



Посвящается Талии и Элиане



GEORGE MUSSER

SPOOKY ACTION AT A DISTANCE

The Phenomenon That Reimagines Space
and Time — and What It Means for Black Holes,
the Big Bang, and Theories of Everything



Scientific American / Farrar, Straus and Giroux

New York

ДЖОРДЖ МАССЕР

НЕЛОКАЛЬНОСТЬ

Феномен, меняющий представление о пространстве
и времени, и его значение для черных дыр,
Большого взрыва и теорий всего

Перевод с английского



Книжные проекты
Дмитрия Зимина



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва
2018

УДК 530.1
ББК 22.313
М32

Переводчики Вячеслав Ионов, Мария Томс
Редактор Вячеслав Ионов
Научный редактор Дмитрий Горбунов, доктор физ.-мат. наук

Массер Д.

М32 Нелокальность: Феномен, меняющий представление о пространстве и времени, и его значение для черных дыр, Большого взрыва и теорий всего / Джордж Массер ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018. — 360 с.

ISBN 978-5-91671-810-2

Эта книга посвящена истории феномена нелокальности в физике. Она представляет собой захватывающий обзор фактов, указывающих на то, что пространство-время является производным свойством Вселенной, а не ее фундаментальным элементом. Автор показывает, что нелокальность может быть матерью всех загадок и головоломок, с которыми сталкиваются физики в наши дни, — это не только странное поведение квантовых частиц, но и судьба черных дыр, происхождение космоса и присущее природе единство. Книга написана понятным языком без сложных математических выкладок и адресована тем, кто интересуется современными теориями, призванными объяснить сущность наиболее базовых элементов Вселенной и ее структуры.

УДК 530.1
ББК 22.313



Книжные проекты
Дмитрия Зими́на

Эта книга издана в рамках программы «Книжные проекты Дмитрия Зими́на» и продолжает серию «Библиотека «Династия». Дмитрий Борисович Зими́н — основатель компании «Вымпелком» (Beeline), фонда некоммерческих программ «Династия» и фонда «Московское время».

Программа «Книжные проекты Дмитрия Зими́на» объединяет три проекта, хорошо знакомые читательской аудитории: издание научно-популярных переводных книг «Библиотека «Династия», издательское направление фонда «Московское время» и премию в области русскоязычной научно-популярной литературы «Просветитель». Подробную информацию о «Книжных проектах Дмитрия Зими́на» вы найдете на сайте ziminbookprojects.ru.

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru.

© George Musser, 2015

ISBN 978-5-91671-810-2 (рус.)

© Издание на русском языке, перевод, оформление.

ISBN 978-0-374-29851-7 (англ.)

ООО «Альпина нон-фикшн», 2018



Оглавление

<i>Введение: воздушный замок Эйнштейна</i>	7
1. Многообразие видов нелокальности	21
2. Истоки нелокальности	61
3. Локальность Эйнштейна	107
4. Великий спор	135
5. Нелокальность и объединение физики.....	175
6. Конец пространства-времени	225
Заключение: амплитуэдр	269
<i>Примечания</i>	285
<i>Библиография</i>	322
<i>Благодарности</i>	351
<i>Об авторе</i>	354
<i>Предметно-именной указатель</i>	355



Введение: воздушный замок Эйнштейна



Впервые я узнал о нелокальности в начале 1990-х, будучи аспирантом, причем не от своего преподавателя квантовой механики: он не посчитал нужным даже упомянуть о ней. Роясь в местном книжном магазине, я наткнулся на только что изданную книжку «Сознательная вселенная» (The Conscious Universe), которая поразила меня заявлением о том, что «ни одно предыдущее открытие не бросало больший вызов нашему восприятию повседневной реальности», чем нелокальность. Это явление походило по вкусу на запретный плод.

В обыденном английском языке *locality** — это немного вычурное слово для обозначения района, города или другого места. Но его первоначальное значение, появившееся в XVII в., относится к самому понятию «место». Оно означает, что у всего *есть* место. Вы всегда можете указать на предмет и сказать: «Вот он». Если этого сделать нельзя, должно быть, предмет, на самом деле не существует. Если преподаватель спросит, где ваше домашнее задание и вы ответите, что нигде, то вам придется представить оправдания.



* В повседневной речи *locality* переводится как «местность», но в научном контексте используется англицизм «локальность». — Прим. пер.

Мир, в котором мы живем, наделен всеми признаками локальности. У нас сильно развито чувство места и чувство связи между местами. Мы ощущаем боль разлуки с теми, кого любим, и беспомощность от того, что находимся слишком далеко от чего-то, на что хотим повлиять. Вместе с тем квантовая механика и другие разделы физики наводят на мысль о том, что на более глубоком уровне может не быть места и расстояния. Физические эксперименты позволяют связывать судьбы двух частиц таким образом, что они ведут себя, как пара волшебных монет: сколько бы вы их ни подбрасывали, на них всегда выпадает что-то одинаковое — орел или решка. Их поведение согласовано несмотря на то, что в пространстве они не связаны никакими силами. Эти частицы могут разлететься по разным концам Вселенной и все же вести себя в унисон. Такие частицы нарушают принцип локальности. Пространство им не помеха.

Очевидно, природа нашла особое и тонкое равновесие: в большинстве случаев она подчиняется локальности, как это и *должно* быть, раз мы существуем, но все же намекает на то, что она нелокальна в своих глубинных основах. Именно данное противоречие я буду исследовать в этой книге. Для тех, кто ее изучает, нелокальность — мать всех физических загадок, причастная к широкому спектру головоломок, с которыми сталкиваются физики в наши дни: это не только странное поведение квантовых частиц, но и судьба черных дыр, происхождение космоса и присущее природе единство.

Для Альберта Эйнштейна локальность была одним из аспектов более широкого философского вопроса: почему мы, люди, вообще можем заниматься наукой? Почему мир таков, что мы можем понять его устройство? В знаменитом эссе 1936 г. Эйнштейн написал, что самое непостижимое в этом мире — это его постижимость. На первый взгляд такое утверждение само по себе кажется непостижимым. Вселенная не то что бы очень логична. Она сумасбродна и капризна, полна путаницы и произвола, несправедливости и несчастий. Многие из происходя-

щего не поддается логике (особенно если дело касается романтических отношений или вождения). И все же на фоне этих необъяснимых событий с обнадеживающей регулярностью проступают законы этого мира. Солнце встает на востоке. Предметы падают, если их уронить. После дождя появляется радуга. Люди идут в физику в уверенности, что это не просто приятные исключения из анархии жизни, а проблески лежащего в основе порядка.

Эйнштейн полагал, что физики на самом деле не имеют права ожидать этого. Мир не обязан быть упорядоченным. Он не должен подчиняться законам; при других обстоятельствах он бы мог быть совершенно беспорядочным. Когда друг Эйнштейна спросил в письме, что он имеет в виду, говоря о постижимости, тот ответил: «*A priori* следует ожидать, что мир хаотичен и не может быть понят умом каким-либо образом».

Хотя Эйнштейн и говорил, что постижимость — чудо, которое мы никогда не поймем, это не помешало ему попытаться его понять. Вся свою профессиональную жизнь он посвятил формулированию того, что же именно во Вселенной делает ее постижимой, и его размышления задали курс современной физике. Например, он понял, что внутренние механизмы природы обладают высокой степенью симметрии, т. е. выглядят одинаково, если посмотреть на мир с другой точки зрения. Симметрия привносит порядок в сбивающее с толку разнообразие частиц, открытых физиками; целые группы частиц одного вида являются, в каком-то смысле, зеркальными отражениями друг друга. Но среди свойств мира, дающих нам надежду понять его, Эйнштейн не раз возвращался к локальности как к самому важному из них.

Локальность — это тонкое понятие, которое может означать разное для разных людей. Для Эйнштейна она имела два аспекта. Первый аспект он называл «отделимостью», подразумевая, что можно отделить любые два предмета или части одного предмета друг от друга и рассматривать их по отдельности, по крайней мере в принципе. Можно взять стулья из сто-

лового гарнитура и поставить их в разных углах комнаты. Они не прекратят свое существование и не потеряют никаких качеств, таких как размер, стиль, удобство. Свойства набора в целом определяются свойствами составляющих его стульев; если на каждом стуле умещается один человек, то четыре стула позволят сесть четверым. Целое является суммой его составляющих. Второй аспект, который отметил Эйнштейн, известен как «локальное действие»: он гласит, что объекты взаимодействуют только при столкновении друг с другом или через чье-то посредство, позволяющее преодолеть пространство между ними. На расстоянии мы не можем повлиять на другого человека, для этого нужно приблизиться к нему, дотронуться, заговорить, похлопать по плечу, т. е. войти в прямой контакт или отправить кого-то или что-то для выполнения этой задачи. Современные технологии не нарушают этого принципа — они просто задействуют новых посредников. Телефон преобразует звуковые волны в электрические сигналы или радиоволны, которые распространяются по проводам или в эфире и преобразуются обратно в звуковые волны на другом конце. На каждом этапе этого пути что-то должно напрямую контактировать с чем-то еще. Если в проводе есть хотя бы крошечный разрыв, сообщение распространится так же далеко, как крик на Луне, лишенной атмосферы. Проще говоря, делимость определяет сущность объектов, а локальное воздействие — их поведение.

Эйнштейн обозначил эти принципы в своей теории относительности. Так, теория относительности гласит, что ни один материальный объект не может двигаться быстрее света. Без такого ограничения скорости объекты могли бы двигаться бесконечно быстро и расстояние потеряло бы свой смысл. Все силы природы должны преодолевать пространство, а не перепрыгивать его, как раньше считали физики. Таким образом, теория относительности дает нам меру отдаленности отдельных объектов и обеспечивает их отличимость друг от друга.

В зависимости от образа мышления теория относительности и другие законы физики воспринимаются либо как убедитель-

тельный внутренний порядок Вселенной, либо как занудный набор правил вроде тех, что насаждают авторитарные родители, пытающиеся лишить вас всех радостей в жизни. Как замечательно было бы взмахнуть руками и полететь, но, извините, это невозможно. Мы могли бы решить мировые проблемы, создавая энергию, увы, физика не позволяет и этого — нам дозволено лишь преобразовывать энергию из одного вида в другой. И вот теперь появляется локальность, еще один драконовский закон, разрушающий наши мечты о сверхсветовых космических кораблях и экстрасенсорных способностях. Локальность убивает свойственную болельщикам надежду на то, что скрепив пальцы или проревев какой-нибудь мудрый комментарий из своего кресла, они могут поддержать свою любимую команду на поле. К сожалению, если ваша любимая команда проигрывает, а вы серьезно хотите поддержать ее, вам придется встать и добраться до стадиона.

И все же локальность нужна для нашего собственного блага. На ней держится наше самоощущение, уверенность в том, что наши мысли и чувства принадлежат нам самим. При всем уважении к Джону Донну* каждый человек — действительно остров, сам по себе. Мы изолированы друг от друга морями пространства, и мы должны быть благодарны за это. Если бы не локальность, мир обладал бы магическими свойствами, причем не в хорошем, диснеевском смысле. Болельщикам, желающим иметь возможность влиять на игру, не выходя из дома, пришлось бы осмотрительно относиться к своим желаниям, поскольку болельщики соперников, надо думать, тоже имели бы такую возможность. Миллионы домоседов по всей стране пытались бы обеспечить своим кумирам преимущество, лишая игру смысла: она превратилась бы в противоборство воли болельщиков, а не талантов на поле. Не только спортивные состязания, но и весь мир стал бы враждебным

* Джон Донн (1572–1631) — английский поэт, воспевавший нераздельность и единство влюбленных. — *Прим. ред.*

для нас. В мире без локальности внешние для нас объекты могли бы проникать внутрь тела (для этого им не нужно было бы даже преодолевать кожу), и мы потеряли бы способность контролировать свое внутреннее состояние. Мы бы слились с окружающей средой. А это, по определению, и есть смерть.



Сосредоточившись на локальности как на ключевом необходимом условии для понимания природы, Эйнштейн придал единую форму философским и научным идеям, накопленным за 2000 лет. Для древнегреческих мыслителей, таких как Аристотель и Демокрит, локальность сделала возможным рациональное объяснение. Когда объекты влияют друг на друга только при прямом контакте, можно объяснить любое событие, дав последовательное описание того, как «то ударило это, которое, в свою очередь, столкнулось с тем, а оно, в свою очередь, отскочило от чего-то еще». Каждое следствие имеет причину, связанную с ним цепью событий, которая неразрывна во времени и пространстве. Нет такого, когда остается лишь всплеснуть руками и пробормотать: «А затем происходит чудо». Греческие философы возражали не столько против чуда — они не были атеистами, — сколько против бормотания. Они считали, что даже боги должны оказывать свое влияние по ясным и объяснимым правилам. Локальность необходима не только для тех типов объяснений, которые ищут философы и ученые, но также и для методов, которыми они пользуются. Они могут отделять объекты друг от друга, постигать их по одному и шаг за шагом строить картину мира. Перед ними не стоит невыполнимая задача восприятия всего сразу.

В 1948 г., к концу своей жизни, Эйнштейн резюмировал значение локальности в коротком эссе: «Физические понятия относятся к реальному внешнему миру... к вещам, которые претендуют на “реальное существование”, независимое от наблюдателя... Эти объекты претендуют на существование, независимое друг от друга, поскольку они “находятся в разных

частях пространства». Без такого предположения о взаимно независимом существовании... пространственно удаленных предметов, предположения, которое берет начало в обыденном мышлении, физическое мышление в известном нам смысле было бы невозможным. Также невозможно представить, как можно сформулировать и проверить физические законы без такого четкого разделения».

Локальность имеет такое повсеместное значение потому, что она является самой сутью пространства. Под «пространством» я подразумеваю не только «космос», вотчину космонавтов и астероидов, но и пространство между нами и всем тем, что находится вокруг нас, пространство, которое занимает наше тело и все остальное, пространство, в котором мы замахиваемся бейсбольной битой или делаем замеры с помощью рулетки. Направляете ли вы телескоп на планеты или на окна соседей, вы смотрите через пространство. Для меня красота пейзажа заключается в головокружительном ощущении, будто охватываешь пространство, это что-то вроде чувства, возникающего, когда смотришь с большой высоты вниз, только в этом случае смотришь в горизонтальном направлении и понимаешь, что те маленькие точки на другой стороне долины действительно там находятся и что можно их потрогать, были бы руки достаточной длины.

Как давно поняли художники, пространство — это не отсутствие чего-то, а некая сущность сама по себе. То, что находится между предметами на холсте, так же важно для композиции, как и сами предметы. Для физика пространство — это холст для физической реальности. Практически все свойства наших физических сущностей являются пространственными. Мы занимаем место. У нас есть форма. Мы двигаемся. Наши тела — это замысловатый танец клеток и жидкостей в пространстве. Наши мысли — это импульсы, быстродвигающиеся вдоль траекторий в пространстве. Любое взаимодействие, которое происходит между нами и остальным миром, проходит через пространство. Живые существа — это *сущно-*

сти, а что такое сущность, если не часть Вселенной, которая получает свою неповторимую индивидуальность в силу того, что занимает определенную область пространства?

Физика берет начало из исследования того, как предметы движутся в пространстве, и пространство определяет практически все величины, с которыми физика имеет дело: расстояние, размер, форма, положение, скорость, направление. Другие свойства мира могут не казаться пространственными, но это не так: цвет, например, соответствует длине световой волны. Всего несколько свойств материи, таких как электрический заряд, не имеют известного пространственного объяснения, и даже они выдают себя, изменяя направление движения в пространстве. При взгляде на предмет все, что мы видим, в конечном счете связано с пространством, поскольку определяется взаимным расположением частиц; частицы сами по себе — всего лишь мельчайшие крупички. Функция следует из формы. Даже непространственные понятия превращаются в пространственные в умах физиков: время становится осью на графике, и законы природы действуют в абстрактных пространствах возможностей. Даже такой авторитет, как Иммануил Кант, идеи которого оказали значительное влияние на Эйнштейна, считал, что невозможно представить мир без пространства.

Какая ирония судьбы в том, что главный поборник локальности стал и ее ниспровергателем. Хотя больше всего он известен миру как создатель теории относительности, Нобелевскую премию Эйнштейн получил за вклад в разработку квантовой механики, теории, описывающей поведение атомов и субатомных частиц. На самом деле физики считают, что квантовая механика описывает поведение *всего*, хотя характерные для нее эффекты сильнее всего проявляются на очень малых масштабах. Теория выросла из догадки Эйнштейна и его современников о том, что атомы и частицы не могут быть просто уменьшенными версиями тех вещей, которые мы видим вокруг себя.

Если бы они были таковыми — то есть вели себя в соответствии с классическими законами физики, сформулированными Исааком Ньютоном и другими физиками, — мир бы самоуничтожился. Атомы сколлапсировали бы, частицы взорвались, а лампочки сожгли бы нас смертельным излучением. Тот факт, что мы еще живы, означает, что материя должна подчиняться какому-то новому набору законов. Эйнштейн с энтузиазмом принимал необычное: на самом деле, несмотря на (несправедливо) заработанную в дальнейшем репутацию ретрограда и защитника классической физики, он неизменно оказывался впереди всех в понимании непривычных свойств квантового мира.

Среди этих свойств была нелокальность. Квантовая механика предсказывает, что две частицы могут стать побратимами. Из-за отсутствия связывающего механизма частицы вроде бы полностью автономны, и все же воздействие на одну из них означает воздействие и на вторую, как будто бы расстояние для них ничего не значит. Научный метод «разделяй и властвуй» в их случае не работает. Частицы имеют совместные свойства, которые нельзя обнаружить, если смотреть на каждую из них по очереди, — нужно наблюдать за ними одновременно. Наш мир опутан сетью таких, казалось бы, мистических взаимосвязей. Атомы вашего тела сохраняют связь с каждым человеком, которого вы любили, — что звучит романтично, пока вы не осознаете, что связь есть и с тем странным типом, который коснулся вас мимоходом на улице.

Частицы в противоположных концах Вселенной не могут быть действительно связанными, не так ли? Эта идея показала Эйнштейну глупостью, возвратом к донаучным представлениям о магии. Любая теория, подразумевающая возможность такого «призрачного действия на расстоянии», рассуждал он, должно быть, что-то упускает из виду. Он полагал, что мир на самом деле локален и просто кажется нелокальным, и искал более глубокую теорию, которая бы обнажила скрытый механизм, позволяющий двум частицам действовать в унисон.

Эйнштейн так и не нашел такую теорию и признал, что, возможно, это он сам что-то упускает. Возможно, нет никакого скрытого механизма. Принцип локальности — а вместе с ним и наше понимание пространства — может быть ошибочным. За несколько месяцев до кончины Эйнштейн размышлял о том, что могло значить для нашего понимания мира исчезновение пространства: «Тогда *ничего* не останется от моего воздушного замка, включая теорию тяготения, как, впрочем, и от всей современной физики».

Что было действительно пугающим, так это оптимизм его современников. Для них нелокальность была пустяком. Причины их пренебрежительного отношения были трудны для понимания, они и до сих пор являются предметом спора для историков, но, пожалуй, самое мягкое объяснение этому — прагматизм. Вопросы, беспокоившие Эйнштейна, просто не казались существенными для практического применения квантовой теории. Только в 1960-х гг. до нового поколения физиков и философов наконец дошли опасения Эйнштейна. Проведенные ими эксперименты показали, что нелокальность — это не теоретический курьез, а правда жизни. Но даже тогда большинство их коллег уделяли нелокальности мало внимания — именно поэтому я практически случайно наткнулся на эту тему, будучи аспирантом.

Однако в последние 20 лет позиция физического сообщества значительно изменилась. Нелокальность захлестнула господствующие течения физики и вышла далеко за пределы феномена, открытого Эйнштейном. Как популяризатор науки и редактор я не раз разговаривал с учеными из разных сообществ, с теми, кто изучает всё — от субатомных частиц до черных дыр и крупномасштабной структуры Вселенной. И раз за разом я слышал примерно следующее: «Ну, это странно, и я бы не поверил в такое, если бы не видел этого сам, но, похоже, мир просто обязан быть нелокальным». Исследователи вели себя подобно тем самым согласованным частицам в разных концах Вселенной: зачастую не зная друг друга, они тем не менее приходили к одним и тем же выводам.

Если Эйнштейн считал, что нелокальность имеет привкус волшебства, то, может быть, новые исследования дают основания верить в паранормальные явления? Некоторые так и решились. В последние десятилетия ряд ученых предполагал, что нелокальные связи между частицами могли бы наделить вас сверхъестественными способностями. Например, если бы частицы вашего мозга находились в запутанном состоянии с частицами мозга вашего друга, то, возможно, вы могли бы общаться друг с другом с помощью телепатии. Другой крайностью было то, что связанные с нелокальностью намеки на паранормальное заставили многих ученых отвергнуть всю эту область исследований как чепуху. На самом деле никакой связи здесь нет. Ни одно из свидетельств экстрасенсорных способностей не выдержало проверки, а обсуждаемые виды нелокальных явлений имеют слишком слабо выраженные эффекты, чтобы соединять умы или дистанционно влиять на исход бейсбольных матчей.

