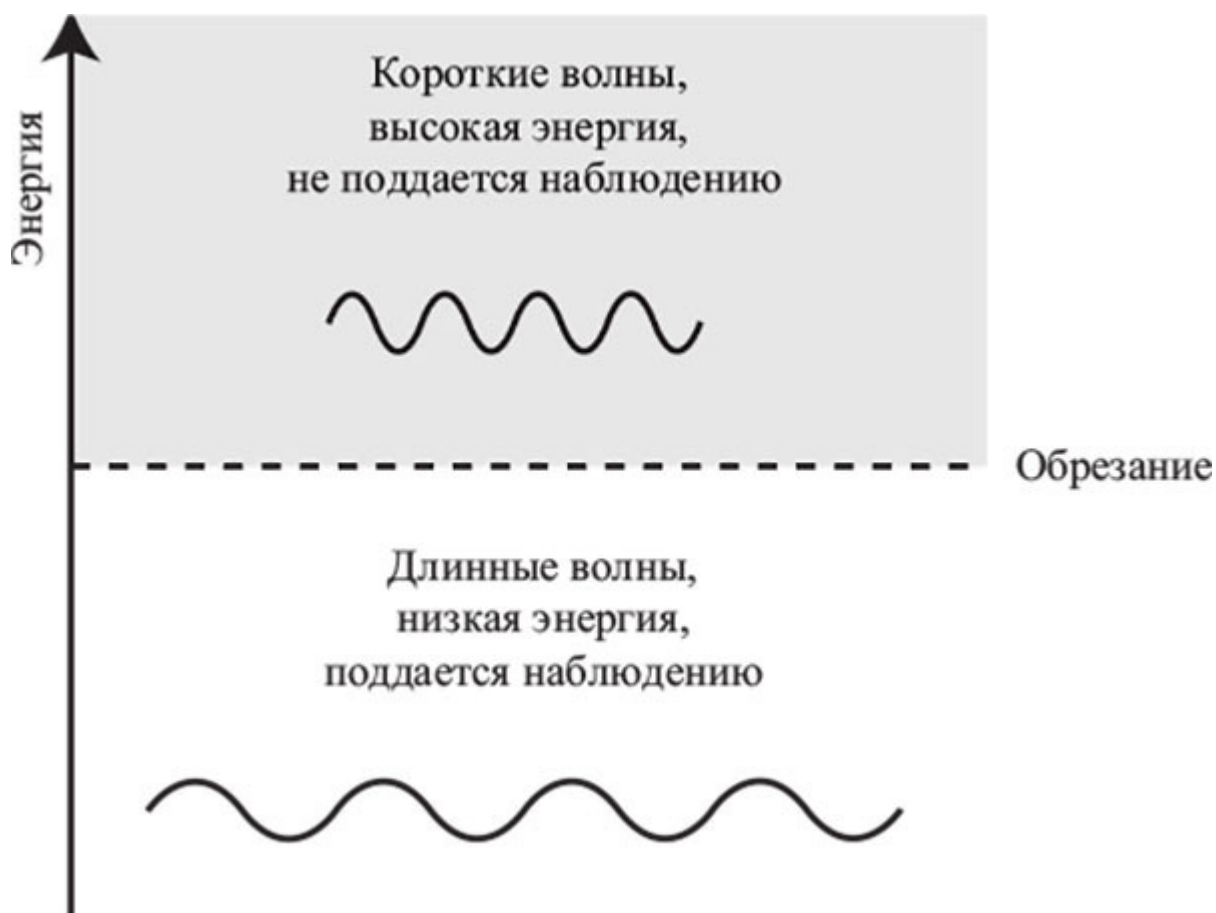


Но по-настоящему технику перенормировки физики оценили только в начале 1970-х, когда появились работы нобелевского лауреата Кеннета Вильсона, посвященные этой теме. Вильсон понял, что все бесконечности, возникающие при расчетах диаграмм Фейнмана, исходили от виртуальных частиц с чрезвычайно высокими энергиями, соответствующих процессам, которые происходят на предельно коротких расстояниях. Но кратчайшие расстояния и высокие энергии – это именно то, о чем мы понимаем меньше всего. В процессах с очень высокими энергиями могут участвовать совершенно новые поля, обладающие настолько большими массами, что мы пока не смогли получить их в ходе экспериментов. Если уж на то пошло, то на кратчайших расстояниях, порядка планковской длины, само пространство-время может разрываться.

