



Шон Кэрролл

# КВАНТОВЫЕ МИРЫ

И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

THE NEW  
YORK TIMES:  
ПОСТОЯННЫЙ  
БЕСТСЕЛЕР

SCIENCE NEWS:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА  
2019 ГОДА

AMAZON:  
ЛУЧШАЯ НАУЧНО-  
ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА,  
ВЫБОР РЕДАКТОРОВ

**Шон Майкл Кэрролл**  
**Квантовые миры**  
**и возникновение**  
**пространства-времени**  
Серия «New Science»

*pdf*  
*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=66360614](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=66360614)*  
*ISBN 978-5-4461-1530-3*

**Аннотация**

Надеемся, что отсутствие формул в книге не отпугнет потенциальных читателей.

Шон Кэрролл – физик-теоретик и один из самых известных в мире популяризаторов науки – заставляет нас по-новому взглянуть на физику. Столкновение с главной загадкой квантовой механики полностью меняет наши представления о пространстве и времени.

Большинство физиков не признают неприятный факт: их любимая наука находится в кризисе с 1927 года. В квантовой механике с самого начала существовали бросающиеся в глаза пробелы, которые просто игнорировались. Популяризаторы постоянно твердят, что квантовая механика – это что-то странное, недоступное для понимания... Чтобы все встало на свои места,

достаточно признать, что во Вселенной мы существуем не в одном экземпляре. Шонов Кэрроллов бесконечно много. Как и каждого из нас.

Тысячи раз в секунду во Вселенной возникают все новые и новые наши копии. Каждый раз, когда происходит квантовое событие, мир дублируется, создавая копию, в которой квантовое событие так и не произошло.

В квантовой механике нет ничего мистического или необъяснимого. Это просто физика.

В формате PDF A4 сохранён издательский дизайн.

# Содержание

Отзывы	6
Пролог	9
Часть I	20
1	20
2	43
Конец ознакомительного фрагмента.	57

# 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 «Эlegantная 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 од-

ной 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 собствен-

ной 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 «Прослушка», 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 под-

ход. 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 подискути-

ровать 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 ультра-

современных 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 недолго 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 максималь-

но 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 лишь 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

---

<sup>1</sup> 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.*

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 сущно-

сти, 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 части-

цы, 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 учебного-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 вариан-

цией 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 подступиться 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 недву-

смысленные 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.

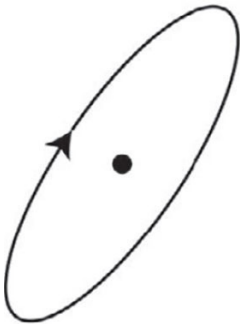
###

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.)

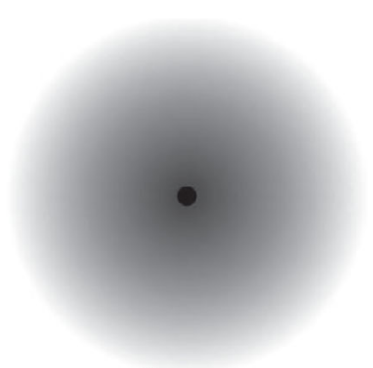
В отличие от ситуации с классической механикой, где состояние системы можно описать в контексте ее координаты и скорости, природа квантовой системы куда менее конкретна.

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

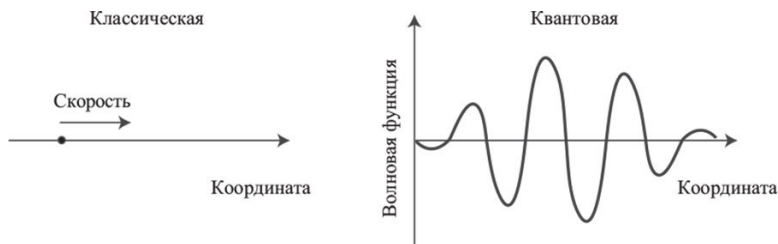


Квантовая  
волновая  
функция  
электрона

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 грече-

ской 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.

Вероятность конкретного результата = |Амплитуда  
данного результата|<sup>2</sup>

Это простое отношение называется правилом Борна в честь физика Макса Борна<sup>2</sup>. Часть стоящей перед нами зада-

---

<sup>2</sup> 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 го-

чи – 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 упираться 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

---

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  $|Амплитуда|^2$  в формуле правила Борна означают, что мы фактически складываем квадраты вещественной и мнимой частей. Все это я написал только для самых вьедливых читателей: далее я буду говорить просто «вероятность – это амплитуда в квадрате» и этим удовлетворюсь.

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

---

<sup>3</sup> 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.*

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.

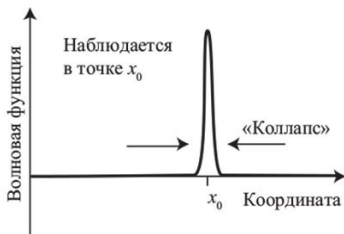
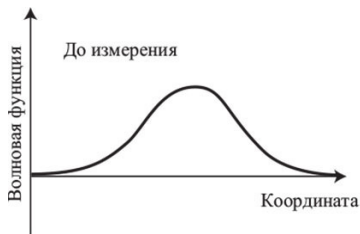
## **Правила квантовой механики (часть вторая)**

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 отража-

ют 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.

## 2

# 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 кото-

---

<sup>4</sup> 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».

ром 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 отстаи-

вал 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; он-

тология – 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 «за-

ткнись 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.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

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