Некоторые расстраиваются из-за этого. Напрасно. Настоящее волшебство мира состоит в том, что он *не* волшебный. По причинам, которые были изложены ранее, локальность — необходимое условие нашего существования. Любая нелокальность должна оставаться надежно спрятанной и возникать только при определенных условиях, иначе наша Вселенная была бы непригодна для жизни. Нелокальность дает нам нечто гораздо более впечатляющее, чем паранормальные явления: возможность взглянуть на истинную природу физической реальности. Если воздействия могут пересекать пространство так, словно его на самом деле нет, то из этого следует естественный вывод: *пространства на самом деле нет*. Теоретик из Колумбийского университета Брайан Грин, который занимается теорией струн, написал в своей книге 2003 г. «Ткань космоса» (*The Fabric of the Cosmos*), что нелокальные связи «показывают нам, что пространство совсем не такое, как мы думали раньше». Какое же оно тогда? Исследование нелокальности может нам подсказать. Многие физики теперь считают,

что пространство и время обречены: они являются не фундаментальными элементами физического мира, но следствием первозданного состояния отсутствия пространства. Пространство похоже на ковер с обтрепанными краями и залысинами. Подобно тому как разглядывание залысин позволяет нам увидеть основу ковра, изучение проявлений нелокальности может пролить свет на то, как пространство строится из беспространственных составляющих.

«Я всегда думал и продолжаю думать, что открытие и подтверждение нелокальности является самым поразительным открытием в физике XX в.», — говорит Тим Модлин, профессор Нью-Йоркского университета и один из ведущих философов физики в мире. В статье конца 1990-х гг. он резюмировал ее следствия: «Мир — это не просто набор отдельно существующих локализованных объектов, связанных внешне только пространством и временем. Что-то более глубокое, более таинственное связывает воедино ткань мироздания. Мы только-только достигли того момента в развитии физики, когда можно начать размышлять о том, что бы это могло быть».

В то же время именно потому, что так много стоит на кону, другие ученые говорят мне, что нелокальность не может быть правдой, что те или иные нелокальные явления наверняка окажутся ошибкой толкования и что сваливать их все в одну кучу — это неправильно. Физики достигли больших успехов, используя пространственное мышление, и не откажутся от него так просто. Один скептик, Билл Унру, преподаватель физики в Университете Британской Колумбии, думает примерно так же, как думал Эйнштейн: «Если мне нужно знать все о Вселенной, чтобы знать хоть что-нибудь, если мы воспринимаем нелокальность серьезно, если то, что происходит здесь, зависит от того, что происходит со звездами, то физика становится практически невозможной. Что делает физику возможной, так это то, что мир допускает разделение на части. Если нам действительно нужно смотреть на звезды, чтобы увидеть будущее, то я не понимаю, как можно продолжать заниматься физикой».

Помимо того что ей присуще очарование, нелокальность также является идеальным объектом для научных споров. Разногласия между такими людьми, как Модлин и Унру, исключительно интеллектуальны. Отсутствие экономических интересов не позволяет заподозрить скрытые мотивы. Здесь нет лоббистов из Exxon Mobil*, бродящих по коридорам. Оппоненты не имеют явной личной неприязни, многие из них являются друзьями. Математика довольно проста, экспериментально полученные данные неоспоримы. И все же споры тянутся поколениями. В наши дни ученые повторяют аргументы, которые звучали еще в спорах Эйнштейна и его противников в 1920–1930-х гг. Почему так происходит? И что делать всем остальным, когда эксперты не могут прийти к согласию?

Рассмотрим наиболее известный научный спор недавнего времени: изменение климата. Большинство климатологов считают, что человеческая деятельность приводит к потеплению на планете, противники этой позиции до сих пор оспаривают это, и их доводы могут вызывать замешательство у тех, кто читает газету или бродит по сети. У большинства людей нет времени на то, чтобы стать экспертами по моделям общей циркуляции или измерениям длинноволнового излучения. Но одно мы можем понять точно: в практическом смысле спор можно разрешить независимо от того, продолжают ли эксперты спорить. В случае с изменением климата общественность уже знает все, что ей нужно. Существует немалый риск климатической катастрофы, и его снижение иначе как благоразумием не назовешь: чтобы понимать необходимость страхования от пожара, не нужно быть кандидатом наук по теории горения. Так же и с нелокальностью. Даже самые негибкие скептики теперь признают, что происходит *что-то* очень странное, что-то, заставляющее нас выходить за рамки самых глубоко укоренившихся представлений о пространстве и вре-

* Exxon Mobil Corp. — американская нефтяная компания, известная, в частности, тем, что финансировала исследования, результаты которых отрицали влияние парниковых газов на изменение климата. — *Прим. пер.*

мени, что-то, требующее постижения, если мы хотим узнать, как возникла Вселенная и как физический мир образует одно совершенное целое.

Восприятие обществом — это не просто побочный вопрос для науки. Оно напрямую имеет отношение к делу, поскольку в изменчивой исследовательской среде, где идеи борются друг с другом и нет ничего абсолютно ясного, традиционные, с точки зрения сторонних наблюдателей, способы функционирования науки, т. е. использование фактов, логики, уравнений, экспериментов, недостаточны для прекращения прений. Ученым приходится полагаться на чутье, образные связи и суждения об адекватности их фундаментальных принципов, основанные на субъективной оценке. Решив исследовать нелокальность, я рассчитывал неспешно прогуляться на природе, но оказался в причудливом тропическом лесу, полном блестящих листьев, извилистых тропок и соблазнительных пристанищ, кишаших огненными муравьями. Одни ученые испытывают трепет перед бунтарской идеей поставить под вопрос одно из старейших и глубочайших понятий в науке. Другие содрогаются от подобного безумства. Если локальность нарушается, значит ли это, что наш мир в конечном счете непостижим, как опасался Эйнштейн, или смогут ли физики найти какой-то другой способ его постижения?



Многообразие видов нелокальности

Лаборатория Энрике Гальвеза в Университете Колгейта размером примерно с гараж на пару машин и, как и большинство гаражей, забита всякой всячиной. Вдоль стен расположены столы, заставленные ящиками с инструментами, неисправными в той или иной мере электронными устройствами, а слева от входа находится самый часто используемый аппарат — кофеварка. В середине комнаты стоит пара оптических скамей: очень прочные стальные платформы размером с обеденный стол, покрытые сетью отверстий для закрепления зеркал, призм, линз и фильтров. «Как будто снова играешь в конструктор», — говорит Гальвез, веселый перуанец, который сильно напоминает Эла Франкена*.

Если кто и взял на себя задачу показать миру, как выглядит квантовая запутанность, так это Гальвез. Запутанность — это наиболее известный тип нелокальности из тех, что наблюдались современными физиками, и именно он пугал Эйнштейна. Слово *entanglement* («запутанность») в английском языке

* Алан Стюарт «Эл» Франкен — американский писатель, комик, радиоведущий и политик. — *Прим. пер.*

имеет коннотации романтической связи: особые и, возможно, мучительные взаимоотношения. Две запутанные друг с другом частицы не в прямом смысле сплетаются, как клубки пряжи, скорее между ними существует особая связь, для которой пространство не имеет значения. Вы можете наблюдать это явление, создавая, отклоняя и измеряя лучи света — не обычные лучи от фонарика, а пучки запутанных фотонов. В первых версиях этого эксперимента, проведенных в 1970-х гг. в Беркли и в Гарварде, были задействованы хитроумные изобретения «безумных ученых» вроде раскаленных печей, штабелей оконных стекол и грохочущих телетайпов. Гальвез воспользовался Blue-ray лазерами и оптоволокном для того, чтобы уменьшить размеры установки, так что теперь она умещается на школьной парте.

Большинство знакомых мне физиков-экспериментаторов в глубине души изобретатели, которых хитроумные устройства приводят в восторг не меньше, чем тайны Вселенной. Один экспериментатор из Центра квантовых технологий в Сингапуре сказал мне, что в его лаборатории студенты-новички должны пройти особый тест. В нем нет ни одного вопроса по физике. Студентам предлагают рассказать, случалось ли им разобрать какой-нибудь бытовой прибор и собрать его обратно до того, как домашние узнавали об этом. Похоже, что стиральные машины пользуются в этом смысле успехом. Что касается Гальвеза, то его детской страстью была химия: ее взрывоопасная разновидность. Он провел детство в Лиме, в районе, где жили люди среднего достатка, и однажды с друзьями попытался сделать порох. У них получилась только дымовуха, что, возможно, и к лучшему. «Получилось намного веселее, чем какие-то взрывы, — вспоминает Гальвез. — Наверное, это было не очень опасно».

По словам Гальвеза, он стал поборником нелокальности практически случайно. Как и большинство физиков, он не слишком задумывался об этом явлении до конца 1990-х гг., когда один коллега заглянул к нему в кабинет с весьма вол-

нующими новостями: австрийский физик Антон Цайлингер и его товарищи по лаборатории использовали запутанность для телепортации частиц из одного места в другое. *Телепортация?! Ни один поклонник «Звездного пути»** не мог остаться равнодушным. Хотя группа Цайлингера телепортировала всего лишь отдельные фотоны, а не десантный отряд космических кораблей, восторг от этого события затмил все, что было связано с дымовухами. Причем методика была простой. Предположим, вы хотите телепортировать фотон из левой половины лаборатории в правую. Сначала вы подготавливаете телепорты, создавая пару запутанных фотонов и помещая один в одной половине лаборатории, а другой во второй половине. После этого вы берете фотон, который хотите перенести, и организуете его взаимодействие с левой частицей. Поскольку запутанные частицы находятся в особой связи друг с другом, это взаимодействие сразу же проявляется справа, что позволяет фотону там воссоздаться. (Некоторые придираются к словам и спорят, действительно ли можно называть этот процесс телепортацией. Они считают, что по смыслу это больше похоже на «кражу личности». Экспериментаторы лишают левую частицу ее свойств и навязывают их правой частице. Но частица — это всего лишь сумма ее свойств, так что эти два описания эквивалентны.)

У Гальвеза с коллегой уже имелось все необходимое оборудование, и вскоре они тоже перемещали частицы по своей лаборатории. «Мы пытались понять телепортацию просто ради интереса», — говорит Гальвез. Другой коллега предложил им придумать такой эксперимент с запутанностью, который могли бы повторить даже слушатели курса физики для лириков. В нем не происходит телепортации, но выполняется первый и самый важный этап этого процесса, а именно: создаются и распределяются запутанные фотоны. Хотя установка кажется теперь очень

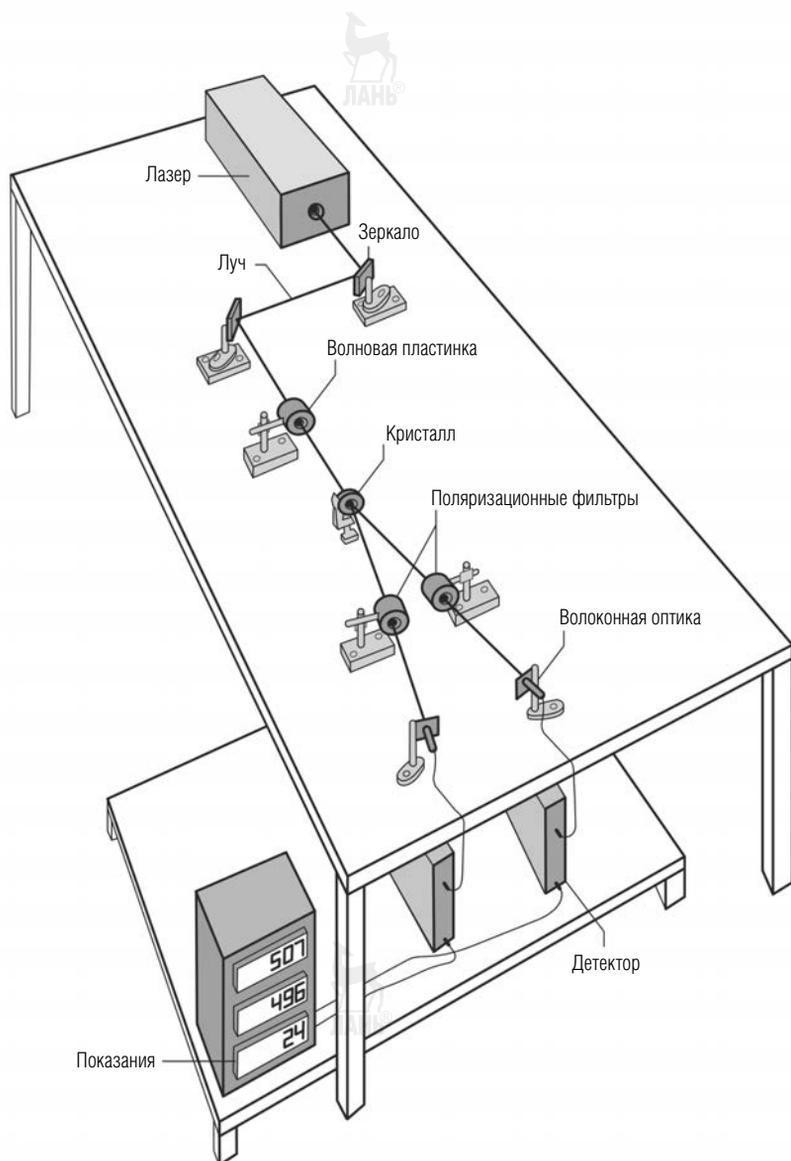
* Star Trek — популярный американский научно-фантастический телесериал, созданный Джином Родденберри и положивший начало целой вселенной «Звездного пути». — *Прим. пер.*

простой, группа ученых билась над ней два года. Гальвез организовал летние семинары для ALPhA, ассоциации физического образования, чтобы показать преподавателям, как проводить этот эксперимент, а также опубликовал свои инструкции онлайн, чтобы любители делать все своими руками могли создавать запутанные частицы у себя в подвалах. Бывший президент ALPhA Дэвид ван Баак восклицает: «Мы давно прошли ту стадию, когда [изучение] запутанности было исключительно делом университетов. Оно становится массовым».

В тот день, когда я посетил лабораторию Гальвеза, одна из оптических скамей была отдана под эксперимент по изучению запутанности, цель которого заключалась не только в демонстрации запутанности, но и в исследовании возможной причины этого явления. Мне кажется, что установка по существу является высокотехнологичной машиной Руба Голдберга* для подбрасывания монет. Они падают орлом или решкой в зависимости от того, проходят через фильтр или нет. Система настроена таким образом, что вероятность пройти его — 50 на 50, как в случае подбрасывания правильной монеты. В сущности, план такой: создать пару таких монет, подбросить их одновременно, посмотреть, какой стороной они упадут, создать еще одну пару, подбросить ее и т. д. Повторить опыт несколько тысяч раз и собрать статистику. Кажется, что мы тратим много усилий ради предсказуемого результата, пока не вспомнишь о том, что разговор идет о *квантовых* монетах. Ясно, что представление частиц в виде монет — это метафора, но если не воспринимать ее слишком буквально, то она вполне законна. Физики сами понимают явления при помощи метафор.

Чтобы привести установку в действие, Гальвез пропускает луч ультрафиолетового лазера через ряд оптических элементов, обеспечивающих должную юстировку. Этот луч попада-

* Руб Голдберг — американский карикатурист, писатель и изобретатель. Известен серией карикатур, изображающих чрезвычайно сложные и громоздкие устройства для выполнения очень простых функций. — *Прим. ред.*



1.1. Экспериментальная установка для изучения квантовой запутанности (Иллюстрация Джен Кристенсен)

ет на небольшой кристалл бората бария, вещества, открытого китайскими учеными в начале 1980-х гг., который расщепляет ультрафиолетовый луч на два красных луча. Расщепление происходит на уровне отдельных частиц: если бы вы могли видеть луч как поток фотонов, то заметили бы, как некоторые ультрафиолетовые фотоны ударяются о кристалл и делятся на два идентичных красных фотона. Вот вам и монеты. Непосредственно перед кристаллом находится оптический элемент, известный как волновая пластинка, который Гальвез использует для того, чтобы контролировать выходной поток от кристалла. В зависимости от того, как он устанавливает волновую пластинку, красные фотоны получаются запутанными или нет.

Как только красные лучи расходятся, они перестают взаимодействовать. Гальвез направляет каждый луч в поляризационный фильтр, очень похожий на тот, что фотографы накручивают на объектив для подавления бликов. Фильтр пропускает или задерживает фотоны в зависимости от их ориентации, т. е. от их поляризации. Гальвез может с помощью лимба на боку фильтра контролировать, какие фотоны он будет пропускать. Для этого эксперимента оба фильтра настраиваются одинаково, так, чтобы они пропускали случайным образом половину фотонов, имитируя таким образом подбрасывание монет.

Фотоны, которые проходят через фильтры, направляются на детекторы, преобразующие их в электрические импульсы. Эти детекторы — самая дорогая и самая хрупкая часть установки. Из-за сверхвысокой чувствительности, позволяющей регистрировать одиночные фотоны, они стоят \$4000 за штуку и легко повреждаются ярким светом. Даже в комнате с выключенным освещением детекторы регистрируют фотоны в бешеном темпе, потому что даже малейший проблеск света заставляет их срабатывать. Наблюдая за ними, я начинаю понимать, насколько светлой может быть якобы темная комната. Необходимо убедиться, что телефоны и ноутбуки полностью выключены — один-единственный включенный светодиод может

испортить весь эксперимент. «Нам пришлось заклеить черной лентой все, что светилось в лаборатории, — говорит Гальвез. — Вы не представляете, сколько здесь всяких лампочек». Он накрывает приборы черной тканью и закрывает плотным пологом всю скамью.

Наконец, детекторы подключаются к счетчику с тремя цифровыми дисплеями, расположенными вне полога. Два из них показывают, какое число фотонов прошло через правый и левый поляризационные фильтры. Когда Гальвез включает лазер, эти числа мелькают как миллисекунды на секундомере. Третий дисплей показывает число «совпадений» — когда оба фотона из пары проходят каждый через свой фильтр. Продолжая метафору монет, совпадение означает, что обе монеты выпали орлом. Для Гальвеза такие совпадения являются возможностью взглянуть на квантовую нелокальность.

После небольшой экскурсии для меня Гальвез готов к проведению эксперимента. Желая убедиться, что все работает правильно, он сначала воспроизводит подбрасывание обычных монет, настраивая пластинку так, чтобы фотоны получались незапутанными. Счетчик показывает около 25 совпадений в секунду. Для сравнения: если бы каждый фотон в каждой паре проходил через фильтр, было бы 100 совпадений в секунду. Таким образом, частота совпадений равна примерно четверти максимально возможного значения. Именно этого можно ожидать, исходя из законов теории вероятностей. Если подбрасывать две монеты, каждая будет выпадать орлом в половине случаев, а обе будут выпадать орлом в четверти случаев.

Теперь Гальвез настраивает волновую пластинку так, чтобы фотоны оказывались запутанными. Частота совпадений подсакивает почти до 50 в секунду. Может показаться, что в изменении показаний счетчика в подвальной лаборатории с 25 до 50 нет ничего особенного. Но такова физика. Нужно немало усилий, чтобы приподнять завесу тайны над окружающим нас миром, и намеки на ее разгадку очень слабые, но от этого они не менее значимы. Годы ожиданий и приготовлений к этому

моменту того стоили, поскольку, глядя на эти 50, я понимаю, что именно наблюдаю, и трепещу. Фотоны ведут себя как пара волшебных монет. Гальвез подбрасывает тысячи таких пар, и обе монеты всегда выпадают одной и той же стороной: либо обе орлом, либо обе решкой. Такого не бывает по чистой случайности.

Обычные монеты		Квантово запутанные монеты	
Левая монета	Правая монета	Левая монета	Правая монета
Орел	Решка	Орел	Орел
Решка	Решка	Решка	Решка
Орел	Орел	Орел	Орел
Решка	Решка	Решка	Решка
Решка	Орел	Решка	Решка
Решка	Орел	Решка	Решка
Орел	Решка	Орел	Орел
Орел	Орел	Орел	Орел

1.2. Пример результатов экспериментов с монетами. Если подбрасывать пару обычных монет, они будут выпадать одной и той же стороной в среднем примерно в половине случаев. Но если вы подбрасываете пару должным образом подготовленных квантово запутанных монет, они *всегда* будут выпадать одной и той же стороной

Если бы кто-нибудь из моих друзей показал этот фокус на вечеринке: подбрасывал бы монеты так, чтобы они одновременно выпадали орлами в два раза чаще, чем должны, я бы подумал, что это розыгрыш. Должно быть, мой друг сходил в магазин для фокусников и купил специальные монеты, одинаковые с обеих сторон, результат подбрасывания которых предопределен. Мог ли подобный трюк объяснить ту закономерность, которую я наблюдал в лаборатории Гальвеза? Чтобы исключить возможность жульничества, Гальвез использует тактику, которую предложил в 1960-е гг. ирландский ученый, изучавший физику элементарных частиц, Джон Стюарт Белл. Он поворачивает один из фильтров на 90° , что, так же как и подбрасывание монеты левой рукой вместо правой, не изменяет вероятность прохождения частицы через него, и если результат

действительно предопределен, ничего не должно измениться. Но это, казалось бы, безобидное изменение *влияет* на фотоны. Частота совпадений падает практически до нуля — если один фотон проходит через фильтр, то второй *нет*. Другими словами, волшебные монеты вместо того, чтобы выпадать одной стороной, теперь всегда выпадают разными сторонами. Если бы кто-то хотел вас разыграть, ему бы понадобилась особая ловкость рук, чтобы справиться с этим фокусом. Проводя дальнейшие усовершенствования, Гальвез исключает все мыслимые придирки.