Так вот, рассуждал Вильсон, что если быть до конца честными и признать, что нам попросту неизвестно, что происходит при запредельно высоких энергиях? Вместо того чтобы вычислять петли фейнмановских диаграмм и допускать рост энергии виртуальных частиц до бесконечности, давайте введем в эту теорию явное обрезание: такой уровень энергии, выше которого мы не в силах судить о чем-либо. Это обрезание в некотором смысле взято произвольно, но разумно сделать его на линии между энергиями, которые хорошо изучены на экспериментах, и более высокими энергиями, заглянуть в область которых мы не в состоянии. В таком случае даже может найтись целесообразная с физической точки зрения причина выбрать такой уровень обрезания, на котором, согласно нашим ожиданиям, в дело вступают новые частицы или другие феномены, природу которых мы пока не представляем.

Разумеется, при высоких энергиях могут происходить интересные вещи. Соглашаясь на обрезание, мы расписываемся в том, что не получаем абсолютно точного ответа. Но Вильсон показал, что в таком случае мы получаем более чем достаточно. Мы можем в точности охарактеризовать, как и примерно насколько любые новые феномены, происходящие на уровне более высоких энергий, влияют на фактически наблюдаемый нами мир низких энергий. Смирясь таким образом с нашим неведением, мы получаем *эффективную теорию поля*, не подразумевающую точного описания природы во всех подробностях, но успешно согласующуюся с имеющимися у нас

данными. Современные специалисты по квантовой теории поля признают, что все их наилучшие модели фактически являются эффективными теориями поля.



Тогда мы оказываемся в типичной ситуации, когда есть две новости: хорошая и плохая. Хорошая новость в том, что мы способны в мельчайших подробностях описать поведение частиц при низких энергиях, пользуясь эффективной теорией поля как магией, – даже если мы чего-то не знаем (или ничего не знаем) о том, что происходит с частицами при более высоких энергиях. Не требуется знать всех окончательных ответов, чтобы делать надежные и верные выводы. Во многом поэтому мы можем быть уверены, что те частицы, из которых состоим мы с вами, и те силы, которые ими управляют в привычной среде, досконально известны. Эти законы и образуют эффективную теорию поля. Остается большое поле для открытия новых частиц и

взаимодействий, но либо они являются настолько массивными (высокоэнергетическими), что мы пока не в силах получить их экспериментально, либо они взаимодействуют с нами настолько слабо, что никоим образом не могут повлиять на столы, стулья, собак, кошек и любые другие составляющие нашего низкоэнергетического мира.

Плохая новость заключается в том, что, как бы нам ни хотелось получше разобраться в том, что на самом деле происходит при высоких энергиях на минимальных расстояниях, «магия» эффективной теории поля сильно осложняет процесс. Хорошо, что мы в состоянии точно описывать физику низких энергий независимо от того, что происходит при высоких, но это одновременно и удручает, так как, по-видимому, мы не в состоянии исследовать процессы без непосредственного их зондирования. Вот почему для физики частиц характерна такая страсть к сооружению все более крупных ускорителей высокоэнергичных частиц: это единственный известный нам способ узнать, как устроена Вселенная на сверхмалых масштабах.