Я подхожу и еще раз изучаю оптическую скамью. Между фильтрами расстояние шириной с мою руку. В экспериментах Цайлингера и других ученых оно доходит до сотен миль, а исследователи Центра квантовых технологий работают над проведением этого эксперимента в космосе, где расстояния будут еще больше. Для крошечной частицы это равносильно другому краю Вселенной. Фотоны ведут себя согласованно на таком расстоянии. Они не контактируют друг с другом, никакая известная сила не связывает их, и тем не менее они ведут себя как единое целое. Когда Гальвез поворачивает поляризационный фильтр в левой части скамьи и фотон проходит через него, этот фотон поляризуется в том же направлении, что и фильтр. Его запутанный партнер в точности следует за ним: он приобретает такую же поляризацию и соответствующим образом взаимодействует со своим фильтром. Таким образом, происходящее слева влияет на фотон справа, даже когда на преодоление этого расстояния каким-либо воздействием нет времени. Такое воздействие должно было бы мгновенно распространяться от левой части к правой, т. е. бесконечно быстро, быстрее скорости света, что явно противоречит теории относительности. Это одна из многих загадок, которые нам задает нелокальность. Физики отмечали, что все это ближе к волшебству, чем что-либо, виденное ими ранее. «Студенты обожают это, — говорит Гальвез. — Хорошие студенты говорят: “Я хочу выяснить, в чем тут дело”».

Молчи и считай

Что такое нелокальность — всего лишь диковинка, о которой можно поохать и забыть, или же она занимает одно из центральных мест в физике? Большую часть XX в. физики относились к ней как к диковинке, и я в студенческие годы ничем не отличался от них. Лишь намного позже, когда мне в руки попала книга Тима Модлина «Квантовая нелокальность и относительность» (*Quantum Nonlocality and Relativity*), я оценил всю глубину этой тайны.

Сидя в своей гостиной, обставленной мебелью работы Джорджа Накашимы, Модлин рассказывает мне, что никогда не забудет тот момент, когда он узнал о квантовой нелокальности. Как-то осенью 1979 г. во время учебы в Йельском университете ему на глаза попался последний номер журнала *Scientific American*. Его главной темой были навозные жуки, но, полистав журнал, Модлин обнаружил статью о первых экспериментах с запутанностью. То, что частицы ведут себя как заколдованные, потрясло его. «Я помню день, когда прочитал эту статью, — говорит он. — У моих соседей по общежитию этот день тоже остался в памяти. Я ходил по комнате взад и вперед. Мир был не таким, как я думал раньше. Это выводило меня из равновесия».

Его также бесило, что преподаватели физики (как и в моем случае) даже не заикались об этом явлении. Когда он спрашивал об этом, они отмахивались от него. По воспоминаниям Модлина, он однажды поднял руку в аудитории и спросил, не может ли оказаться так, что квантовая теория не дает развиваться более глубокой теории, в которой нынешние противоречия найдут объяснение. Преподаватель отмел эту идею и продолжил покрывать доску греческими буквами. «Он не предоставил никакого объяснения, почему нет, — говорит Модлин. — Просто закрыл вопрос, не отвечая на него».

•

Чтобы оценить то интеллектуальное препятствие, с которым столкнулись я и Модлин, нужно вернуться к знамени-

тым спорам между Эйнштейном и другим основателем квантовой механики, датским физиком Нильсом Бором. В 1920-х и 1930-х гг. Эйнштейна беспокоило то, что нелокальность противоречила его теории относительности. Он утверждал, что она должна быть своего рода иллюзией, свидетельствующей о нашем незнании какого-то важнейшего аспекта природы. Бор, со своей стороны... впрочем, никто не знает точно, на чем настаивал Бор. Его рассуждения дали слову «запутанный» совершенно новое значение, и его послания трактовались либо как отстаивающие нелокальность, либо как опровергающие ее. Если что-то и было вынесено из его слов, так это мысль о том, что неважно, какие странности происходят за кулисами, до тех пор пока теория может предсказывать то, что наблюдается в эксперименте.

Как известно любому, кто наблюдал президентские дебаты в США, суждения о «победе» или «поражении» часто имеют мало общего с тем, что на самом деле говорят участники. Большинство физиков просто хотели завершения спора Бора — Эйнштейна, чтобы можно было и дальше применять квантовую механику к практическим задачам. Поскольку Бор обещал прекращение прений, они сплотились вокруг него и списали Эйнштейна со счетов как вышедшего из моды. Позже кто-то писал про Эйнштейна, что его «репутация не пострадала бы, а то и укрепилась, займись он вместо этого рыбалкой».

В последующие десятилетия физики использовали квантовую теорию для самых разнообразных полезных вычислений. Они придумали транзисторы, лазеры и другие технологии, лежащие в основе современного мира. Таким образом, коллективное решение закрыть глаза на вопросы о более глубоком смысле этой теории казалось справедливым. Когда такие концептуальные вопросы все-таки возникали, физики считали их «философскими», и подразумевалось, что это не комплимент, а способ отрицания того, что эти вопросы вообще стоило задавать. Английский физик Поль Дирак писал: «Об этом бес-

покоится только философ, желающий обладать удовлетворительным описанием природы».

Поскольку вопрос и в самом деле зацепил Модлина, он решил получить диплом философа, а не физика. «Я хочу добраться до сути всего, — говорит он. — Это то, чем занимается философ». Философия характеризуется не только своими интересами, но и своими методами: философы специализируются на логике, а не на математике и экспериментировании. Модлин заработал среди философов репутацию «Доктора Опровергателя», способного найти ошибку в любом доказательстве. На протяжении всей работы над дипломом и в первые годы его профессорства, по словам Модлина, мысль о нелокальности вертелась у него на подсознательном уровне. Но никто из его знакомых, казалось, не интересовался ею, и в некотором смысле философы выглядели такими же заложниками принципа локальности, как и физики. Обстоятельства не давали Модлину больше думать об этом вплоть до осени 1990 г., когда умер Джон Стюарт Белл.

Белл сделал больше, чем кто-либо другой, для возобновления дела «Эйнштейн против Бора». Он начал сомневаться в победе Бора еще студентом университета в 1950-е гг., но понял, что высказывание сомнений не принесет пользы карьере. К середине 1960-х гг., сделав имя на исследовании частиц и проектировании ускорителей частиц, включая предшественников Большого адронного коллайдера, Белл почувствовал себя в достаточной безопасности, чтобы вернуться к юношеским интересам. Он показал, что нелокальность уже не исключительно повод для спора — ее можно запросто наблюдать в лаборатории. Как и Эйнштейн, Белл изо всех сил старался убедить своих коллег. Его первая статья на эту тему не цитировалась нигде в течение четырех лет и не упоминалась в учебниках до 1985 г. Даже когда работа Белла все-таки привлекла к себе внимание, ее нередко неверно истолковывали. Один из его некрологов был озаглавлен: «Человек, доказавший, что Эйнштейн был неправ». Это показывает полное непонима-

ние мысли Белла о том, что нелокальность выходит за рамки того старого спора. Эйнштейн, возможно, был неправ, полагая, что нелокальность окажется только мнимой, но и Бор заблуждался, игнорируя ее полностью.

Как и Эйнштейна, Белла беспокоило то, что нелокальность бросает вызов теории относительности. Физики не могут отказаться от квантовой теории: она выдерживает все экспериментальные проверки. Точно так же невозможно вообразить, что теория относительности неверна. В лекции 1984 г. Белл заключил: «Мы имеем явную несовместимость, на самом глубинном уровне, между двумя столпами современной теории». Даже те, кто в остальном благожелательно к нему относился, не видели этой несовместимости. Создавая теорию относительности, Эйнштейн думал о том, как мы получаем информацию. Такие сигналы, как свет или звук, должны передаваться от объектов в окружающем мире к нашим органам чувств. Если эти сигналы распространяются мгновенно, они могут конфликтовать. В результате получаются парадоксы. Что-то одновременно происходит и не происходит. Внутренние механизмы Вселенной ломаются. Однако квантовые волшебные монеты не несут такой опасности. Они по своей сути не способны передавать сигналы. Они падают орлом или решкой, им нельзя приказать, как именно упасть. Нет способа контролировать их, чтобы передать сообщение или вообще сделать что-либо. Поэтому вы никогда не сможете использовать их для создания парадоксальной ситуации. Опасность предотвращена.

Другими словами, если запутанность — это волшебство, то оно не похоже на волшебную палочку, взмахом которой можно заставить что-то произойти. Скорее волшебство происходит спонтанно, и вы замечаете его, только если внимательно смотрите. Это очень разбавленная форма волшебства, которая не принесет никаких кубков в турнирах волшебников. Почти все убедили себя в том, что квантовая механика и теория относительности «мирно сосуществуют».

Ряд философов из Университета Ратджерса организовали в честь Белла симпозиум по квантовой физике и попросили выступить на нем Модлина. Возобновив свои исследования с того места, на котором он остановился еще студентом, Модлин продолжил разгребать гору информации, выросшую вокруг полученных Эйнштейном и Беллом результатов. Общепринятое видение теоретического согласия показалось Модлину *слишком* согласованным. «Простое указание на то, что вы не можете посылать сигналы, совсем не казалось мне достаточным для демонстрации того, что фундаментального конфликта с теорией относительности не существует», — говорит он. Даже если пара запутанных частиц не может передавать сигналы, квантовая теория все равно утверждает, что происходящее с одной из них мгновенно влияет на вторую. Таким образом, эта теория требует, чтобы у Вселенной было что-то вроде главных часов, гарантирующих, что 19:30 для одной частицы — это 19:30 для второй частицы. А теория относительности подобное отрицает. Теорию *относительности* называют так именно потому, что ход времени относителен. Два события, происходящие одновременно для одного человека, могут происходить поочередно для другого.

Доклад Модлина положил начало его книге, публикация которой совпала со всплеском интереса к запутанности. Экспериментаторы, осознавшие, что это явление не так бесполезно, как они думали раньше, начали применять его в криптографии и компьютерах. Так, Артур Экерт, физик из Оксфордского университета и нынешний директор Центра квантовых технологий, в 1991 г. доказал, что запутанные частицы могут создать настолько безопасный канал связи, что даже самая коварная правительственная программа наблюдения не сможет его перехватить. Как только физикам показали, какова значимость запутанности, они начали видеть ее практически везде, куда бросали взгляд. Она наблюдается даже в живых организмах. В фотосинтезе запутанностью объясняется неожиданно высокая эффективность, с которой молекулы преобразуют энергию

света в химическую энергию, таким образом, запутанность вносит вклад в существование жизни на нашей планете.

К началу нового тысячелетия статья Эйнштейна, с которой все началось, стала одной из самых цитируемых в истории физики. Тем временем древняя стена между физиками и философами начала рушиться. Цайлингер, первопроходец среди экспериментаторов, часто расходится во взглядах с Модлином, но обменивается с ним идеями так, как 20 лет назад нельзя было и помыслить. «Эта связь между философией и физикой является решающей для достижения реальных успехов», — говорит мне Цайлингер.

Ясно, что квантовая нелокальность — это не просто представление за ужином в Лас-Вегасе, а неотъемлемая часть мира, и физики с философами до сих пор не знают, что стоит за этим волшебством. Могут ли ключи к разгадке находиться в других областях науки? Что можно узнать благодаря другим типам нелокальности, существующим в мире?

Звездочет и ледолаз

Подавляющую часть XX в. необычная синхронность запутанных частиц была единственным видом нелокальности, который заслуживал хоть какого-то внимания. Однако физики постепенно осознали, что и другие явления подозрительно таинственны. Те, кто изучает черные дыры, считают, что вещество в этих космических пылесосах может перепрыгивать из одного места в другое, не преодолевая расстояние между ними, — вот тип нелокальности, вероятно еще более непостижимый, чем та ситуация, которая беспокоила Эйнштейна.

Черные дыры долгое время были для физиков самыми странными явлениями во Вселенной. Рамеш Нараян видел их в действии. Как и Гальвез, Нараян говорит, что пришел к своей научной страсти поздно и практически случайно. Ребенком он не проявлял никакого интереса к астрономии. Нараян один из немногих знакомых мне астрофизиков, кто не припомни-

нает страстной увлеченности черными дырами в детстве. Он обожал кристаллы. Но на своей первой работе, в престижном Исследовательском институте имени Рамана в Бангалоре, в южной Индии, он вдруг оказался в кругу людей, исследующих тайны Вселенной, и вскоре его это увлекло. Нараян стал экспертом по космическим потокам газа. Основной принцип этих потоков прост: то, что падает, должно проявляться. Когда газ обрушивается на поверхность звезды, она разогревается; звезда, в свою очередь, испускает энергию обратно в космос, обычно в виде инфракрасного излучения или видимого света. «Вся энергия, попадающая внутрь, должна выходить наружу», — объясняет Нараян, который теперь преподает в Гарварде. Однако в начале 1990-х гг. астрономы заметили странное исключение из этого правила в центре нашей галактики.

Увидеть центр галактики довольно легко. В следующий раз, когда выйдете из дома посмотреть на ночное небо, найдите созвездие Стрельца. В моем городе его проще всего наблюдать летом и ранней осенью, когда оно висит невысоко над южным горизонтом. Оно должно быть похоже на лучника, но большинство астрономов считают его похожим на гигантский чайник. Его носик указывает на центр Млечного Пути. Для человеческого глаза это всего лишь туманный кусочек неба, но в 1940-е гг. благодаря телескопам там обнаружили завихрение газа. В самом центре газ устремляется в одну точку в области, известной под названием Стрелец A*. Эта область таинственно неярка: менее 1% энергии, приносимой туда поступающим газом, возвращается обратно. «Прямо на наших глазах энергия направляется к центру и исчезает — пшик», — говорит Нараян.

Это определение черной дыры. Ее тяготение настолько велико, что все попавшее в нее никогда не возвращается обратно. Художники иногда изображают черные дыры в виде гигантской воронки в пространстве, однако снаружи они больше похожи на планету: большую, подозрительно темную планету. Вещество может вращаться вокруг нее, и обычно так и происходит. Но если бы вы попробовали потрогать то, что кажется ее

поверхностью, ваша рука просто прошла бы насквозь: этот объект представляет собой пустое пространство. Предполагаемая поверхность, или «горизонт событий», на самом деле является просто гипотетической точкой невозврата, в которой попадающий туда газ или другое вещество могут поменять курс на противоположный, только двигаясь со скоростью больше скорости света. В случае Стрельца А* горизонт событий представляет собой сферу диаметром около 25 млн км. Вещество, пересекающее его, просто продолжает двигаться, как машина, захватывая на тупиковую улицу с односторонним движением, и несется навстречу какой-то неопределенной и, предположительно, печальной кончине. «Это единственная уникальная особенность черной дыры, — говорит Нараян. — У черной дыры нет поверхности, и это меняет все. Газ и вся энергия, которую он несет, просто проглатываются».

Что же происходит со всем этим веществом? Это загадка. К сожалению, две главные теории в распоряжении физиков — теория тяготения и квантовая теория — приходят к диаметрально противоположным выводам о судьбе поглощенного вещества. Если говорить упрощенно, теория тяготения гласит, что падение в черную дыру необратимо, в то время как квантовая теория утверждает, что нет ничего необратимого. Первая говорит, что вещество не может выбраться оттуда, что оно поглощается черной дырой навсегда. Вторая говорит, что вещество должно выбраться оттуда и снова принять участие в жизни космоса. В чем дело? Это противоречие — красная лампочка, предупреждающая о том, что некоторые принципы современной физики, кажущиеся неотъемлемыми, возможно, неверны.

Наблюдения Нараяна не могут решить этот вопрос. Разрешение противоречий, связанных с черными дырами, требует создания объединенной физической теории, в которой квантовая теория и теория тяготения сливаются в квантовую теорию гравитации. И многие из тех, кто работает над такой теорией, сомневаются в справедливости принципа локальности. Если бы вещество могло перемещаться быстрее скорости света

или перепрыгивать изнутри наружу, не проходя через лежащее между этими позициями пространство, у него была бы возможность ускользнуть из неприветливой тюрьмы черной дыры.

Главный поборник этой идеи — Стив Гиддингс. Он преподает в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре, хотя, глядя на шорты с накладными карманами, флисовую куртку и незаправленную клетчатую рубашку, его можно принять за инструктора по горному туризму. И это не так уж далеко от правды: он мелькает как в научно-популярном журнале *Scientific American*, так и в журнале для туристов *Climbing*. Гиддингс достиг совершенства в скалолазании и ледолазании, в горных и равнинных лыжах, в альпинизме и каякинге. Он считает, что его страсть к науке и увлечение видами спорта на открытом воздухе дополняют друг друга. «Мне кажется, это две грани единения с природой», — говорит он. В детстве он увлекался книгами по физике, в колледже получил грант от Национального научного фонда на исследование гравитации, но при этом не упускал случая покататься на лыжах на природе. Летом после выпуска из колледжа он сам смастерил каяк и спустился на нем по реке Колорадо через Большой каньон. Затем Гиддингс доехал автостопом до Национального парка «Денали», это была первая из его поездок в те края. Он помнит, как северный олень с детенышем перебежал дорогу, не обращая на него никакого внимания. «Оглянувшись, я понял, почему им было не до меня, — говорит Гиддингс. — Они убегали от большого гризли. Медведь же направился ко мне». Вспомнив инструктаж смотрителя парка, Гиддингс не растерялся и кричал на медведя до тех пор, пока тот не отступил в поисках более легкой добычи.

Потом он переехал в Нью-Джерси. Там есть много чудесных мест, за исключением гор и каньонов. Но у Гиддингса не было на них времени. Дни, ночи, будни и выходные он проводил за подготовкой к экзаменам. Казалось, что принстонский курс физики для аспирантов был создан специально, чтобы опрокинуть его каяк. «Поддержка практически отсутствовала, — гово-

рит Гиддингс. — В этой атмосфере студенты чувствовали себя совершенно затюканными». Гиддингс подумывал сбежать, но у него хватило твердости, чтобы сдать экзамены в 1984 г. Это было время большого воодушевления в области теоретической физики. Ученые по всему миру бросали все остальное и переключались на теорию струн, претендовавшую на звание единой теории всего.

Теория струн получила свое название от идеи о том, что субатомные частицы похожи на крошечные резиновые ленты или гитарные струны. То, что мы воспринимаем как разные виды частиц, — это на самом деле просто разные способы колебаний этих струн, что делает мир симфонией невысказанной сложности. Теория томилась в неизвестности с конца 1960-х гг., и переломный момент наступил, когда немногочисленным энтузиастам удалось убедить большинство в ее внутренней непротиворечивости. «Это было настоящее дело, и оно захлестнуло меня с головой», — вспоминает Гиддингс. Эдвард Виттен, корифей этой области, попросил его решить ключевое уравнение, и через несколько месяцев упорного труда, пробуя один математический метод за другим, он сделал это. Тем временем Гиддингс познакомился с несколькими любителями каяка и обнаружил, что Штат садов* получил свое прозвище не совсем незаслуженно. «Я начал понимать, что это, может быть, и сработает», — говорит он.

Разрешение противоречий с черными дырами было одной из главных причин для поиска единой теории, и в 1990 г. Гиддингс решил заново пройти шаги, приведшие к парадоксу, которые были изложены знаменитым кембриджским теоретиком Стивеном Хокингом в середине 1970-х гг. Хокинг исходил из того, что распад — это закон природы. Практически все в этом мире в конце концов умирает. И черные дыры — не исключение, и не могут им быть, раз они образуются. Разрушение — это создание наоборот. «Если можно сделать черную

* Официальное прозвище штата Нью-Джерси. — Прим. пер.

дыру из случайного мусора, значит, черная дыра может распасться на случайный мусор», — говорит Гиддингс.

Согласно исследованиям Хокинга, распад не означает, что внутреннее содержимое черной дыры просачивается наружу. Да разве такое возможно? Чтобы вырваться за пределы горизонта событий, внутреннее содержимое должно вытекать со сверхсветовой скоростью. Вместо этого дыра разрушается от краев к середине. Горизонт событий выводит из равновесия электрическое, магнитное и другие поля, заставляя их излучать частицы как чешуйки ржавчины. Черная дыра, равная по массе нашему Солнцу, испускает примерно одну частицу в секунду, что слишком мало для того, чтобы такие астрофизики, как Нараян, могли обнаружить это с помощью приборов, но достаточно для того, чтобы за триллионы лет превратить черную дыру в беспорядочное, бесформенное облако частиц. Структура попавшей туда материи, информация, содержавшаяся в ней, все следы того, чем она была раньше, — все утрачивается. Другими словами, попадание в черную дыру необратимо не только в том смысле, что из нее нельзя выбраться обратно. Это было бы не так страшно, поскольку, если вообразить себя богом, можно заглянуть в черную дыру и восстановить, как там оказалось все, что в ней есть. Но попадание в черную дыру необратимо еще и в том смысле, что материя в ней уничтожается с такой тщательностью, что даже богу не удалось бы восстановить оригинал.

Как заметил сам Хокинг, его вычисления были непростыми. Он смог понять, как черная дыра влияет на вылетающие частицы, но не то, как вылетающие частицы влияют на черную дыру: а это взаимное влияние могло бы открыть потайную дверь между пространством снаружи и внутри дыры, позволяющую захваченной материи возвращаться наружу. Если так, то попадание в черную дыру было бы все же обратимо и парадокс исчез. Поэтому Гиддингс и несколько его коллег провели новое исследование, основанное на теории струн, в поисках потайных дверей и лазеек, не учтенных в вычислениях Хокинга.

Они ничего не нашли. Хокинг был прав. «С помощью этих простых моделей в самом деле подтверждается первоначальное видение Хокинга», — говорит Гиддингс.

Таким образом, нет простого способа избежать парадокса (не говоря уже о черной дыре). Одно из допущений, используемых при доказательстве, должно быть ошибочно, а таких допущений в действительности всего два: обратимость и локальность. Сначала Хокинг посчитал неверным первое из них. Он предположил, что квантовая теория неверна и падение в черную дыру необратимо. Однако похоже, что в квантовой теории работает правило «все или ничего»: если она не работает в одном месте, то не работает нигде. Если она дает осечку там, где предположил Хокинг, мы должны видеть подобные проколы и в обычных условиях, а мы их не видим. В итоге Хокинг согласился с тем, что черные дыры должны быть обратимы. Тогда, по умолчанию, ошибочным должен быть принцип локальности. «Я продолжаю биться над вопросом о том, как попадает наружу информация: похоже, что этот процесс просто обязан быть нелокальным», — говорит Гиддингс.

Примерно к тому же выводу пришли еще несколько исследователей, но общее настроение было неоднозначным. Нелокальность в черных дырах еще труднее переварить, чем нелокальность в экспериментах с частицами. Если квантовая запутанность — трудноуловимое явление, не противоречащее открыто никаким другим законам физики, то движение со сверхсветовой скоростью через горизонт событий настолько грубое противоречие, что грубее придумать сложно. Это нарушение так же нахально, как езда со скоростью 150 км/ч на виду у патрульного. Гиддингс не мог шага ступить по коридору или выйти за чашечкой кофе, чтобы какой-нибудь коллега не высказался против его готовности серьезно рассматривать нелокальность, и в итоге он забросил эту тему почти на десятилетие. «Это выглядело довольно безумно, — говорит он. — Я не пошел дальше. Я слишком быстро уступил скептикам». На деле Гиддингс просто немного опередил свое время.

Бетономешалка и дочь скульптора

Даже простая возможность существования второго типа нелокальности чрезвычайно существенна. Она указывает на то, что явление, обнаруженное Эйнштейном, лишь один из фрагментов большой мозаики. Это не доказывает, что нелокальность действительно работает или что эти два типа нелокальности как-то связаны, но психологически очень важно. В науке, как и в жизни вообще, именно второй, а не первый случай привлекает внимание людей. Третий случай означает наличие тенденции.

Этот следующий тип нелокальности, о котором я расскажу, не настолько признан, как квантовая запутанность или черные дыры, но если он действительно существует, то все еще серьезнее. Он проявляется в наблюдениях, которые кажутся настолько очевидными, что вы можете даже не воспринимать их как наблюдения. Если вы взглянете на ночное небо, то увидите, что оно темное. Наверное, это вряд ли будет откровением. И все же темнота ночи — одна из основ теории Большого взрыва, поскольку темнота означает, что Вселенная конечна по возрасту, или по размеру, или по тому и другому сразу. Если бы Вселенная была бесконечно большой и древней, то мы бы видели бесконечно далеко во всех направлениях и в поле зрения всегда попадала бы какая-нибудь звезда. Звезды создавали бы непрерывную стену света. Это было бы похоже на жизнь в таком глухом и старом лесу, что, куда бы вы ни посмотрели, вы бы увидели дерево. Так что в следующий раз, когда будете смотреть на ночное небо, представьте, что звезды — это деревья, а чернота между ними — просветы, показывающие, что лес либо настолько маленький, что вы видите сквозь него, либо настолько молодой, что еще не стал густым.

Мало того что ночное небо темное, оно еще и выглядит практически одинаково, куда бы вы ни посмотрели. На конференции, которую я посетил в 1996 г., астрономы показали пла-

кат с самой поразительной демонстрацией однородности, которую я когда-либо видел. Они направили космический телескоп Hubble на темный участок неба рядом с ковшом Большой Медведицы и оставили его в таком положении на 10 дней, чтобы собрать свет для самого чувствительного изображения из когда-либо сделанных: Hubble Deep Field. Три года спустя они сделали то же самое с почти диаметрально противоположной частью неба, в Южном полушарии. Эти изображения не так эффектны, как некоторые другие снимки, сделанные телескопом, — их красота недооценена. На них видны объекты, находящиеся почти на самом пределе нашего зрения, они настолько тусклые, что телескоп получал от них всего один фотон света в минуту. Тысячи небольших красноватых пятен на изображении — это целые галактики, включая такие, которые сформировались самыми первыми. Северные и южные изображения с точки зрения статистики выглядят одинаково, из чего следует парадокс, который профессор Мэрилендского университета Чарльз Мизнер впервые заметил в 1969 г.

Мизнер, современник Хокинга, — это еще один из тех физиков, которые произвели революцию в исследованиях черных дыр и Вселенной в целом в 1960–1970-х гг. Как и большинство студентов, изучавших физику, я сначала узнал его имя как *M* в *MTW*^{*}, общеизвестном сокращении фамилий авторов учебника по теории гравитации «Гравитация» (*Gravitation*): с его виньетками и размышлениями, это один из немногих учебников, которые действительно весело читать. Детским увлечением Мизнера, как и Гальвеза, была не физика, а химия. Он помнит, как мать ругала его за дырки, прожженные в одежде реактивами из набора юного химика. В ответ он поставил эксперимент — капал кислоту на различные виды ткани, чтобы посмотреть, как они себя поведут. Вряд ли его матери это пришлось по вкусу, но друг семьи, услышав об интересах мальчика, нанял его, чтобы тот нашел способ более эффективной выдержж-

* *MTW* — Misner, Thorne, Wheeler. — *Прим. ред.*

ки бетона. В результате была разработана добавка, замедляющая испарение воды.

Мизнер поступил в колледж со специализацией по химии, но неожиданно удовольствие от предмета улетучилось. «Лабораторные работы были ужасны, — вспоминает он. — Нужно было просто следовать инструкциям, как в поваренной книге». Поэтому он переключился на физику и продолжил учебу в аспирантуре Принстонского университета как раз в то время, когда легендарный профессор Джон Уилер (W в прозвище того же учебника) возвращал к жизни исследования гравитации. Хотя физики не уставали восхищаться теорией гравитации Эйнштейна, немногие на самом деле брались за ее изучение, полагая, что все по-настоящему интересное происходило в квантовой физике. Уилер осознал, что гравитация — самая созидательная из сил природы. Геоны, пространственно-временная пена, кротовые норы, черные дыры — не нужно даже знать смысл этих терминов, чтобы понять, что Уилер говорил о чем-то большем, чем яблоки, падающие на головы людей. «У него была геометрическая и физическая интуиция, и у него был азарт, ему казалось, что за уравнениями может стоять больше, чем думали другие, — говорит Мизнер. — И он был прав».

Однородность ночного неба не была внесена в список загадок до того, как в 1960-х гг. случилось два прорыва в наблюдениях. Сначала астрономы обнаружили квазары: точки света, которые на первый взгляд похожи на звезды, но таких цветов, какие ни у одной звезды никогда не наблюдались. Их осенило — квазары выглядят настолько яркими потому, что Вселенная расширяется, растягивая световые волны как логотип на футболке из спандекса, превращая синий в красный. Свет квазаров настолько красный, что должен был путешествовать миллиарды лет, прежде чем достичь нас, а это делало квазары на тот момент самыми древними объектами, которые когда-либо видели люди. В 1966 г. Мизнер получил годовую стипендию в Кембридже, где астрономы, как он вспоминает, отмеча-

ли мелом положение квазаров на доске сферической формы. Мизнер заметил, что на одной стороне меток больше, чем на другой, как будто древняя Вселенная была неравномерной. Асимметрия оказалась случайностью, но это заставило его задуматься о том, почему небо должно или не должно выглядеть одинаково во всех направлениях. Второе открытие обострило этот вопрос: это было космическое микроволновое фоновое излучение.

Радиоастрономы сначала заметили это излучение как слабое, но постоянное шипение в своих приемниках. Они очистили антенну от голубинового помета, однако шипение не исчезло — везде, куда бы они ни направили антенну, было это шипение, заполняющее небо, не оставляющее пустых мест. Ученые быстро осознали, что подобное шипение является формой света, длина волны которого увеличилась, и свет из синей части спектра перешел в красную, затем в инфракрасную и в микроволновую — это еще более существенное преобразование, чем то, которому подвергся свет от квазаров, что делает его источник еще более древним: по текущим оценкам, ему 13,8 млрд лет. Космическое микроволновое фоновое излучение дает нам возможность взглянуть на Вселенную в те времена, и она похожа на ванильное мороженое с молоком во время метели: первичный бульон почти без особенностей и состоящий почти из чистого водорода. Газ был распределен еще более однородно, чем галактики и квазары, которые появились позже.

Одинаковый вид требует наличия общей причины. Если двое ваших друзей появятся однажды в совершенно одинаковой одежде, вы можете относиться к этому как к чистой случайности, но если много других людей одеты похожим образом, значит, есть какая-то связь: дресс-код, массовая рассылка по электронной почте, распродажа в местном магазине Gap. Люди склонны одеваться разнообразно, поэтому случайные совпадения маловероятны. Аналогичным образом вещество в ранней Вселенной могло распределяться такими разными путями,

что обретение им одинаковой плотности и одинаковой температуры во всех точках было маловероятным — поразительно маловероятным. Тем не менее это произошло.

Чем можно объяснить такую однородность? Если на то пошло, тяготение должно было заставить вещество сгущаться, делая его *менее* однородным. Космологи размышляли о других процессах, но столкнулись с фундаментальной проблемой. Две галактики или два крупных скопления газа в противоположных концах нашего неба, на самом краю наблюдаемой части Вселенной, находятся слишком далеко друг от друга, чтобы какой-либо процесс, происходящий в пространстве, мог уравнивать их свойства. В конце концов именно это и означает находиться на самом краю доступной для наблюдения части Вселенной: свет от каждой галактики только теперь достигает нас после одиссеи длительностью в миллиарды лет. У него еще не было времени, чтобы добраться до второй галактики.

Космологи проводят аналогию с горизонтом на Земле. Если вы стоите на спасательном плоту посреди океана, то из-за кривизны нашей планеты можете видеть вдаль примерно на пять километров. Если к вам приближаются два корабля — один с севера, другой с юга, — сначала вы видите верхушки их мачт, и по мере того, как они становятся ближе, их корпуса медленно поднимаются над вашим горизонтом. Что касается моряков на кораблях, то сначала они видят вашу макушку, а затем постепенно и остальные части фигуры. Но в момент, когда они впервые вас замечают, моряки на одном корабле не могут видеть другой корабль: когда вы находитесь прямо на их горизонте, другой корабль все еще находится за ним. Мы похожи на этого потерпевшего кораблекрушение человека, а две диаметрально противоположные галактики похожи на тех моряков. Мы видим галактики, которые даже не видят друг друга, не говоря уже об обмене энергией или веществом, который мог бы сделать их внешний вид одинаковым. Фоновое излучение должно быть скорее пестрым лоскутным одеялом, а не равномерным свечением. «Чрезвычайно трудно объяснить, почему

небо не испещрено пятнами... — говорит Мизнер. — Наблюдения показали согласованность у объектов, у которых никогда не было физической возможности взаимодействовать друг с другом».

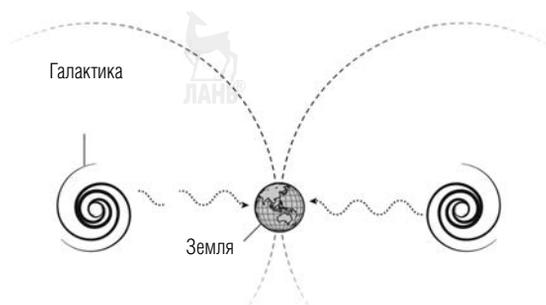
В этой ситуации опять чувствуется определенное дежавю. Отдаленные части Вселенной согласовали свои свойства, явно нарушив предел скорости, установленный светом. Это выглядит так же жутко, как то, что Гальвез видит в своей лаборатории, за исключением того, что теперь мы говорим о целых галактиках, а не о маленьких частицах. В 1970 г. российский теоретик Яков Зельдович осмелился предположить, что некий тип квантовой нелокальности мог бы объяснить однородность космоса. Однако в целом космологи отказывались заходить так далеко. Большинство восприняло эту загадку как провал теории гравитации Эйнштейна и полагало, что разгадка появится не раньше, чем произойдет объединение физики. Другими словами, Мизнер говорит: «Никто не думал, что уравнениям Эйнштейна можно было доверять в таких экстремальных случаях».

В конце 1970-х гг. русские и американские физики додумались, как решить проблему горизонта, не отказываясь ни от локальности, ни от теории Эйнштейна. Идея состоит в том, что эти две галактики на противоположных сторонах нашего неба (или на самом деле их предшественники) фактически *когда-то* находились рядом, но их оттащило друг от друга, когда Вселенная переживала свой ранний скачок роста. Таким образом, некий процесс мог бы сделать их похожими. Как близнецы, разлученные при рождении и выросшие, даже не зная о существовании друг друга, галактики когда-то ютились рядом, но развивались независимо друг от друга и только теперь снова воссоединяются.

Чтобы это объяснение имело смысл, скачок роста должен был растаскивать галактики со скоростью, превышающей скорость света, так, чтобы они потеряли контакт друг с другом до настоящего момента. Обычно слова «со скоростью, превышающей скорость света» звучат для физиков как скрип ногтей



Два корабля на океанском горизонте



Две галактики на космическом горизонте

1.3. Проблема космологического горизонта. Мы можем видеть оба корабля на горизонте в океане даже тогда, когда они не могут видеть друг друга (*верхняя часть рисунка*). Если эти две галактики никогда не контактировали друг с другом, что могло сделать их такими похожими? (Иллюстрация Джен Кристенсен)

по меловой доске. Но рост космоса обходит обычные ограничения на скорость перемещения, потому что ни о каком перемещении речи не идет. Скорее это новое пространство образуется в промежутках между галактиками, почти как животное или растение развивается, создавая новые клетки. Поскольку галактики фактически не перемещаются в пространстве, ограничение скорости к ним не относится. «Если вы смотрите на две галактики, они остаются на месте, но расстояние между ними меняется, — объясняет Мизнер. — Если считать это относительной скоростью, то в ранний период относительная скорость двух скоплений вещества сильно превышала скорость света. Таким образом, они не могли видеть друг друга». Это

не единственная ситуация, в которой можно превысить максимальную скорость за счет роста вместо перемещения. Предположим, вы находитесь на большой танцевальной вечеринке, и все начинают выстраиваться в линию для танца конга. Если несколько десятков человек будут присоединяться к ней каждую секунду, то концы линии могут удаляться друг от друга со скоростью больше 90 км/ч, хотя ни один человек не способен перемещаться так быстро.

Расстояние между галактиками может увеличиваться со скоростью больше, чем скорость света, даже тогда, когда Вселенная расширяется в обычном темпе. Однако в таком случае скорость расширения со временем снижается, и галактики в конце концов снова могут контактировать. Скачок роста необходим, чтобы галактики могли родиться вместе, а затем *потерять* контакт.

Большинство космологов считают эту концепцию, известную под названием «инфляция», столь изящной и убедительной, что обычно преподносят ее так, будто это установленный факт. В 2014 г. команда наблюдателей объявила, что они обнаружили верные признаки следов инфляции в микроволновом излучении*: возмущения, связанные с механизмом скачка роста. Комментаторы были осторожны и использовали стандартные оговорки («если это правда»), но явно сочли этот результат реальным — они так долго ожидали его. Тем не менее открытие обернулось пшиком несколько месяцев спустя, вновь разжигая сомнения, которые высказывали даже некоторые из авторов теории инфляции. Основное беспокойство вызывает то, что инфляционная теория предполагает наличие того самого условия, которое она должна породить: чтобы Вселенная начала расширяться, она уже должна была быть неестественно однородной. Поэтому некоторые физики искали альтернативы инфляции, среди которых была не только *видимость* нелокальности, но и настоящая нелокальность.

* Речь идет об обнаружении поляризации реликтового излучения вихревого типа, которое могло возникнуть благодаря рожденным на инфляционном этапе реликтовым гравитационным волнам. — *Прим. науч. ред.*

Один из скептиков инфляции — это Фотини Маркопоулоу. Я познакомился с ней на конференции в честь Уилера, где она поделила первое место в конкурсе подающих надежды физиков. Меня поразило ее мнение о том, что физические теории должны исходить из того, что мы — часть Вселенной, а не сторонние наблюдатели. «Меня реально интересует одно — это идея о том, что вы находитесь внутри Вселенной, которую пытаетесь понять, и *можете* понять ее, — говорит она мне. — Есть любопытная взаимосвязь между тем, что вы находитесь внутри системы, которую пытаетесь изучить, и тем, что вы способны делать вид, что это не так. В каком-то смысле к этому и сводится наука». Все области науки чувствуют это противоречие между взглядом изнутри и извне, но хуже всего оно в космологии, единственной сфере науки, изучающей систему, у которой вообще нет внешней стороны.

Маркопоулоу говорит, что глобальная картина мира увлекала ее с ранних лет. «Ребенком я любила заходить в церковь, когда там было пусто, садиться и просто смотреть в потолок, — вспоминает она. — В греческих православных церквях он, в сущности, похож на планетарий. Там на потолке картины на тему космологии. Именно это всегда казалось мне захватывающим. Есть что-то поразительное в том, что человек пытается представить целостную картину того, чему он сам принадлежит». Было бы легко напрямую связать ее детское изумление с карьерой физика, но Маркопоулоу против такого удобного изложения событий. Кроме этого она любила искусство — ее родители были скульпторами, — а также археологию и архитектуру. Она не знала, какую специализацию указать в заявлении о приеме в колледж. Когда директор ее средней школы предложил теоретическую физику, Маркопоулоу указала теоретическую физику. В колледже один из друзей восторженно отзывался о курсе лекций по квантовой механике, и оказалось, что это как раз по пути домой, так что она зашла послушать.

«Я не читала книг об Эйнштейне и решила продолжить с того места, на котором Эйнштейн остановился, — говорит она. — В итоге на разных этапах, когда приходилось определяться, куда пойти, я выбирала теоретическую физику».

Похожим образом она не сразу выбрала свой предмет: объединение квантовой теории и теории гравитации с целью создания квантовой теории гравитации. Вместо этого, будучи студенткой и в первый год аспирантуры, Маркопоулоу изучала физику элементарных частиц. Однако курсовая работа оставила у нее чувство неудовлетворенности. «Странно, когда в программе подготовки физиков изучению квантовой теории уделяется недостаточно внимания», — вспоминает она. Ее однокурсники и преподаватели отвергали объединение как несбыточную мечту, да и ей самой поначалу тоже так казалось. Через некоторое время, впрочем, она стала думать, что мечтать — это нормально. Хотя ответы на загадки космоса могли быть недостижимыми для физиков, по крайней мере исследователи квантовой гравитации стремились найти их. «Когда вы задаете интересные вопросы вроде “Почему это так?”... всегда кажется, что на самом деле не следовало их задавать, — говорит Маркопоулоу. — Люди, которые работали над этими интересными вопросами, занимались квантовой гравитацией». В конце концов соблазн стал слишком велик, чтобы сопротивляться. Если Гиддингс стремился объединить физику через теорию струн, то Маркопоулоу примкнула к сообществу физиков, которые применяют альтернативные подходы, чтобы примирить гравитацию с квантовой теорией. В отличие от струнных теоретиков, эта группа не стремится объединить строго всю физику, с ее огромным разнообразием частиц и взаимодействий, а концентрируется на гравитации.

Маркопоулоу сделала имя на том, что изучила, подчиняются ли различные предлагаемые квантовые теории гравитации принципу локальности, и показала, что большинство из них ему не подчиняется. Принято считать, что такие аномалии должны быть заметны только на очень малых масштабах, даже

меньших, чем атом, но Маркопоулоу сомневается, что нечто столь глубокое может быть ограничено такими узкими рамками. «С самого начала, когда я занялась квантовой гравитацией, интуиция подсказывала мне, что, возможно, квантовая гравитация на самом деле проявляет себя на больших масштабах, поскольку меняется нечто фундаментальное», — говорит она. Маркопоулоу подозревает, что согласованность развития удаленных галактик может быть таким проявлением. Единобразие космоса может быть третьим типом нелокальности, очень явным. Несколько струнных теоретиков думают примерно так же. «Проблема горизонта — это нелокальность, находящаяся прямо у нас под носом», — говорит Маркопоулоу.

Частицы в подвале

В случаях нелокальности, о которых я говорил до сих пор, пространство не справлялось со своей самой базовой функцией — отделять предметы друг от друга, оставлять место между ними. Запутанные частицы координируют свое поведение, не обмениваясь сигналами в пространстве. Вещество попадает в черную дыру и умудряется выбраться обратно из пропасти в пространстве. Галактики, разделенные непреодолимой бездной пространства, выглядят сходным образом. Эти явления создают по меньшей мере впечатление нелокальности. Но в качестве четвертого, и заключительного, примера я хотел бы упомянуть вещи местами и рассмотреть явление, которое создает впечатление локальности, но может в конечном счете оказаться нелокальным.

Физики обычно считают, что мир состоит из частиц: электронов, протонов и всех остальных субатомных физических созданий. Частицы — само воплощение локальности. Эти небольшие песчинки материи существуют в определенных местах. Они взаимодействуют друг с другом, только соударяясь или испуская частицу-посредника, которая перемещается между ними. Квантовая запутанность может заставить части-

цы быть нелокально согласованными, но она не меняет основную картину. И все же понятие локализованных частиц оказывается неуклюжим и даже противоречит само себе.