# Благодарности

Каждая книга — плод коллективного труда, в особенности эта. О квантовой механике можно было бы рассказать гораздо больше, и такой соблазн определенно существовал. При том, насколько увлекательно было писать эту книгу, ее чтение, вероятно — методичный и нелегкий труд. Я признателен многим великодушным и проницательным читателям за то, что они потратили свое время на рукопись и помогли привести ее в удобоваримый вид. Надеюсь, где-то она вышла даже забавной. Особого упоминания заслуживают дельные комментарии от Ника Эйсивза (Nick Aceves), Дина Буономано (Dean Buonomano), Джозефа Кларка (Joseph Clark), Дона Ховарда (Don Howard), Йенса Егера (Jens Jäger), Джии Моры (Gia Mora), Джейсона Поллака (Jason Pollack), Дэниела Ранарда (Daniel Ranard), Роба Рида (Rob Reid), Гранта Реммена (Grant Remmen), Алекса Розенберга (Alex Rosenberg), Лэндона Россса (Landon Ross), Чипа Себенса (Chip Sebens), Мэтта Стрэсслера (Matt Strassler) и Дэвида Уоллеса (David Wallace). Благодаря всем этим замечательным людям и их самой разнообразной помощи — от минимальной (мимоходом упомянуть факт, который впоследствии оказался в книге) до весьма серьезной (прочесть каждую главу и высказать ценные замечания), — я избежал участи стать автором весьма посредственной книги.

Хочу выразить особую благодарность Скотту Ааронсону (Scott Aaronson), ведь о лучшем первом читателе автор книги по физике не может и мечтать. Он подробно разобрал весь текст и дал очень полезные комментарии — как по содержанию, так и по стилю. И я еще раз поблагодарю Джию Мору, так как она по неизвестным причинам не попала в благодарности книги «Вселенная», и это очень печально.

Стоит ли говорить, что за годы работы я узнал массу всего интересного о квантовой механике и пространстве-времени от множества умных людей, и их влиянием пронизана вся книга, даже если не считать приведенных здесь благодарностей. Огромное спасибо Дэвиду Альберту (David Albert), Ниню Бао (Ning Bao), Джеффу Барретту (Jeff Barrett), Чарльзу Беннетту (Charles Bennett), Адаму Беккеру (Adam Becker), Ким Бодди (Kim Boddy), Чарльзу Као (Charles

Сао), Эйдану Четуйну-Дэвису (Aidan Chatwin-Davies), Сиднею Коулману (Sidney Coleman), Эдварду Фархи (Edward Farhi), Алану Гуту (Alan Guth), Джеймсу Хартлу (James Hartle), Дженанн Исмаэль (Jenann Ismael), Мэтью Лейферу (Matthew Leifer), Сету Ллойд (Seth Lloyd), Фрэнку Мэлони (Frank Maloney), Тиму Модлину (Tim Maudlin), Спиросу Михалакису (Spiros Michalakis), Алиссе Ней (Alyssa Ney), Дону Пейдж (Don Page), Элейну Фаресу (Alain Phares), Джону Прескиллу (John Preskill), Джесс Рейдел (Jess Reidel), Ашмиту Сингху (Ashmeet Singh), Леонарду Сасскинду (Leonard Susskind), Льву Вайдману (Lev Vaidman), Роберту Уолду (Robert Wald) и Николасу Уорнеру (Nicholas Warner), а также тем многим, кого я, несомненно, забыл.

Как обычно, благодарю моих студентов и коллег, мирившихся с моим эпизодическим отсутствием в тот период, когда я пытался закончить эту книгу. Также спасибо всем студентам из 125С, третья четверть курса для начинающих в Калтехе, посвященного квантовой механике, – за то, что выдержали мои докучающие рассказы о декогеренции и запутанности, вместо того чтобы попросту раз за разом решать уравнение Шрёдингера.

Миллион благодарностей Стивену Морроу (Stephen Morrow), моему редактору из издательства Dutton, чье терпение и проницательность при работе над этой книгой пригодились гораздо больше прежнего. Он даже позволил мне включить целую главу, построенную в форме диалога, хотя, возможно, я просто взял его измором. Сложно представить себе редактора, который бы так заботился о результате, и во многом книга получилась качественной именно благодаря Стивену. Также благодарю моих агентов Катинку Мэтсон (Katinka Matson) и Джона Брокмана (John Brockman), которым всегда удается превратить потенциальную нервотрепку в процесс вполне терпимый и даже приятный.

Самое большое спасибо я хочу сказать Дженнифер Уэллет (Jennifer Ouellette), моей идеальной спутнице в писательстве и в жизни. Она не только всеми мыслимыми способами поддерживала меня на этом пути, но и выкраивала время из собственного весьма плотного авторского графика, чтобы внимательно прочесть каждую страницу и прокомментировать ее, делая ценные замечания, – это и есть любовь. Я удалил далеко не все, что она предлагала, и, скорее всего, книге это



пошло не на пользу, но, поверьте, она стала гораздо лучше, чем была до этих правок!