Если вы думаете, что частицы являются далеким и абстрактным понятием, то их поразительно легко можно увидеть своими глазами. Однажды вечером я спустился к себе в подвал с пластиковым стаканом, формочкой для кекса из фольги, бутылкой медицинского спирта и одним из тех аэрозольных баллончиков, которыми пользуются, чтобы удалить крошки с клавиатуры компьютера. Вдохновленный простотой экспериментов, которые я наблюдал у Гальвеза, и слишком большим количеством просмотренных серий «Секретного агента МакГайвера»*, я решил создать из этих предметов домашнего обихода детектор частиц. Если распылить аэрозоль из баллончика больше одной-двух секунд, он может стать очень холодным — достаточно холодным, чтобы заставить пары алкоголя, находящиеся под перевернутой формочкой для кекса, конденсироваться вдоль траектории заряженных частиц, создавая что-то вроде крошечного инверсионного следа самолета.

Я работал над этой неуклюжей конструкцией в течение нескольких недель, безуспешно пробуя различные схемы, и в конечном счете объединив несколько идей, создал устройство проще некуда. Именно это и есть наука: часы, проведенные в расстройстве, перемежающиеся мгновениями восторга. Когда мой небольшой прибор наконец заработал, я увидел, как короткие белые полоски выдавали присутствие заблудших субатомных частиц, проносящихся через мой дом. Иногда их следы резко изгибались, что, возможно, указывало на столкновение двух частиц. Моя жена была счастлива, что я не разобрал стиральную машину.

Пластиковый стакан для коктейлей был миниатюрной версией гигантских детекторов частиц на Большом адронном кол-

* MacGyver — американский телесериал (1985–1992) о секретном агенте, который часто выбирался из экстремальных ситуаций, используя смекалку и подручные средства. — *Прим. пер.*

лайдере (БАК). Я побывал там летом 2007 г., когда строительство установки было близко к завершению. Я проехал на лифте 40 этажей вниз и вошел в подземный зал, достаточно большой, чтобы вместить целый собор. Он был напичкан оборудованием. Что внушало благоговейный страх больше всего, так это не размер аппарата, а огромное число кабелей для передачи данных. Приблизительно 2900 км этих проводков текли через зал, как миллионы притоков могучей реки. Прямо в центре проходит металлическая трубка, которая по ширине едва вмещает пару пальцев. Когда коллайдер работает, потоки протонов проносятся через нее, как велосипедисты в пелотоне. Некоторые из них сталкиваются, разбрасывая обломки по всему подземному залу.

С конца 1940-х гг. физики изображали столкновения частиц в виде контурных рисунков, называемых диаграммами Фейнмана в честь их изобретателя, лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана. Его метод чрезвычайно действен и точен. Но еще и безжалостно труден. Диаграммы выглядят просто, но они всего лишь маскируют математическую позиционную войну. Цви Берн, преподаватель физики Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, который специализируется на этих вычислениях, говорит, что он поступил в аспирантуру, очарованный элегантностью метода Фейнмана, но вскоре опробовал его на собственной шкуре. «Я хорошо помню тот раз, когда впервые получил домашнее задание по курсу физики элементарных частиц, — говорит он. — Меня поразило, что кто-то действительно мог делать вычисления по диаграммам Фейнмана, не совершая ошибок. Это задание было не таким уж сложным по сравнению с тем, что вычисляют профессионалы, но после 20 страниц алгебраических выкладок я совершенно не понимал, как профессионалы делают это, не ошибаясь».

Эти вычисления вызывают тоску по двум причинам. Во-первых, при столкновении частиц огромно разнообразие потенциальных исходов. Например, столкновение двух глюо-

нов — составных частей протонов, циркулирующих в БАК, — может привести к рождению какого угодно числа глюонов, от двух до бесконечности. Во-вторых, каждое из этих потенциальных конечных состояний может быть получено путем огромного разнообразия возможных промежуточных стадий. Например, два сталкивающихся глюона могут породить четыре глюона 220 различными способами, даже если не считать те обходные пути, которые они могли бы выбрать в процессе. Уравнения, которые получаются в итоге, содержат десятки тысяч алгебраических членов. И это еще простой случай. Пожалейте тех, кто рассматривает случай с восемью глюонами в конечном состоянии, поскольку они должны учесть 10 млн возможных промежуточных шагов. Даже компьютеры быстро доходят до предела своих возможностей.

Никто не идет в физику элементарных частиц, надеясь, что это будет легко. Наоборот, многих студентов этот предмет привлекает именно своей сложностью. Но если вы проходите через все это, то рассчитываете обнаружить нечто, окупающее ваши усилия. Но оно не обнаруживается. Эти десятки тысяч слагаемых в конечном счете сокращаются всего до четырех. Остальные взаимно уничтожаются. Слагаемое номер 2718 может, при ближайшем рассмотрении, оказаться таким же, как слагаемое номер 3142, но со знаком «минус» перед ним, поэтому они оба сокращаются. К сожалению, нельзя сказать заранее, какие слагаемые сократятся, так что нужно выписывать их все. Процедура кажется извращенно бессмысленной, немногим лучше исписывания доски в качестве наказания после уроков в школе. Несоответствие между трудностью вычислений и простотой ответа свидетельствует о том, что физики что-то упускают, как капитан полиции, который задерживает простых подозреваемых и не замечает парня с пистолетом в руке.

Однорूपники Берна выбросили из головы это адское домашнее задание, но он так и не смирился с ним. Он полагал, что должен существовать более удобный способ выполне-

ния этих вычислений, и с головой погрузился в его поиски. Это было не самое умное решение в карьерном плане. Большинство физиков считали подобные вычисления работой подмастерья: полезной, но не требующей воображения. Потенциальные работодатели не посещали доклады Берна; один журнал отклонил его первую статью на эту тему как «не очень интересную». Прорыв произошел, когда Берн сделал доклад в Принстоне, и Виттен, известный струнный теоретик, благодаря которому Гиддингс передумал уходить из физики, подошел к нему после доклада, чтобы похвалить. После такого знака внимания Берн наконец получил работу. По его словам, такой опыт освобождает от юношеских романтических представлений о науке. «Наука делается не так, как я думал, — говорит он. — Я открыл, что в науке удача должна быть на вашей стороне».

Благодаря усилиям Берна и его коллег физикам больше не нужно выписывать те десять с лишним тысяч алгебраических членов, а можно сразу перейти к конечным четырём. Но почему старые методы были настолько неудачны и почему эти новые методы работают так хорошо? Другой теоретик, Нима Аркани-Хамед в Институте перспективных исследований в Принстоне, видит причину в нелокальности. Физики-теоретики известны силой характера, но Аркани-Хамед — это стихия. Он родился в Хьюстоне в 1972 г. Несколько лет спустя его отец, видный иранский геофизик, перевез семейство обратно в Тегеран, чтобы помочь в строительстве новой страны после падения шаха. Идеализм семейства быстро рассеялся. Они слишком часто критиковали аятолла, начали скрываться, чтобы избежать ареста и вероятной расправы, и спаслись бегством через турецкую границу верхом на лошадях.

Многие физики говорят, что они «взволнованы» тем или иным открытием. Но говорят это так безэмоционально, что нельзя не удивляться: если они ведут себя так, когда взволнованы, насколько ужасно должно быть, когда им скучно. Аркани-Хамед, напротив, говорит о самых простых вещах с таким воодушевлением, что кажется, он только что открыл потерянный

ковчег Завета. Однажды он заставил меня восхищаться тем, что строка «1, 2, 3» может быть переписана как «3, 1, 2» или «2, 3, 1», демонстрируя, как много в физике сводится к тщательному подсчету возможных перестановок. Я помню, как стоял рядом с ним в перерыве конференции с чашкой кофе (похоже, всегда в его присутствии пьют много кофе), когда разговор превратился в стремительный внутренний диалог, в котором Аркани-Хамед давал сам себе ответы, в то время как остальные все еще пытались понять вопросы: «Я сделал это, я попробовал то, но это не сработало, но — о, погодите, возможно дело в том, — значит, мм, интересно, следует ли мне...»

«Физика никогда в жизни не внушала мне большего энтузиазма, — выпалил он, когда я впервые поинтересовался новыми методами вычисления. — Происходит что-то действительно захватывающее, я думаю, это могло бы в конечном счете изменить наши представления как о пространстве-времени, так и о квантовой механике... Все это стремительно развивается прямо сейчас благодаря группе порядка 15 человек во всем мире, работающих над этим день и ночь». В 2013 г. их усилия увенчались созданием полноценной альтернативы диаграммам Фейнмана.

Аркани-Хамед считает, что проблема диаграмм Фейнмана в их нарочитой локальности. Они изображают частицы взаимодействующими друг с другом в определенных положениях в пространстве и времени. Диаграммы выглядят обнадеживающе похожими на следы частиц, которые они оставляют в детекторе вроде пластикового стакана у меня в подвале. Именно поэтому физиков и привлек подход Фейнмана. И все же трясина вычислений создает этому свойству диаграмм дурную славу. Локальность напрямую ответственна за появление огромного количества алгебраических членов в расчетах. «Раз вы настаиваете на том, что теория локальна, — говорит Аркани-Хамед, — то в наказание получаете десяток тысяч слагаемых». Считая каждую точку пространства строго независимой от всех остальных, метод Фейнмана преувеличивает

сложность мира. Большая часть того, что появляется на диаграммах, не существует в реальном мире, например «виртуальные» частицы и «духовые» поля. Теоретикам приходится вводить специальные правила, чтобы убедиться, что эти незваные гости не останутся на десерт.

Вместо того чтобы считать локальность отправной точкой, Аркани-Хамед, Берн и их коллеги предполагают, что частицы удовлетворяют определенным законам симметрии, и в результате уравнения получаются намного более простыми. Частицы все равно подчиняются принципу локальности, единственная разница в том, что эта теория получает локальность из более глубоких соображений, вместо того чтобы требовать ее в качестве предварительного условия. Такой подход сочетает скромность с великим замыслом. Эти теоретики не намеревались создавать новую теорию частиц, а просто хотели оптимизировать уже существующую. Их уравнения не предсказывают ничего экзотического, а только облегчают описание того, что мы уже знали.

Исторически такие переформулировки были чрезвычайно существенными. Это обнажает один замечательный факт о теориях в физике. Они не являются фиксированными структурами, а обладают своего рода неизъяснимым бытием за рамками любого конкретного набора уравнений, которыми физики пользуются для их описания, подобно истории, допускающей пересказы с весьма различными обстоятельствами и персонажами, но все равно безошибочно узнаваемой, или музыкальному произведению, которое можно аранжировать по-новому, подчеркнув незамеченные прежде особенности или, наоборот, лишив несущественной мишуры. Пожалуй, самый знаменательный случай такой переформулировки произошел, когда Николай Коперник поместил Солнце, а не Землю в центр Вселенной. В то время его модель была не более чем математической переформулировкой старой геоцентрической системы, и астрономы приняли ее в качестве упрощенного способа составления календарей и схем движения планет. Однако новое

представление о космосе вызвало вопросы, которые были бессмысленны при старом. Что заставляет брошенные предметы падать? Орбиты планет должны быть круговыми или они могут быть продолговатыми? Может ли космос быть бесконечным? Работа Коперника, возможно, не была революционной, но она побуждала к революции.

Как видите, лень приносит свою пользу. Люди, которые пытаются уменьшить объем работы, являются движущей силой нововведений. Аркани-Хамед надеется, что заново сформулированная теория частиц вернет к жизни поиск объединенной теории физики. Как только вы перестаете предполагать, что мир вращается вокруг локальности, все начинает вставать на свои места.

Какой принцип должен заменить локальность? Если мир в действительности не состоит из локализованных частиц, то из чего он *все-таки состоит*? Пока никто не знает. Но теперь у физиков есть направление дальнейшей работы. Если Эйнштейн опасался, что нелокальность приведет к коллапсу современной физики, то Аркани-Хамед считает, что она знаменует ее возрождение. «В детстве именно это и представляешь, когда думаешь о том, что значит заниматься теоретической физикой», — говорит человек, который на самом деле так и остался ребенком.

Как мы видим, нелокальность вылезает повсюду: в экспериментах в квантовой области, в парадоксах черных дыр, в крупномасштабной структуре Вселенной, в водовороте столкновений частиц. Во всех этих примерах физика заходит в сумеречную зону. Объекты могут обгонять свет; причина и следствие могут меняться местами; расстояние может терять свой смысл; два объекта могут на самом деле быть одним. Вселенная становится пугающей.

Хотя эти виды нелокальности появляются в разных контекстах, они обладают удивительной схожестью, которая подска-

зывает, что физики ощупывают разные части одного и того же слона. Аркани-Хамед, например, считает, что тот тип нелокальности, который появляется в его теории, может включать в себя квантовую запутанность. «Нельзя исключать того, что должное понимание этих вещей приведет к новому толкованию квантовой механики, а не только пространства-времени, — говорит он мне. — Не исключено, что в этом новом видении может быть какое-то новое представление о смысле запутанности». Это работает и в обратную сторону. Гиддингс и другие ученые думают, что квантовая запутанность может быть тем клеем, который скрепляет пространство. Связи между запутанными частицами даже могут создавать что-то вроде тайных туннелей между пространством внутри черной дыры и пространством вне ее. В следующих главах мы рассмотрим эти завораживающие идеи.

«Сорванная крыша» — профессиональное заболевание в физике. Это профессия, где цель — смотреть за декорации и видеть мир, который проще, чем кажется, и очень далек от нашего повседневного опыта. Впрочем, физики и философы сталкиваются с такими загадками не впервые. Во многом история локальности — это история физики в целом.





Истоки нелокальности

Что же такого особенного в нелокальности? Почему ученые не могут отправить нелокальность на ту же свалку, где лежат флогистон, вихревая модель атома и другие красивые гипотезы, убитые прозой жизни? Почему нелокальность побуждает к таким мелодраматическим выпадам, как «конец рациональности физики», «несовместимо с самой возможностью научной деятельности», «чепуха»? Понятно, что нарушение локальности — это не то, что постоянно встречается в водовороте идей, не то, от чего можно отшутиться за пивом после работы. Чтобы понять, почему это так, нужно погрузиться в историю физики, поскольку нелокальность угрожает самой сути того, что мы понимаем под физикой.

Физика не похожа на другие науки. Если вы попросите геологов, биологов или астрономов дать определение своему предмету, они могут показать на скалы, ползучих тварей или мерцание в ночном небе. Физики же начинают показывать на все вокруг; они неразборчивы. С равным успехом их можно увидеть за изучением способов укладки белков в биологии, колебаний финансовых рынков и столкновений крошечных частиц. Их дисциплина больше определяется целями, чем предметом изучения. На чем бы они ни сосредотачивались, физики ищут простоту в сложности и единство в многообразии. Как и фило-

софами, их интеллектуальными собратями, ими движет убежденность в том, что Вселенная подвластна человеческому пониманию и что, если смотреть дальше ее разнообразия и запутанности, можно обнаружить понятные правила.

Опять же, как и философы, физики обращаются к истории за подсказками, каковы должны быть эти правила и, как следствие, их дисциплина. Физики обладают репутацией самых дальновидных ученых, настолько опережающих технологическую кривую, что это они *создают* эту кривую. Физики могут законно считать своей заслугой почти каждый имеющийся у нас гаджет. И все же, мне кажется, они смотрят в прошлое не меньше, чем в будущее. Для них обычное дело — сослаться на разработки, сделанные столетия назад, или углубиться в чтение биографии какой-нибудь знаменитости в предположении, что нельзя продвинуться вперед, пока не узнаешь, как ты попал туда, где находишься сейчас.

И действительно, общие стандарты простоты и понятности оставались для физиков удивительно постоянными на протяжении веков. Их интеллектуальные предшественники в Древней Греции стремились описать Вселенную как гигантскую игру в бильярд. Шары — базовые элементы мира — летают повсюду, соударяются друг с другом и отскакивают в бесконечной цепной реакции. Эти взаимодействия строго локальны: до касания шары не воздействуют друг на друга. Хотя по отдельности они просты, шары и их соударения настолько многочисленны, что порождают богатое разнообразие и сложность мира. В какой-то мере авторы такого описания не имели права ожидать, что оно отразит хоть какую-то часть реальности. В течение последующих тысячелетий описание полностью поменялось в деталях, но его основные принципы сохранились. В особенности принцип локальности.

Несомненно, даже древние греки были хорошо знакомы с исключениями из этого принципа. Они еще не знали ни квантовых частиц, ни черных дыр, но им было известно о других эффектах, которые казались нелокальными, в част-

ности те явления, которые мы теперь связываем с гравитацией. Но древние не придавали исключениям большого значения. Большинство из них полагали, что примеры видимой нелокальности были просто ложным впечатлением, и ждали, пока какой-нибудь умный человек объяснит их локально происходящими процессами. Отказ от локальности был бы эквивалентен отказу от физики.

Озадачивает, однако, то, что Исаак Ньютон поступил именно так. Чтобы объяснить гравитационные явления, он отказался от физики, по крайней мере от того, что было физикой в то время. Благодаря этому его помнят как самую великую фигуру Революции в науке, интеллектуальной закваски XVII в., из которой появилась наука в том виде, в каком мы знаем ее сегодня. И реакция, которую первоначально вызвала теория гравитации Ньютона, поразительным образом похожа на то беспокойство, которое выказывают в связи с нелокальностью.



Франс ван Люнтерен, историк науки из Лейденской обсерватории в Голландии, которая является одним из самых легендарных научных учреждений в Европе, вспоминает, насколько он был встревожен, когда узнал о законе тяготения Ньютона. Школьный учитель объяснил, что яблоки падают и планеты держатся около Солнца, потому что все во Вселенной притягивает все остальное. По представлению Ньютона, эта сила действует на расстоянии мгновенно. Поднимите палец на Земле, и все далекие планеты во Вселенной немедленно вздрогнут (слегка). Сила притяжения перескакивает от Земли к яблоку и от пальца к планетам, минуя пространство между ними.

Именно это показалось ван Люнтерену очень странным, когда он был подростком. «Мне было трудно понять, как глыба грубой материи — скажем, скала — могла влиять на какую-то другую материю в глубине космоса, особенно когда пространство в промежутке между ними пустое», — говорит он. Но ван Люн-

терен решил, что если он не понял этого, то по причине собственного недомыслия. «Для меня было вполне привычно упускать суть чего-нибудь», — признается он. Только повзрослев, он узнал, что эта странная особенность силы гравитации известна под названием «нелокальность».

В то время ван Люнтерен не интересовался историей. Он бросил ее, чтобы сосредоточиться на математике и физике. Но в колледже уроки физики его разочаровали. Они состояли из сплошных уравнений, на них не было места рассказу о том, что именно означали все эти x и y на самом деле. «Большинство преподавателей начинали с дифференциального уравнения в верхней левой части доски и затем выводили из него поперечное сечение или какую-нибудь другую измеримую величину в правой нижней части доски, не желая рассказывать о физике ничего интересного», — вспоминает он. Ван Люнтерен стал прогуливать занятия, вместо них он читал французские и русские романы, подрабатывал, путешествовал автостопом в Стамбул. В своих интеллектуальных исканиях он узнал о странных квантовых явлениях, которые так беспокоили Эйнштейна. Когда ван Люнтерен вновь почувствовал тягу к студенческой жизни, оказалось, что его привлекает история. Он увидел в ней способ изучения глубоких интеллектуальных вопросов, которые игнорировались его преподавателями физики. Как и философ Тим Модлин, ван Люнтерен понял: чтобы любить физику, ему нужно ее оставить.

В поисках темы для докторской диссертации он вернулся к нелокальности ньютоновской силы тяготения, которая привела его в замешательство в подростковом возрасте. Ван Люнтерен обнаружил, что не случайно был озадачен — те, кто слепо принял теорию, упустили суть. Нелокальность не давала покоя самому Ньютону, как, впрочем, и его коллегам. Она казалась псевдонаучной, вроде астрологии или чудодейственных лекарств. Один французский математик жаловался: «Мы снова свергнуты в древнюю тьму». Ван Люнтерен говорит: «Мне бы помогло, если бы наш школьный учитель добавил, что многие



великие современники Ньютона сочли эту идею трудно перевариваемой и даже непостижимой». Так что свою диссертацию он посвятил тому, как ученые пытались оправдать ньютоновское дальное действие.

В конечном итоге ученые не были ввергнуты во тьму. Они переключились. Поколение, выросшее с ньютоновской гравитацией, считало эту теорию абсолютно естественной. В течение многих тысячелетий естествоиспытатели отмахивались от нелокальности, а в XVIII в. они приняли ее. Проще говоря, они были за локальность до того момента, когда стали против нее. И как только ученые привыкли к ньютоновской нелокальности, произошел еще один поворот на 180 градусов — новое поколение вернулось к мысли о том, что мир должен быть (просто обязан быть) локальным, тем самым поставив нас в затруднительное положение.

Механистическая Вселенная

Эти исторические перипетии начались с одной из самых известных встреч в истории западной мысли, с события, которое было бы здорово увидеть своими глазами, вернувшись в прошлое, имей мы машину времени. Согласно рассказу Платона, в 451 или 450 г. до н. э. Парменид, ведущий философ того времени, и его самый известный ученик Зенон отправились в Афины из своего родного города Элея в южной Италии. Они остановились в доме выдающегося политического деятеля сразу за городскими стенами. Однажды к ним заглянул не кто иной, как подающий надежды молодой афинский философ Сократ.