Также спасибо Дженнифер за то, что она привела в наш дом Ариэля и Калибана, лучших котов-соавторов, каких только можно представить. При работе над книгой ни один кот в мысленных экспериментах не пострадал.

## От издательства

Ваши замечания, предложения, вопросы отправляйте по адресу [comp@piter.com](mailto:comp@piter.com) (издательство «Питер», редакция научно-популярной литературы).

Мы будем рады узнать ваше мнение!

На веб-сайте издательства [www.piter.com](http://www.piter.com) вы найдете подробную информацию о наших книгах.



Шон Кэрролл

# КВАНТОВЫЕ МИРЫ

И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

THE NEW  
YORK TIMES:  
ПОСТОЯННЫЙ  
БЕСТСЕЛЛЕР

SCIENCE NEWS:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА  
2019 ГОДА

AMAZON:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА,  
ВЫБОР РЕДАКТОРОВ



# Примечания

## 1

В физике принято положение объектов описывать с помощью координаты. Поэтому в дальнейшем, говоря о положении объекта в пространстве, мы будем употреблять именно этот термин. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 2

Есть одна небольшая техническая деталь, которую хотелось бы здесь упомянуть; затем смело забудем о ней. Амплитуда любого конкретного результата фактически является комплексным, а не вещественным числом. Вещественные числа входят в ряд всех чисел, расположенных между минус бесконечностью и бесконечностью. Возводя в квадрат вещественное число, мы всякий раз получаем другое вещественное число, которое больше или равно нулю. Поэтому если говорить строго о вещественных числах, то квадратного корня из отрицательного числа просто не существует. Математики давным-давно осознали, что квадратные корни из отрицательных чисел были бы очень удобны, поэтому и ввели такое понятие, как мнимая единица – комплексное число, являющееся квадратным корнем из  $-1$ . Мнимое число – это просто вещественное число, называемое мнимой частью, умноженное на  $i$ . В таком случае комплексное число состоит из двух частей: вещественной и мнимой. Вертикальные черточки у члена  $| \text{Амплитуда} |^2$  в формуле правила Борна означают, что мы фактически складываем квадраты вещественной и мнимой частей. Все это я написал только для самых въедливых читателей: далее я буду говорить просто «вероятность – это амплитуда в квадрате» и этим удовлетворюсь.

[Вернуться](#)

### 3

Здесь и далее в книге под гладкостью эволюции волновой функции подразумевается ее непрерывное и плавное изменение с течением времени, без скачков или коллапса. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

### 4

В интернете можно найти множество источников, где фраза «Заткнись и считай!» приписывается Ричарду Фейнману, физику, справлявшемуся со сложными вычислениями лучше, чем кто-либо и когда-либо. На самом деле он никогда не говорил ничего подобного, равно как и не разделял такой точки зрения; Фейнман тщательно размышлял о квантовой механике, и никто никогда не обвинял его в подобных манерах. Часто случается, что та или иная цитата приписывается вероятным людям, которые более знамениты, чем истинный автор цитаты. Социолог Роберт Мертон назвал этот феномен «эффектом Матфея», ссылаясь на следующую строку из Евангелия от Матфея: «ибо всякому имеющему дастся и приумножится, а у неимеющего отнимется и то, что имеет».

[Вернуться](#)

### 5

От слова «корпускула» – частица. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

### 6

Неточность автора. Автором концепции атомизма был Левкипп, учитель Демокрита. – *Примеч. пер.*

[Вернуться](#)

## 7

Досадно, что электрон ускоряется в направлении, прямо противоположном направлению электрического поля, тогда как в науке принято считать заряд электрона «отрицательным», а заряд протона «положительным». За это можно «винить» Бенджамина Франклина, жившего в XVIII веке. Он ничего не знал об электронах и протонах, но пришел к заключению, что существует универсальный феномен, который он назвал «электрическим зарядом». Когда он решил произвольно обозначить, какие вещества заряжены положительно, а какие – отрицательно, ему пришлось выбирать, и знак «плюс» он присвоил состоянию, которое мы бы сегодня обозначили «в атоме меньше электронов, чем следовало бы». Так и повелось.