Само понятие философии (как в Греции, так и во втором месте ее зарождения, Китае) существовало тогда всего лишь на протяжении жизни нескольких поколений. Это был принципиально новый способ понимания того, что происходит в мире. В повседневной жизни, когда мы спрашиваем «почему?», цель обычно заключается в том, чтобы узнать побудительные при-

чины, заставившие человека сделать то, что он сделал. Традиционная мифология распространяла этот образ мышления и на мир природы. Почему произошло землетрясение? Потому что Посейдон рассердился на осквернение его храма. Такие объяснения не проводят различия между локальностью и нелокальностью. Иногда боги действуют нелокально (они могут щелкнуть пальцами и добиться своего), а иногда они действуют локально (отправляют посланника, чтобы вершить свою волю). Для мифологии это незначительная деталь.

Философы были теми, кто считал эти рассказы, завязанные на персонажах, неудовлетворительными. Даже если допустить существование Посейдона, как он мог вызвать землетрясение? Какие правила определяли его возможности? Философов не волновал повод — они хотели знать механизм. Категории локальности и нелокальности приобрели новое значение. Естественнно-исторические объяснения, как правило, локальны. По опыту вы знаете, что передвинуть что-то силой воли невозможно — для этого нужно подойти и приложить усилие или отправить кого-то, чтобы он сделал это за вас. Первый философ, которого мы знаем по имени Фалес, предположил, что землетрясения происходят потому, что суша плавает в под-земном океане как неустойчивая лодка, иногда покачиваясь туда-сюда. Причина напрямую связана со следствием.

Но локальность вызывала у Парменида тошноту. Он был не так уж уверен в том, что мы можем доверять повседневному опыту, и в том, что можно разделить мир на части и постигать его кусочек за кусочком. Защищая этот тезис перед Сократом в Афинах, Зенон утверждал, что локальные понятия, такие как движение, изменение и индивидуальность, приводят к логическим парадоксам. В истории сохранилось девять таких парадоксов; десятки других, возможно, затерялись в веках. Самым глубоким и оказавшим самое большое влияние был парадокс абсолютной делимости. Если некоторый объект можно разделить на две части, затем на четыре, на восемь и так до бесконечности, то в конечном итоге он будет состоять

из геометрических точек, каждая из которых не имеет размера. Когда вы захотите собрать этот предмет обратно, вы столкнетесь с проблемой, поскольку никакое число точек, не имеющих размера, не составит в целом что-то, имеющее размер. Из этого Зенон делал вывод, что действительность на самом деле нельзя разделить на части.

Сократ жаловался, что все это было выше его понимания. Доводы Зенона «отрицают самоочевидную вещь», как писал один греческий философ более позднего периода. Но именно поэтому они вызывали такое сильное беспокойство. Утверждать, что ничто не состоит из более мелких кусочков, казалось безумием, однако рассуждения выглядели основательно. В том доме в Афинах Парменид и Зенон положили начало интеллектуальному кризису. В течение многих десятилетий после этого люди проезжали пол-Греции, чтобы своими ушами услышать споры, которые за этим последовали.

Современные математики считают, что Зенон был в целом прав: что-то теряется, когда вы делите непрерывный объект на бесконечно малые части. Число геометрических точек в континууме неисчислимо — в буквальном смысле неисчислимо. И если вы не можете посчитать их, то не можете и сложить вместе. Наша обычная интуиция, подсказывающая, что целое является суммой своих частей, здесь не работает. У континуума нет никакого присущего ему масштаба; размер набора точек не получается из размера каждой точки, он должен определяться отдельно. «Одно из толкований парадоксов Зенона состоит в том, что в принципе невозможно получить физический масштаб из континуума», — говорит физик-теоретик Фэй Даукер из Имперского колледжа Лондона.

Хотя физики примирились с континуумом, многие все еще считают эту идею нарушающей порядок. Великий физик Ричард Фейнман писал: «Меня беспокоит, что, согласно физическим законам, как мы понимаем их сегодня, компьютеру требуется бесконечное число логических операций для расчета того, что происходит в любой сколь угодно крошечной

области пространства за любой сколь угодно крошечный период времени. Как все это может происходить в такой крошечной области пространства? Почему должно требоваться бесконечное количество логических операций для выяснения того, что будет происходить с одним крошечным кусочком пространства/времени?»



•

Затруднения такого рода заставили многих греческих философов предположить, что материя не бесконечно делима, но состоит из дискретных строительных блоков. Атомисты как в воду глядели. Когда читаешь их записи, которые сохранились до наших дней, кажется, что это учебник физики для первокурсников в стихотворной форме. Педанты могут фыркнуть и сказать, что античные атомы были совсем не похожи на современные, но общая концепция устройства мира, разработанная Демокритом и другими философами в V в. до н. э., была удивительно близка к той, которая сложилась в современной физике. Все, что происходит в природе, утверждали атомисты, получается из формы, движения и пространственного расположения крошечных строительных блоков. Они верили, что все чувства, которыми мы наслаждаемся, — вкус, цвет, запах — порождаются потоками атомов, которые извергаются объектами и сталкиваются с нашими телами. Вид предметов буквально лезет в глаза, горечь пронзает язык.

Понятие пространства придумали атомисты. Они были первыми философами, которые утверждали, что материи необходимо место, чтобы в нем существовать и перемещаться. Один из преемников Демокрита, Лукреций, писал: «Вот почему несомненна наличность пустого пространства: /Без пустоты никуда вещам невозможно бы вовсе /Двигаться было»*. Пространство определяет положение, скорость, размер и форму

* Лукреций Кар Т. О природе вещей. — Здесь и далее пер. Ф. Петровского.

атомов. Оно бесконечно во всех направлениях и заполнено неисчислимым разнообразием миров. Эта космологическая картина, радикальная для своего времени, оказалась решающей в конечном триумфе атомизма.

Если бы атомы были атлетами, а пространство — игровой площадкой, локальность играла бы роль свода правил. Как и современные физики, атомисты различали два аспекта локальности. Во-первых, пространство отделяет атомы друг от друга и обеспечивает каждому из них индивидуальность. Это принцип делимости, который Эйнштейн считал важнейшим для физики и который квантовая физика, похоже, нарушает. Во-вторых, пространство диктует, как атомы влияют друг на друга. Атомисты полагали, что атомы взаимодействуют только при прямом контакте. Пока атомы не столкнутся, они движутся в пространстве по прямым траекториям, независимо от присутствия друг друга. Это ранняя версия принципа локального действия, который Эйнштейн формализовал в своей теории относительности. Он позволяет объяснять любое событие как результат более ранних событий.

Атомисты не приводили никаких реальных доводов в пользу локальности. Они даже не выдвинули ее как предварительную гипотезу, которую нужно подтверждать в экспериментах, — у них еще не было понятия эмпирической науки. Вместо этого они сочли локальность очевидной истиной, поскольку воздействие тел друг на друга на расстоянии разорвало бы причинно-следственную связь событий. Это сделало бы Вселенную непостижимой.

•

Атомизм был первой «теорией всего». Несмотря на ряд пробелов, едва ли существовало жизненное, погодное или небесное явление, которому атомисты не придумали бы объяснения. Они были основоположниками механистической картины мира, представления о Вселенной как о часовом механизме.

Современные термины, такие как «квантовая механика», отражают это наследие. Безусловно, сам Демокрит не думал о машинах, эта аналогия появилась столетия спустя, когда машины стали более привычным явлением. Когда философы и ученые говорят о механизме, они всего лишь имеют в виду систему взаимосвязанных элементов, а не хитрую конструкцию, собранную с некоторой целью. То, что атомы делают, дает им предназначение, не наоборот. Отдельные атомы безжизненны, безвольны и неодушевлены. Если один из них перемещается, то только потому, что другой атом был этому причиной. Такое отсутствие цели и смысла оттолкнуло большинство современников Демокрита. Платон хотел сжечь его книги. По сей день физика создает у многих людей — даже у физиков — впечатление холодной, абстрактной, бесчеловечной науки.

Возможно, так и есть. Но она также раскрепощает нас. Атомизм вышел за рамки человеческого опыта. Старые мифологические толкования объясняли землетрясения эмоциями: одно сложное явление — другим сложным явлением (да и можно ли считать это объяснением?). Это не более чем перекладывание ответственности. Настоящее объяснение должно разбивать что-то на более простые части и показывать, как они взаимодействуют, чтобы получилось это что-то. Кому захочется вернуться к *мьльной опере* греческой мифологии, в которой города разрушались и голод обрушивался на земли из-за любовных походов Зевса? Как отмечал литературный критик Стивен Гринблатт в своей книге «Ренессанс»*, получившей Пулитцеровскую премию, последователи Демокрита создали полностью атеистическую философию в духе «живи сегодняшним днем», в которой люди сами создают смысл своей жизни. Лукреций писал: «Природа свободной /Сразу тебе предстает, лишенной хозяев надменных, /Собственной волею всё без участия богов создающей».

* Гринблатт С. Ренессанс: У истоков современности. — М.: АСТ, 2013.

Самый известный философ античности нашел компромисс между атомистами и их хулителями. Насколько мог видеть Аристотель, мир кишит жизнью, и жизнь имеет смысл, следовательно, логично предположить, что неодушевленные предметы также служат какой-то цели. Яблоко падает в направлении центра Земли, потому именно там оно и должно быть, согласно великому замыслу. Его движение самопроизвольно и не требует внешней причины. Аристотель также вернулся к идее о том, что звездами и планетами управляют одни законы, а яблоками и стрелами — другие. А еще он отверг утверждение атомистов о том, что объекты состоят из неделимых частей. Несмотря на парадоксы Зенона, Аристотель думал, что материя непрерывна, и разработал сложную теорию континуума, которая превосхитила современную математику. Свойства объектов не могут сводиться к расположению атомов.

Аристотель питал отвращение к пустоте. Объекты, по его замыслу, соединяются друг с другом как кусочки пазла без каких-либо пустот между ними, и положение данного объекта определяется относительно соседних объектов, а не какой-то абстрактной структуры, существующей независимо от материи. Поскольку даже «пустое» пространство уже набито всякой всячиной, свет не может быть потоком атомов, перемещающихся в пространстве от яркого объекта к нашим глазам. Вместо этого Аристотель считал, что свет — это импульс, передающийся через среду. Яркий свет передает энергию среде непосредственно рядом с собой, и волна преобразования распространяется через пространство непрерывным движением, как легкая волна на поверхности пруда. Ни одна частица не перемещается; вместо этого каждый маленький кусочек среды передает импульс следующему — как дети, играющие в игру «испорченный телефон». Современники Аристотеля в Китае также представляли мир в виде непрерывной среды, *ци*.

Если уж на то пошло, образ мыслей Аристотеля в большей степени соответствовал наблюдениям, чем атомизм. Тем не менее Аристотель не пытался давать определенных предска-

заний, которые могли бы подтвердить или опровергнуть его теорию. Как и Демокрит, прежде всего он стремился сделать Вселенную постижимой.

Несмотря на все отличия, теория Аристотеля позаимствовала многие существенные черты атомизма, включая локальность. Мир рассматривался в ней как система объектов, взаимодействующих исключительно при соприкосновении. Чтобы объект отклонился от своего естественного направления движения, что-то должно толкнуть его. Аристотель писал: «Непосредственный фактор изменения положения тела должен либо соприкоснуться, либо образовывать непрерывное целое с перемещаемым объектом, согласно нашим наблюдениям, дело всегда обстоит именно так». Так же, как и атомисты, Аристотель пытался разработать теорию пространства. С его точки зрения, наличие положения было определением существования; отсутствие такового — определением небытия. Он писал: «То, что не существует, нигде не находится. Где, например, находится полукоза-полуолень или сфинкс?»

Хотя Аристотель писал, что локальность верна всегда, он приводил несколько исключений. Эти аномалии известны со времен Фалеса, который отметил один из многих странных камней на нашей планете, естественный магнит, и его способность притягивать кусочки железа. В одной из областей в северной Греции, известной как Магнисия, были крупные месторождения этого минерала, благодаря чему появилось название, под которым мы знаем такие материалы сегодня: магниты. Фалес также восхищался янтарем, кусочек которого, если энергично потереть его о ткань, заставляет волосы вставать дыбом. По-гречески янтарь — *elektron*, отсюда произошло слово «электрический». Китайские ученые обнаружили эти явления примерно в то же самое время, однако они быстрее своих западных коллег нашли магнетизму практическое применение.

Греки не могли объяснить, как магнетит и янтарь влияли на объекты, которых они не касались. Хуже того, это влияние

заключалось в притяжении. В мире, где воздействие происходит только при прямом контакте, объекты взаимодействуют только одним способом: они сталкиваются друг с другом и отскакивают, как бильярдные шары. Они отталкивают, не притягивают. Попытка объяснить, как отталкивание переходит в притяжение, поставила философов в тупик. Атомисты думали, что эти вещества испускают пары, которые вытесняют воздух вокруг них, создавая область низкой плотности, в которую устремляется окружающий воздух, увлекая железо или волосы за собой. Аристотель решил эту проблему проверенным временем способом: проигнорировал ее.

Магнетизм и статическое электричество были не единственной головоломкой. Наблюдались также явления, причиной которых в наши дни считается гравитационное притяжение, такие как падение тел, океанские приливы и движение планет по орбитам. Аристотель не видел между ними связи. С его точки зрения, падение — это просто привычка тел, приливы происходят из-за ветров, порождаемых солнечным теплом, а планеты катятся по гигантским вращающимся прозрачным сферам. Атомисты связывали эти явления воедино и объясняли их структурой Солнечной системы. По их мнению, потоки частиц кружатся в космосе, создавая вихри, в которых скапливаются планеты, как груда листьев, попавших в речной водоворот. Если тело не поспевает за круговым потоком, окружающие частицы подталкивают его внутрь. «Упасть» — значит быть увлеченным в сторону центра вихря. Говоря кратко, тяготение — это не сила притяжения, как потом стали думать ученые; это прямое физическое воздействие, толчок сверху.

•

Теория Аристотеля имела вес в буквальном смысле: в переводе на английский сохранившиеся до наших дней труды занимают 6000 страниц. Греко-римские ученые и ученые исламского мира основывались на его работах, но бóльшая их часть была потеряна или забыта на фоне общего угасания европей-

ской интеллектуальной жизни в начале Средних веков. Никаких крупных достижений в понимании локальности не было на протяжении еще двух тысячелетий. Европейские писцы начали заново открывать Аристотеля в XII в., причем окольными путями, через латинские переводы с арабского, и это знание настолько затмевало все известное им, что, должно быть, походило на энциклопедию, забытую на Земле пришельцами из более развитой цивилизации. Они расшифровали и перевели эти 6000 страниц, а потом на протяжении веков анализировали их, критиковали и увязывали с христианскими верованиями — эта деятельность получила название «схоластика». Все, что интересовало Аристотеля, интересовало и их. Аристотель считал, что пространство играет важную роль, поэтому и они думали, что пространство играет важную роль. Аристотель придерживался принципа локальности, поэтому и они придерживались принципа локальности. Они полагали, что даже Бог не мог избежать локальности, хотя этот принцип в его случае был чисто теоретическим: Бог существовал всюду, следовательно, он автоматически был в прямом контакте со всем. «Никакое воздействие, каким бы могущественным оно ни было, не совершается на расстоянии, кроме воздействий через среду, — писал выдающийся философ-схоласт Фома Аквинский. — Но это свойственно великой силе Бога, Он напрямую воздействует на все вещи. Следовательно, ничто не находится далеко от Него».

Однако чем больше ученые вдумывались в теорию Аристотеля, тем больше разочаровывались, поэтому они расширили масштабы своей деятельности от восстановления идей Аристотеля до их усовершенствования. То, что Аристотель не объяснял магнетизм и статическое электричество, было заметным слабым местом. В конце 1500-х гг. английский врач Уильям Гильберт (который позже служил личным врачом королевы Елизаветы I) показал, что магнит притягивает железный брусок, даже если поместить между ними что-то, создающее препятствие любым предполагаемым парам или посредникам.

Казалось неоспоримым, что магниты воздействуют на расстоянии. Гильберт никак не мог найти естественного объяснения и склонялся к сверхъестественному: магнит «похож на живое существо», и он притягивает железо в процессе «соития».

Аристотелева космология также казалась многим сомнительной. Разве Вселенная могла быть конечной по размеру и ограничиваться гигантской вращающейся прозрачной сферой? У такой сферы не было бы внешней точки отсчета, чтобы определять ее вращение. В начале 1500-х гг. именно эта несогласованность вдохновила Николая Коперника поместить Солнце, а не Землю в центр Солнечной системы. С его космической заменой вся Аристотелева система начала рушиться. Аристотель говорил, что тела падают вниз, потому что таково направление к центру Вселенной. В гелиоцентрической системе мира это уже неверно. Таким образом, Коперник создал стимул для альтернативного объяснения тяготения. Поскольку центр Вселенной больше не задавал направление движения тел, Вселенная могла не иметь центра вообще. Она могла быть бесконечной в полном соответствии с основополагающим принципом атомизма. Заново открыв также работы Лукреция, многие ученые сообразили: устройство космоса было доказательством существования атомов. Это был не последний раз, когда философы и физики узнавали о малом, изучая большое.

Атомизм достиг расцвета во времена Рене Декарта в середине XVII в. Сегодня Декарта помнят как автора утверждения «Я мыслю, следовательно, существую» и Декартовых координат, используемых на миллиметровке. Но это всего лишь два элемента грандиозного проекта — попытки превзойти самого Аристотеля. Декарт писал другу: «Я решил объяснить все явления природы, т. е. всю физику». И он преуспел: его теория была первой за 2000 лет новой теорией всего, которая могла претендовать на такую же всесторонность, как и Аристотелева. Декарт полностью объединил систему мира Коперника с механистической философией, и его идеи послужили манифестом Революции в науке.

Декарт подчеркивал различия между собственной теорией и классическим атомизмом, возможно, чтобы обосновать свою претензию на новизну, но преемственность очевидна. Мир состоит из частиц, взаимодействующих в пространстве. Тело не имеет непостижимых врожденных свойств или склонности искать свое законное место во Вселенной, как полагал Аристотель. Это просто геометрическая фигура. У нее есть размер и форма, но нет цвета, текстуры или массы. Зная всего несколько чисел (Декартовы координаты), чтобы указать положение тела, вы знаете о нем все, что только можно знать. Едва ли все могло быть проще.

Целью Декарта была постижимость: сделать тайны природы абсолютно прозрачными. Локальность была необходима для достижения этой цели. Тела взаимодействовали строго локально: они двигались свободно и прямолинейно, пока не столкнутся одно с другим; только тогда они изменяли направление движения. Как Демокрит и Аристотель, Декарт не предложил серьезных доказательств этого принципа. «Такие вещи не требуют доказательств, потому что они очевидны сами по себе», — писал он. В повседневной жизни нам приходится дотрагиваться до предметов, чтобы заставить их совершить что-то, и Декарт предположил, что контактное воздействие определяет и все остальное во Вселенной. Проблема заключалась в том, что это не так. Декарт проделал такую тщательную работу по применению принципа локальности, что ненамеренно показал степень его несостоятельности.

Например, Декарт поддерживал старое атомистическое представление о тяготении как о толчке сверху. В его теории планеты находятся в центре космических воронок, вихревые движения которых направляют частицы в сторону их центра. Что касается объяснения того, почему движения планет согласованы между собой, то в представлениях Декарта было много правды. Он почти правильно описывал форму Солнечной системы и предвосхитил современные теории формирования планет. Но его теория была ошибочна в деталях. Помимо мно-

гих других недостатков она подразумевала, что тела должны падать в направлении оси вращения Земли, где вихревые движения исчезают, а не к ее геометрическому центру. Если бы это было правдой, то яблоко, брошенное недалеко от Северного полюса, «падало» бы вбок, а не прямо вниз. Что касается магнетизма и статического электричества, то Декарт объяснял их частицами в форме крошечных винтов или рычагов. Об этой идее можно сказать лишь то, что она достойна приза за изобретательность.

Был ли механистический взгляд на Вселенную в целом правильным и требующим лишь кое-каких уточнений? Или его надо было отбросить? Это дилемма, с которой ученые борются всякий раз, когда натываются на исключения из какой-нибудь теории. Рассудительные люди не соглашаются с ним, но ответ очевиден только в ретроспективе, да и то далеко не всегда. В данном случае на кону было куда больше, чем одна теория. Бросить вызов механистической теории и ее центральному допущению о локальности означало бросить вызов науке вообще. Если допустить ее несостоятельность, значит ли это признать, что мир неподвластен разумному осмыслению? В некотором смысле удивительно, но ответ — «да». Чтобы «починить» механистическую теорию, участники Революции в науке должны были выйти за пределы самой науки: в область волшебства.

Волшебство в механицизме

Если в школе вы что-то и узнаете о науке, то это знание ограничивается тем, что наука — противоположность волшебства. Начиная с Древней Греции философы и ученые пытаются открыть людям глаза на безумства, в которые они верят: гомеопатия, гороскопы и гадания — это если взять только слова на букву «г». Но как тогда объяснить тот факт, что многие из величайших ученых в истории потратили кучу времени на занятие магией? Ньютон устроил алхимическую лабораторию в сарае в саду и собрал одну из лучших библиотек в мире по этой теме.

Я не проводил серьезного исследования, но большая часть знакомых мне ученых увлекались сверхъестественным в какой-то момент своей жизни. Я сам прошел через это в колледже, где читал все подряд о внетелесном опыте, что только мог найти, а позже узнал, что даже Ричард Фейнман увлекался этим. В одном известном учреждении, называть которое не буду, я вошел в исследовательскую группу по похищениям пришельцами, организованную аспирантами и докторами наук. Много «похищенных» пришло в университетский городок, чтобы рассказать свои истории. Если уж на то пошло, мы *хотели*, чтобы нас убедили, но в итоге большинству так и не хватило доказательств.

Ну, никто из нас не идеален — так обычно ученые интерпретируют этот интерес. Но в середине XX в. историки науки поняли, что магические идеи были слишком распространенными, чтобы списать их на порывы юности или слабоумие конца карьеры. Некоторые дошли даже до утверждения, что современная наука в равной мере продукт магии и механицизма. Именно эти два эмоциональных импульса движут исследователями: восхищение невероятным и стремление пробиться через бакалавриат.

Большинство из нас ассоциируют магию с волшебными палочками и преподавателями зельеварения, издевающимися над своими учениками, но на самом деле это целая мистическая система взглядов. В западной культуре самые влиятельные системы — неоплатонизм, герметизм и гностицизм — возникли во II и III вв. н.э. как ответная реакция на ортодоксальную греко-римскую религию, в которой, как казалось некоторым, слишком много разума и мало сердца. Эти системы, которые смешивались с ранним христианством и еврейской мистической традицией каббалы, вернулись к более древним идеям, таким как представление Парменида о единстве природы и отвращение Платона к механистическим объяснениям. Они сохраняют влияние по сей день.

Приверженцы этих учений отошли от центрального принципа механистической философии, который гласит, что Все-

ленная в конечном счете проста и постижима. Они рассматривают космос не как часовой механизм, сделанный из неодушевленных деталей, но как органическое единство за пределами нашего понимания. За той действительностью, которую мы наблюдаем, находится скрытый, или «окульти- ный», уровень, который не является ни простым, ни пости- жимым. Объекты обладают необъяснимыми свойствами и возможностями, которые проникают на этот более глубо- кий уровень и которые можно использовать, изобретая заклин- ания и зелья. В одном из основных европейских руководств по магии времен Ренессанса Корнелиус Агриппа объяснял: «Их называют скрытыми свойствами, потому что их при- чины покрыты тайной и человеческий интеллект не может каким-либо образом постичь и узнать их». (Имя Агриппы должно показаться знакомым поклонникам Гарри Потте- ра: он появлялся там в качестве знаменитости на карточке из шоколадной лягушки.)

Нелокальность была важной частью этих верований. Запу- танная сеть связей объединяет вещи, которые могут казаться несвязанными. Мелочи могут влиять на что-то большое; находящееся в одном месте может влиять на то, что находится в другом месте. Эти нелокальные влияния действуют в опреде- ленной мере как человеческие эмоции: части Вселенной бук- вально нравятся или не нравятся друг другу, создавая всепро- никающую сеть симпатий и антипатий. Один из первых антро- пологов, изучавших магические верования, Джеймс Фрезер, в 1911 г. описал два основных принципа: «Во-первых, подобное создает подобное, или результат напоминает свою причину; и, во-вторых, вещи, которые когда-то находились в контакте, про- должают действовать друг на друга на расстоянии после того, как физический контакт прекратился». Такие влияния кажутся самим определением сверхъестественного, но Агриппа думал, что они абсолютно естественны, и считал их нашей мимолет- ной возможностью узреть лежащее в основе всего единство физического мира. В качестве доказательства он и другие при-

верженцы таких взглядов эпохи Возрождения приводили те явления, которые вызвали трудности у философов-механицистов, в том числе магнетизм и океанские приливы, наряду с другими идеями, в которые в те времена верили почти все (включая ведущих философов), в частности с алхимией, астрологией и нумерологией.

Магические идеи звучат фантастически для современных ученых, но, откровенно говоря, многие из моделей, выдвинутых механицистами, такими как Демокрит и Декарт, звучат так же. В обоих случаях, что важно в долгосрочной перспективе, так это образ мыслей в целом. Механицистические модели придают особое значение понятности мира, магические — ее таинственности. Механицистические модели являются редукционистскими, магические — холистическими. Исторически западная культура колебалась между этими дополняющими друг друга точками зрения. Магический взгляд на мир очаровывает сладостью запретного плода, затем теряет свою привлекательность, когда люди начинают задаваться вопросом, чем они занимаются, и снова заинтересовывает, когда рационалисты становятся самонадеянными и утверждают, что они могут очистить мир от тайн, и это продолжается по сей день. Этот цикл был движущей силой научных революций, и некоторые историки видят его следы в споре Бора — Эйнштейна, полагая, что Эйнштейн свидетельствует в пользу, того, что Вселенную можно постичь умом, а Бор — в пользу того, что в конечном счете она непостижима.

•

Одно из периодических возрождений магического мышления произошло в XV в. После того как ученые переписали и перевели древние философские труды Аристотеля, Лукреция и других, они обратились к древним текстам неоплатонистов и герметистов. Такие толкователи, как Агриппа, ухватились за них, как за возможность отдохнуть от старых педантичных схоластических методов.

Две особенности магии заполняли пробелы механистической философии. Во-первых, она была эмпирической. В те времена эксперименты не занимали важного места в господствующей философии. И старомодные схоласты, и такие реформаторы, как Декарт, думали, что они могли разрешить загадки Вселенной просто путем размышлений. Странники магии считали, что природа не поддается здравому смыслу. Чтобы исследовать ее тайны, нужно купить пробирки и заняться делом. Те, кто практиковал магию, стремились не только изучать, но и управлять природой, чтобы сделать мир лучше. Именно они в значительной мере определили идеализм Ренессанса. В «Речи о достоинстве человека» (*Oration on the Dignity of Man*) Джованни Пико делла Мирандола, философ 20 с небольшим лет от роду, герметик и каббалист, утверждал, что статус человека происходит не из нашего положения в глобальной схеме вещей, но из того, что мы сами решаем думать о себе. За такое замечательное мнение папа римский арестовал его. Среди тех, кого вдохновил Пико, был Шекспир. В монологе Гамлета «Какое чудо природы человек!» используется поразительно похожий язык, а волшебник-утопист является главным героем шекспировской «Бури».

Потенциальные волшебники сильно ошиблись в целях, которые они себе ставили. Алхимики не могли превратить свинец в золото, астрологи не могли предсказать судьбу королей, зельевары не могли излечить хандру мочой зеленой ящерицы. Но, как пел Джон Леннон, жизнь — это то, что происходит, пока вы строите другие планы. Алхимики и астрологи разработали передовые экспериментальные методы (например, герметичные затворы) и собрали множество экспериментальных данных, заложив основы современной химии, медицины и астрономии. Склонность магии к эмпиризму и идеализму служила примером для пионеров современной экспериментальной науки, которые, как ученые всех эпох, считали себя мятежниками. Англичанин Фрэнсис Бэкон писал: «Цель магии состоит в том, чтобы вернуть естественную философию из тщеты предположений к важности экспериментов».

Второе полезное влияние магии состояло в том, что она заставила философов перестать ограничивать себя рамками механицизма. Она предполагала, что объекты могут взаимодействовать иными способами помимо столкновений друг с другом, а именно нелокальными способами. Понятие гравитации происходит от магического понятия симпатий: тела падают, потому что они ищут другие подобные себе тела. Земля не разлетается на куски, потому что камни притягиваются друг к другу. Это магическое прошлое явно проступает в работах астронома Иоганна Кеплера в начале 1600-х гг. Его книги похожи на посты в блоге. В них он признается в том, что пошел по ложному следу, сделал смелый шаг или впал в кризис неуверенности в себе. Он не был сторонником академической строгости: «Горе мне, здесь я оплошал» — больше похоже на него. И он был откровенен относительно влияния мистики на свой образ мыслей. Кеплер зарабатывал на жизнь составлением гороскопов, и, хотя сомневался в том, что ему или любому другому астрологу под силу предсказать конкретные события, он считал очевидным, что движения небесных тел управляют земными событиями. Он утверждал, что, если бы Луна состояла из воды, как в основном считали люди в то время, она естественным образом притягивала бы земные океаны и вызывала бы приливы. Магнетизм, который также считался магической силой, мог бы оказывать корректирующее влияние на орбиты планет.

Пуристы механицизма восприняли его без сочувствия. Галилео Галилей думал, что Кеплер перешел на темную сторону, «соглашаясь с владычеством Луны над водами, с тайными свойствами и прочим ребячеством». Идеи Кеплера отошли на периферию господствующей философии на полвека, пока Ньютон не понял, как тот был прав.

•

Один историк назвал Ньютона «великой амфибией». Он был и механицистом, и сторонником магии. Как и многие его

современники, особенно в Англии, Ньютон был в целом согласен с механистической теорией Декарта, но его отрезвляли ее недостатки. Помимо трудностей с объяснением движения небесных тел, представление Декарта о Вселенной как о часовом механизме было на волоске от атеизма. Зачем нужен Бог, если чудеса природы сводятся к бездумному скрежету шестеренок и пружин? Хотя Декарт оставил роль для Бога в своей модели, убедительностью она не отличалась — это был просто фиговый листок, придуманный, чтобы агенты папы не постучались в дверь. Другие видные атомисты, прежде всего Томас Гоббс, отбросили притворство и объявили себя ярыми атеистами. Для их соотечественников в Англии это переходило все границы. Они были приверженцами религии как интеллектуально, так и из чувства самосохранения.

Чтобы привести атомизм в согласие с религией, Ньютон и другие английские философы в середине 1600-х гг. соединили его с идеями, позаимствованными у алхимии, неоплатонизма и каббалы. Они думали, что частицы могут побуждаться «активными принципами» или «тонкими духами», как выразился Ньютон. На практике частицы могли воздействовать нелокально и реагировать на такие воздействия. Силы дали Вселенной некую божественную искру; хотя они и не являются духами в буквальном смысле, но свидетельствуют о Божественном замысле.

Так что если гравитация кажется волшебной, то это потому, что она действительно волшебна. Теория, которую Ньютон изложил в 1687 г. в своем основном труде «Начала», была все же по большей части механистической: мир состоит из движущихся частиц, подчиняющихся строгим законам. Но она впитала магическую идею о том, что эти частицы связаны сетью нелокальных сил. Концепция тяготения Ньютона отличалась от своих магических предшественников тем, что, согласно ей, тяготение было глобальным: оно не ограничивалось телами, у которых есть явное средство друг к другу (у камня к камню, у воды к воде), а заставляло притягиваться друг к другу все, у чего есть

масса. Она также отличалась от ортодоксальных механистических моделей в том, что, согласно ей, масса — это не геометрическое свойство, но что-то вне компетенции редуccionистского объяснения.

Для историков эта сага — великолепный пример для исследования того, как опасно проводить черту между наукой и ненаукой. Гильберт, Коперник, Бэкон, Кеплер и Ньютон, как и ученые всех времен, были интеллектуальными сороками, которые вили свои теории из любых попадававшихся клочков. Чем ярче клочок, тем оригинальнее гнездо. Вы можете отличить творческих ученых по эклектичным взглядам. Или, как выразился один теоретик: «Все хорошие физики предаются интеллектуальному разврату». Не то чтобы это можно было узнать из большей части научных книг и статей. Подобно подросткам, которые клянутся, что их родители никогда ничего не делали для них, ученые склонны перенимать идеи из других источников, а затем отрицать, что они совершили нечто подобное. Магия? Какая магия? Кто говорил что-либо о магии? Но современники Ньютона точно знали, откуда пришли его идеи, и последователи Декарта не собирались принять это без боя.

Гравитационные войны

7 марта 1693 г. известный немецкий философ Готтфрид Лейбниц написал Ньютону письмо, поздравляя его с новой теорией гравитации, которая ловко объяснила все те явления, которые атомисты безуспешно пытались объяснить: падение тел, приливы, движение планет. С ее эмпирическим успехом невозможно было поспорить. Но Лейбниц хотел знать, чем объясняется тяготение. Следуя за Демокритом и Декартом, он думал, что нелокальность гравитации должна быть иллюзией. Если посмотреть достаточно близко, наверняка можно было увидеть какой-то локальный механизм, который заставляет брошенные тела падать, а планеты обращаться вокруг Солнца. Каким еще образом мир мог иметь смысл?

Лейбниц писал письма так же, как мы пишем имейлы. За свою жизнь он отправил 15 000 писем 1100 адресатам. И по сей день их еще не полностью занесли в каталоги. Это были не какие-нибудь записки в одну строчку, многие представляли собой обширные эссе, которые открывали целые новые области науки и математики. Как сегодняшние измотанные электронной почтой работники, Лейбниц жаловался на перегруженность информацией. «Я не могу даже выразить, насколько это меня отвлекает и не дает сосредоточиться», — писал он другу.

Лейбниц никогда не встречался с Ньютоном, но в течение нескольких десятилетий он и его соотечественники вели с Ньютоном и его соотечественниками дебаты в письмах. Они достигли наивысшей точки в пяти раундах переписки между Лейбницем и английским философом Сэмюелом Кларком, переписки, которая оборвалась только с кончиной Лейбница в 1716 г. К тому времени первоначальная любезность переросла в войну. Их письма богаты идеями, но, когда я читал их, меня поражало то, что Лейбниц и Кларк почти не пытались найти общий язык; каждый из них вновь и вновь отстаивал свою позицию, не давая своему противнику права на презумпцию невиновности. Справедливости ради заметим, что разногласия относительно такого фундаментального вопроса, как природа пространства, невозможно было разрешить улыбкой и рукопожатием, поскольку люди не соглашались даже в том, что могло бы считаться их удовлетворительным разрешением.

Для Лейбница и других критиков теории Ньютона такое разрешение не могло появиться без механистического объяснения. Оставляя вопрос без объяснения, Ньютон показывал, что гравитация была не просто не объяснена, но и необъяснима — это волшебный фокус, который мы никогда не сможем понять. Лейбниц писал Кларку: «Этот способ взаимодействия (говорит он) является невидимым, неосознаваемым, не механическим. С таким же успехом можно добавить, что он необъясним,

непонятен, сомнителен, не обоснован и беспрецедентен... Это химера, схоластическая оккультная величина».

Ньютон открыто признавал, что не знает, как действует тяготение: «Я не смог обнаружить причину таких свойств тяготения, наблюдая за его проявлениями, и у меня нет никаких гипотез». Он в общем соглашался с насмешкой Лейбница над тем, что гравитация «оккультна» — вызвана скрытыми причинами, — но не думал, что это имело какое-то значение. Вы можете не знать, какова причина тяготения, но, если просто принять ее существование, почти все известные о Вселенной факты становятся понятными, и этого вполне достаточно.



Следуя за Ньютоном, современные физики считают, что у любой теории есть две отдельные функции. Во-первых, теория должна обеспечивать математическое описание: это формулы, которые позволяют вычислять, как быстро падает яблоко, когда произойдет солнечное затмение и т. п. Во-вторых, теория должна обеспечивать «интерпретацию» формул, т. е. давать убедительную картину того, что происходит с яблоком или Луной. Для Лейбница и большинства других философов до Ньютона вторая функция была первостепенной. Их основная цель состояла в том, чтобы сделать Вселенную постижимой. Но когда пришел Ньютон, преимущество получила первая функция. Если вам приходится выбирать между описанием и объяснением, физики считают, что лучше иметь описание. Смирившись со своим невежеством, вы вольны двигаться вперед небольшими шажками. Вы можете придумать объяснение позже, а пока вам достаточно удобных формул, которые убеждают вашу маму в том, что вы тратите свою жизнь на что-то полезное.

Современные физики называют интерпретацию «философской» задачей, подразумевая, что она предполагает другой умственный настрой или вообще другую академическую дисциплину. Они проводят рабочее время за вычислениями.

ми и, бывает, не могут подобрать слова, когда их спрашивают, что на самом деле происходит там, в реальном мире. Если уж на то пошло, интерпретация, с их точки зрения, сомнительна. Настойчивый поиск объяснения вынудил атомистов предложить хоть какую-то идею, только чтобы иметь простое, постижимое представление о мире. Так, может, лучше сосредоточиться на том, что мы действительно знаем: на наблюдаемых фактах? «Нет ничего более необходимого для истинного философа, чем усмирить неумное желание поиска причин», — писал видный сторонник таких взглядов, шотландский философ XVIII в. Дэвид Юм.

В своем крайнем выражении такая позиция известна как инструментализм, который рассматривает теории всего лишь как математический аппарат или инструментарий для того, чтобы каталогизировать факты. «Молчи и считай» — лозунг инструменталистов.

Это сугубо деловое, основанное только на фактах видение науки то входит в моду, то выходит из нее. Широко распространенное в десятилетия после Ньютона оно стало популярным снова в середине XIX в. и снова в начале-середине XX в. И не случайно — это были периоды революций в науке. Когда физики внедряют какую-нибудь спорную теорию, они часто, как это делал Ньютон, уверяют своих коллег (и самих себя) в том, что это действительно только инструмент для вычислений. Не можете уразуметь, почему теория истинна? Ну и ладно — в нее не обязательно верить, чтобы ею пользоваться. Немного инструментализма помогает радикальной идее стать принятой.

Хотя в конечном счете инструментализм — это всего лишь тактическое отступление. В конце концов большинство людей все же жаждет получить представление о том, на что действительно похожа Вселенная, что находится под поверхностью нашего восприятия. В самом деле, разве физические теории могут работать так хорошо, если в них нет хоть какой-то доли истины? Молодые люди в особенности расстраиваются, когда

преподаватели советуют им не загружать свои симпатичные маленькие головки тем, что происходит на самом деле. Немало самых передовых ученых в истории говорят, что они изучили выбранный ими предмет самостоятельно, потому что никто не хотел преподавать его во время учебы.

Более того, интерпретация — это не только наведение лоска на уже существующие уравнения, но и творческая искра науки. В конце концов, как физики изначально придумывают уравнения? Почти всегда у них есть определенное представление о физическом мире: в случае Ньютона — магические симпатии. Как только физики разработают уравнения на основе этих представлений, они могут отбросить интерпретацию и позволить уравнениям жить самостоятельно, точно так же как Ньютон дистанцировался (по крайней мере публично) от магии. У любого конкретного набора уравнений есть многочисленные интерпретации, так что физики не обязаны посвящать себя той, что привела их к созданию уравнений. Они вольны предлагать новые интерпретации, какие-то из них приведут к появлению новых теорий и новых уравнений, и, таким образом, цикл продолжится. Но они никогда не смогут обходиться без интерпретаций вообще. Нет четкой границы между философскими и физическими задачами, есть только проницаемая граница с перетоком идей в обе стороны.

•

Действительно, несмотря на клятвенные заверения Ньютона в том, что он не строит гипотез относительно работы тяготения, на самом деле они у него были: три широкие гипотезы, каждая из которых приобрела своих сторонников. Во-первых, возможно, гравитация все-таки задействовала какие-то локальные, механические процессы. На первый взгляд этот вариант кажется обреченным на неудачу. Закон Ньютона, в соответствии с которым сила тяжести зависит от массы объекта, конечно, отправляет его в нокаут. Если единственный способ, которым частицы оказывают силовое воздействие, — это

столкновение, то влияние должно зависеть от площади внешней поверхности (от того, насколько большую мишень представляет собой объект), а не от массы. И все же Ньютон продолжал перебирать механистические идеи, и один из его лучших друзей, швейцарский математик Никола Фатио де Дюильер, придумал оригинальное решение проблемы массы. Если бы наша планета походила на гигантский тренировочный мяч для гольфа, пронизанный крошечными порами, то частицы снаружи могли бы попасть внутрь и столкнуться с веществом глубоко внутри, и тогда сила действительно зависит от общего количества вещества, т. е. от массы. Эта теория не смогла завоевать популярность не столько из-за своих недостатков, сколько из-за ошибок Фатио: в конечном счете он умудрился восстановить против себя и Ньютона, и Лейбница и связался с группой яростных религиозных фанатиков.

Во-вторых, возможно, существовал какой-то другой способ локального взаимодействия тел помимо столкновений, который приводил к возникновению силы тяготения. Ньютон и Кларк писали о «нематериальном», «бестелесном» или «неосвязаемом» посреднике, который мог выступать в качестве проводника, передавая тяготение от одного объекта другому. У этих слов есть разные коннотации, например связанные с Богом или духами, но по самой своей сути они всего лишь означают нечто, не состоящее из частиц и не подчиняющееся обычным атомистским правилам заполнения пространства. Материальные частицы непроницаемы; если одна из них занимает некоторый объем пространства, ничто другое не может занять тот же самый объем. Но нематериальный посредник не занимает объем пространства эксклюзивно; он может делить его с другими объектами. Таким образом он может проникать внутрь планет, что объясняет, почему сила притяжения зависит от массы, а не от площади поверхности. Лейбниц, со своей стороны, разработал теорию нематериальных сущностей, называемых «монадами» и лежащих в основе нашей наблюдаемой действительности. Хотя он так и не смог свя-

зять свои монады с чем-либо, что можно наблюдать непосредственно, философы более позднего периода, такие как Иммануил Кант, подхватили это понятие, и через них идеи Лейбница способствовали появлению концепции электрического и магнитного поля.

Ньютон был очень близок к пониманию того, что нематериальный посредник, способный к передаче тяготения, — это само пространство. Для него пространство было проявлением вездесущности Бога. У него был такой же взгляд и на тяготение: сила перескакивает от одного места к другому потому, что Бог уже существует в обоих местах. Если гравитация и пространство связаны с вездесущностью Бога, то гравитация и пространство связаны друг с другом. Лейбниц также неявно связывал тяготение со свойствами пространства. Он думал, что его монады дают начало нашему восприятию как пространства, так и дальнего действия. Безусловно, ни Ньютон, ни Лейбниц не говорили, что пространство было причиной тяготения. Никто из них не думал, что пространство было способно к действию. Этот скачок совершил Эйнштейн.