[Вернуться](#)

## 8

За это открытие в 2017 году создателям международной коллаборации *LIGO* была присуждена Нобелевская премия по физике. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 9

Я уже подчеркивал, что существует всего одна волновая функция – волновая функция Вселенной, – но внимательный читатель мог заметить, что часто я говорю и о «волновой функции частицы». Последняя формулировка совершенно правомерна тогда и только тогда, когда частица рассматривается как не запутанная со всей остальной Вселенной. К счастью, зачастую так оно и есть, но здесь стоит быть внимательным.

[Вернуться](#)

## 10

В физике такие поля называются сильно неоднородными. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 11

То есть принимает только дискретный набор значений. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 12

Есть и третье, перпендикулярное, направление, которое можно назвать продольным спином, хотя мы его и не измеряем.

[Вернуться](#)

## 13

Множество всех ветвей волновой функции отличается от феномена Мультивселенной, рассматриваемого в космологии. Космологическая Мультивселенная – это просто совокупность областей пространства, как правило сильно удаленных друг от друга, где локальные условия сильно различаются.

[Вернуться](#)

## 14

Аналог ученой степени «кандидат наук». – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 15

Это другое название частотного (статистического) определения вероятности. – *Примеч. науч. ред.*



[Вернуться](#)

## 16

Есть и более изощренные аргументы, согласно которым такое правило следует из очень слабых допущений. Войцех Зурек предложил способ вывода такого принципа, а мы с Чарльзом Себенсом выдвинули независимую аргументацию. Мы показали, что это правило можно вывести исходя из того, что вероятности, определяемые при проведении лабораторного эксперимента, не должны зависеть от квантового состояния в любой другой точке Вселенной.

[Вернуться](#)

## 17

То есть примерно в 1,41 раза. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 18

Имеется в виду второе начало термодинамики, одна из формулировок которого гласит: в изолированной системе энтропия либо остается неизменной, либо возрастает, достигая максимума при установлении термодинамического равновесия. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 19

Максима – правило поведения человека или основной принцип, которым он руководствуется в своих поступках и принятии решений. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 20

В литературе также встречается другое название такого рода теории – Единая теория поля. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 21

Именно по три, поскольку наше пространство трехмерно. — *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 22

К сожалению, существуют и конкурирующие определения слова «эмерджентность», и некоторые из них по смыслу почти противоположны приведенному здесь значению. Определение, которым пользуемся мы, иногда именуется «слабой эмерджентностью» и в литературе противопоставляется «сильной эмерджентности», согласно которой целое несводимо к сумме всех его частей.

[Вернуться](#)

## 23

От англ. relativity – относительность. – *Примеч. науч. ред.*

[Вернуться](#)

## 24

В 2013 году Хуан Малдасена и Леонард Сасскинд предположили, что мы должны думать о запутанных частицах как о связанных через микроскопическую (и поэтому непроницаемую) червоточину в пространстве-времени. Эта версия получила название «гипотеза ЭР = ЭПР» по двум знаменитым статьям, опубликованным в 1935 году: одна принадлежит Эйнштейну и Натану Розену, где они впервые предложили концепцию червоточин, а другая, естественно, Эйнштейну, Розену и Борису Подольскому, где обсуждается

запутанность. Насколько можно развить эту гипотезу – остается неясным.

[Вернуться](#)

## 25

Не существует полного согласия по поводу того, на самом ли деле объекты, падающие в черную дыру, достигают ее недр. В 2012 году группа физиков заявила, что если информация действительно утекает из испаряющихся черных дыр и при этом не нарушаются базовые постулаты квантовой механики, то на горизонте событий должно твориться что-то драматичное: возможно, это не пустое и спокойное пространство-время, как принято считать, а шквал высокоэнергетических частиц, который сравнивают с «огненной стеной». Мнения по поводу гипотезы об огненной стене различаются, поскольку обсуждение этой проблемы в физических кругах продолжается.

[Вернуться](#)