В двух вышеупомянутых интерпретациях говорится, что гравитация действует так, *как будто* она нелокальна. В третьей интерпретации слово «как будто» отбрасывается и предполагается, что тела действительно притягиваются друг к другу, минуя пространство. Одним из первых сторонников такого варианта был Роджер Котс, английский математик, который помог Ньютону переработать «Начала» для второго издания в 1713 г. Некоторые историки полагают, что и сам Ньютон склонялся к идее нелокальности. Трудно сказать, так ли это. В одном очень часто цитируемом письме Ньютон вроде бы назвал нелокальность «невообразимой... нелепостью», но, если прочитать цитату в контексте, она, возможно, относилась к атеизму. В других трудах он беззаботно упоминал нелокальные силы в связи с большим количеством явлений помимо тяготения, включая отражение и преломление света, диффузию пара, давление газа, когезию материалов и теп-

ло. Ньютон так и не признался, что считает гравитацию нелокальной, но, возможно, потому, что не хотел отвращать от себя механицистов-пуристов еще больше, чем раньше.

•

Те, кто вырос в десятилетия после издания «Начал», считали силы, действующие на расстоянии, абсолютно приемлемыми. С известными исключениями ученые XVIII в. не чувствовали потребности призывать на помощь какие-либо локальные объяснения или придумывать инструменталистские оправдания. Они распространили принципы тяготения на другие примеры нелокальности, которые омрачали физику. Бенджамин Франклин, например, дал Америке место на научной карте, объяснив электричество как жидкость из притягивающихся и отталкивающихся частиц, которые неявным образом обладали свойствами нелокальности. Другие предполагали, что такие жидкости существуют в случаях магнетизма, химических реакций и многого другого.

Фактически общепринятая система взглядов повернулась на 180 градусов. Теперь *локальность* начала казаться неприемлемой. Оставим на время гравитацию, электричество и магнетизм — даже казалось бы простое соударение двух бильярдных шаров заставляло людей в смятении расшибать лбы. Почему шары отскакивают друг от друга? Главные сторонники локальности, такие как Демокрит, Декарт и Лейбниц, сами задавались этим вопросом. Когда шары соприкасаются, это все еще два шара или они становятся единым целым? Как воздействие распространяется от места удара до противоположной стороны каждого шара? Действительно ли шары делают мгновенный разворот, который означал бы бесконечно быстрое изменение скорости?

Кант кое-что понимал в бильярде. Главный немецкий философ XVIII в. играл настолько хорошо, что выигрыши помогали ему оплачивать учебу в колледже. Кант был ключевой фигурой, способствовавшей тому, чтобы доньютоновские представ-

ления о локальности были преданы забвению. Его занимал в основном анализ того, каким образом мы знаем то, что знаем, или думаем, что знаем. Локальность была примером знакомой идеи, которая при более внимательном рассмотрении оказывается сомнительной. В повседневной жизни мы замечаем, что нам нужно коснуться объекта, чтобы заставить его двигаться. Но на самом деле мы никогда ничего не касаемся. Скорее мы прилагаем к нему силу, а он прилагает силу к нам. Эти силы объясняют то сопротивление, которое мы чувствуем, когда сжимаем мяч или пытаемся просунуть руку сквозь твердую стену. Знакомые нам объекты на самом деле представляют собой по большей части пустое пространство. Когда мы говорим «о материи», речь идет о континууме сил, а не о составляющих ее частицах, которые всегда остаются для нас недоступными.

Изначальная привлекательность локальности была в том, что единственный способ взаимодействия — непосредственный контакт — мог объяснить все. Когда Ньютон добавил второй способ — нелокальные силы, — сначала казалось, что он все усложняет, но Кант и другие объяснили непосредственный контакт и восстановили прежнюю простоту. Если посмотреть на соударение двух бильярдных шаров в замедленном воспроизведении, то вы увидите не резкий отскок, а постепенное изменение направления движения. Когда шары сближаются, они прилагают друг к другу силу отталкивания, которая замедляет их, останавливает и отправляет обратно в том направлении, откуда они прибыли. Фактически шары никогда не вступают в непосредственный контакт. Если раньше философы-механицисты стремились объяснить нелокальные силы локальными взаимодействиями, то теперь они сводили локальные силы к нелокальным взаимодействиям.

Ньютоновское тяготение с трудом получило признание в этом мире, но потом стало новым общепринятым понятием. В 1872 г. австрийский физик и философ Эрнст Мах описал этот поворот событий. Он утверждал, что ученые объясняют явле-

ния, связывая незнакомое со знакомым, необычное с общепринятым. «Общепринятое» может в действительности быть не более понятным, чем необычное. Это видно, когда пятилетний ребенок спрашивает, как работает обычный бытовой прибор, а мы мешкаем с ответом. Нам проще принять это. В конце концов, мы должны принять *что-то* в качестве нижнего уровня действительности, и оно должно быть тем, с чем мы можем жить. Мах писал: «Самые простые факты, к которым мы сводим более сложные, всегда непостижимы сами по себе, т. е. их нельзя понять еще лучше... Люди обычно сводят незаурядные непостижимости к общепринятым».

Но то, что мы считаем «общепринятым», может меняться. До Ньютона это был непосредственный контакт. После него общепринятыми стали считаться нелокальные силы. «Ньютоновская теория тяготения, когда она только появилась, смущала почти всех исследователей физического мира, потому что была основана на незаурядной непостижимости, — писал Мах. — Люди пытались свести тяготение к давлению и столкновениям. В наши дни тяготение больше никого не беспокоит; оно стало *общепринятой* непостижимостью». Какая ирония: еще до того как Мах написал эти слова, маятник уже качнулся в обратную сторону, и физики снова приходили к идее о том, что Вселенная все-таки должна быть локальной.

Сомнения в сэре Исааке

Возрождение локальности началось в 1786 г. с мертвых лягушек, свисающих с железных перил. Итальянский врач Луиджи Гальвани проводил эксперименты на мышцах животных, чтобы выяснить, как разряды статического электричества заставляют их сокращаться. Однажды он увидел, что лапки лягушек дергались самостоятельно, даже когда он ничего с ними не делал, и его осенило, что животные ткани не просто реагировали на электричество, но также могли генерировать его. Металл и амфибия образовали то, что мы теперь называем

батарейкой, а в 1800 г. другой итальянец, Алессандро Вольта, создал ее работоспособный вариант, заменив лягушку влажным куском картона. Батареи не только дали экспериментаторам новую замечательную игрушку — само их существование потрясло тех, кто придерживался ньютоновского представлений о том, что химические реакции и электричество вызывались различными типами нелокальных флюидов и не должны были превращаться друг в друга.

Это произошло очень вовремя. Размышления Канта о том, что могли постичь наши рациональные умы, привели к восстанию против механистических взглядов в философии, а именно к возникновению движения, известного под названием немецкого романтизма, а под крышей этой общей категории появилась философская школа, известная как натурфилософия. Натурфилософия представляла собой одно из периодических возрождений магического мышления. Ее сторонники были очарованы оккультными личностями эпохи Возрождения и восточной мистикой. Они считали разнообразные силы природы, включая электричество и магнетизм, различными проявлениями органического единства. Приверженцы натурфилософии рассчитывали с помощью экспериментов распознать это единство и использовать его для нужд человека. В их число входили некоторые выдающиеся ученые-экспериментаторы начала XIX в.

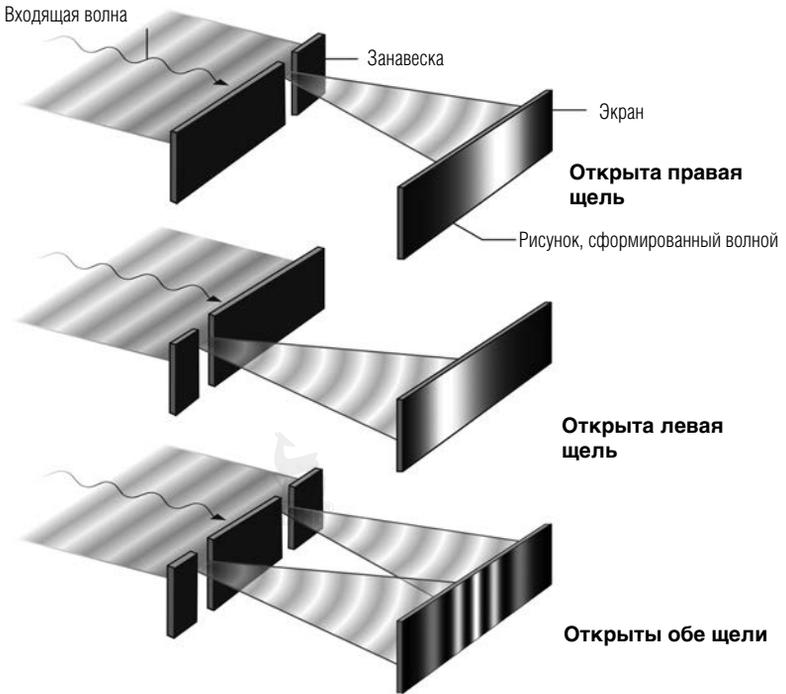
Одним из них был датский экспериментатор Ханс Кристиан Эрстед. Он не был врачом подобно многим революционерам от науки, но все же стоял очень близко к этой профессии: он был фармацевтом. Эрстед создал свою первую батарею практически сразу после того, как услышал об изобретении Вольты, и вскоре успешно создавал их по собственным схемам. В то время экспериментальные данные подтверждали представление Ньютона о том, что электричество и магнетизм никак не связаны. Статическое электричество не создает магнитных эффектов. Но Эрстед предположил, что электрический ток мог бы вызывать таковые. И он был прав. В 1820 г.

Эрстед обнаружил, что провод, соединенный с батареей, может заставить находящуюся рядом стрелку компаса поворачиваться. И опять удобный консенсус был нарушен идеями, которые большинство ученых отвергло как ненаучные.

Эрстед показал не только то, что электричество и магнетизм связаны, но и что природа этой связи очень неньютоновская. Электрический ток не отталкивал и не притягивал стрелку компаса, а вращал ее. Это оказалось серьезным испытанием для нелокальных сил. Такие силы должны быть похожи на частные «линии прямой связи» между двумя взаимодействующими объектами, которые действуют так, как если бы остальная часть Вселенной просто не существовала. Логично предположить, что сила должна действовать вдоль прямой линии, соединяющей два объекта, потому что она слепа к другим объектам или местам, которые могли бы определить какое-то другое направление. Дергающаяся стрелка компаса Эрстеда противоречила этому интуитивному представлению. Чтобы вращать стрелку, ток должен оказывать воздействие, направленное не в сторону провода или от него, а по касательной. Следующим признаком наличия локальных, а не нелокальных процессов было то, что вращающаяся стрелка напомнила вихревые движения, которыми Демокрит и Декарт объясняли механизмы магнетизма и тяготения.

Тем временем на подъеме оказалось другое направление физики — оптика. Почти все в то время соглашались с атомистическим ньютоновским объяснением света как потока частиц. Однако очередной доктор, Томас Юнг из Англии, почерпнул вдохновение в течении воды и других жидкостей. Как и Аристотель, он думал, что свет был импульсом, проходящим через среду, заполняющую пространство. Такое объяснение было популярно среди схоластов Средневековья. В 1803 г. Юнг придумал эксперимент, который вернул ему популярность.

Представьте себе солнечный день, окно с темными занавесками и белую стену напротив окна. Если сделать разрез в занавеске, на стене появится небольшое пятно. Если сделать



2.1. Эксперимент с двумя разрезами. Если сделать разрез в плотной занавеске, то световые волны создадут светлое пятно на экране. Если сделать два разреза, то волны наложатся и создадут полосатый узор, так называемые «интерференционные полосы» (Иллюстрация Джен Кристенсен)

еще один разрез, на стене появляется не просто второе пятно, как можно было бы ожидать и как предсказывала корпускулярная теория Ньютона. Вместо этого на стене виден узор, похожий на зебру, — чередование светлых и темных полос. К тому же, даже если второй разрез позволяет проходить большему количеству света, исходное пятно обычно становится *темнее*. Все это становится понятным, если свет — это волна в невидимой среде. Волны, проходящие через два разреза, накладываются и могут либо ослаблять друг друга, либо усиливать. В тех местах, где максимум одной волны совпадает с максимумом другой, волна становится очень сильной, что дает яркую полосу; там, где

максимум совпадает с минимумом, волна сводится на нет, тогда получается темная полоса. Это явление называют интерференцией волн. Эксперимент Юнга является классикой физики. Вы можете провести его сами (фокус в том, чтобы сделать разрезы как можно меньше и использовать лазерную указку, а не солнце в качестве источника света). На самом деле эксперименты с нелокальностью вроде тех, которые я упоминал в первой главе, — это усовершенствованная версия эксперимента Юнга.

Какой бы убедительной она ни была, идея Юнга пребывала в забвении в течение полутора десятилетий. Прорыв случился не после какого-то открытия, а после падения Наполеона. При императоре французские ученые-ньютонианцы подавили все конкурирующие теории. Даже в Англии люди были склонны неправильно истолковывать работу Юнга. Только когда политическая и интеллектуальная власть ньютонианцев ослабла, скрытый интерес к волновой природе света начал проявляться в открытую. Общественное мнение повернулось в его сторону к 1820 г., когда Эрстед вершил революцию в исследованиях электричества и магнетизма.

•

Эти две проблемы теории Ньютона были решены одним человеком — Майклом Фарадеем. Фарадей — одна из самых поразительных личностей в истории науки, пример того, как исследования выигрывают от разнообразия. Родившись в бедной лондонской семье, Фарадей почти не ходил в школу. Он стал учеником переплетчика книг и заинтересовался наукой, читая том «Британской энциклопедии», который оставил в магазине один из клиентов. Он взял займы у своего брата один шиллинг, чтобы посетить научную лекцию, и создал собственную батарейку на каминной полке в задней комнате магазина. Вскоре после этого Фарадею удалось получить работу у самого известного химика Великобритании, Гемфри Дэви, который провел некоторое время в Германии с немецкими романтиками и разделял их видение единства природы.

Фарадей стал ведущей фигурой в физике как раз тогда, когда физика становилась *физикой*, а не разделом философии. В 1840 г. было придумано слово «физик». Если спросить ученых сегодня, то они проводят различие между физикой и философией на основании важности экспериментов. Но исторически это разделение было стратегией ребрендинга, частью общей стандартизации и профессионализации академических дисциплин в XIX в.

Фарадей никогда не изучал математику, и для всех нас это хорошо. Математическая элегантность теории Ньютона для него ничего не значила, поэтому ничего не мешало ему рассматривать радикальные концепции. С его точки зрения, самой простой интерпретацией открытия Эрстеда было то, что природа в конечном счете локальна. Однако при этом Фарадей признавал, что ученые не могли вернуться к теориям атомистов, в которых объекты влияют друг на друга только через столкновения. Должен существовать какой-то другой способ локального взаимодействия тел.

Он думал, что теоретики, изучавшие свет, были в чем-то правы с их идеей о влияниях, распространяющихся через вездесущую среду. Хотя электромагнетизм казался совершенно отличным от света явлением, он тоже предполагал существование какой-то среды. Если насыпать железные опилки вокруг магнита, они выстраиваются в грациозные арки, называемые силовыми линиями, которые имеют странное сходство с тем типом деформации, которая образуется в любом эластичном материале, когда вы его растягиваете. Фарадей считал, что эти опилки похожи на темную сажу, собирающуюся на теле невидимого человека: они выдавали присутствие среды.

Но что это могла быть за среда? Фарадей первоначально представлял ее себе как обычное вещество, состоящее из маленьких частиц, каждая из которых в отдельности подчиняется законам движения Ньютона. Но постепенно он осознал, что электромагнитная среда не могла состоять из обычного вещества. Во-первых, если только один обычный объект мог

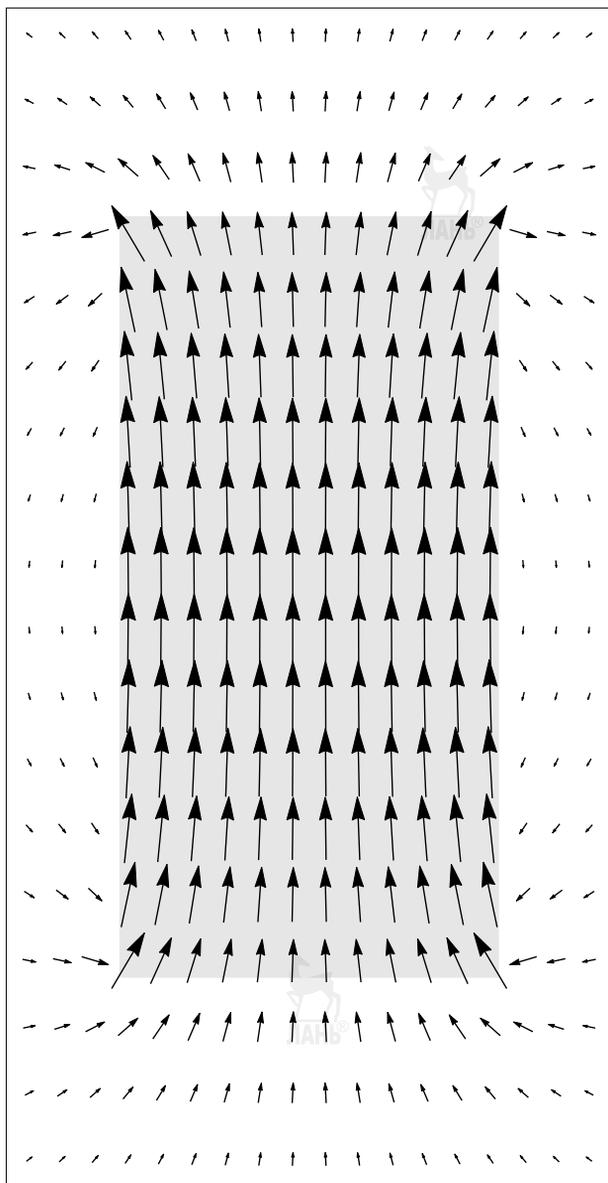
занимать данный участок пространства в одно и то же время, то эта среда сосуществовала с другими объектами. Дуги, сформированные железными опилками, не заканчиваются на полюсах магнита, но продолжают в самом магните и замыкаются, образуя замкнутый контур; силовые линии пронизывают материю и существуют независимо от нее. Поэтому Фарадей и другие ученые представляли себе эту среду как новый тип вещества, как нематериального посредника или континуум силы, похожий на тот, о котором когда-то размышляли Ньютон, Лейбниц, Кант и др. В 1845 г. Фарадей ввел термин, под которым мы знаем эту среду сегодня, — «поле».

Поле окружает нас и проникает в нас, мы плаваем в нем, и оно всегда действует на нас. Мы никогда не видим его непосредственно, но оно дает нам почувствовать свое присутствие, передавая воздействия от одного места к другому. Поле локально в двух смыслах. Во-первых, электромагнит не преодолевает пространство волшебным образом, чтобы притянуть металлическую скрепку для бумаг. На скрепку влияет только состояние поля в том месте, где она находится, подобно тому как водяной клоп может спокойно плавать на поверхности водоема, не обращая внимания на детей, плещущихся в воде у другого берега. Во-вторых, электромагниту требуется время, чтобы проявить свое воздействие. Когда вы в первый раз включаете его, скрепка чувствует силу не мгновенно. Воздействие должно распространиться через поле, пока оно не достигнет скрепки и не заставит ее дернуться к магниту, подобно тому как плескание в воде приводит к распространению по поверхности водоема волн, которые в конце концов захлестывают бедную букашку. Та же самая логика применима к электрическим силам. Если вы потрете воздушный шарик из латекса о рукав и поднесете его к голове, он взъерошит ваши волосы не мгновенно. Скорее он вызывает возмущения в электрическом поле, и эти эффекты распространяются через промежуток между шариком и волосами, в конечном счете изменяя состояние поля на коже головы.



Фарадеевское понятие поля поначалу не смогло завоевать популярность. Скептики требовали формул, а Фарадей, будучи математически неграмотным, не мог им ничего предложить. Но его идеи зацепили молодое поколение знатоков математики, а сильнее всего — шотландского физика Джеймса Клерка Максвелла, который превратил интуитивные соображения Фарадея в уравнения. Чтобы получить математическое описание поля, Максвелл использовал систему, знакомую любому, кто видел когда-нибудь схему прогноза погоды. На погодной карте показано множество чисел и маленьких стрелок, которые говорят о температуре, скорости ветра, направлении ветра и т. д. в разных местах. По аналогии Максвелл представил электрические и магнитные поля небольшими стрелками, которые указывают силу и направление поля в точках пространства. Сетки чисел говорят, как поле действует на электрически заряженные объекты или магнитную стрелку компаса. Знаменитые уравнения Максвелла предсказывают, как эти величины изменяются с течением времени.

Сегодня можно купить футболки с напечатанными на них уравнениями Максвелла. Они — олицетворение понятия изящной теории, которая является целью всех физиков. В дополнение к магнитным и электрическим полям Вселенная пронизана десятками других взаимопроникающих полей, соответствующих различным силам природы. Вместе с тем, несмотря на успех Максвелла, значение его уравнений было туманным. Действительно ли они соблюдали принцип локальности? Кажется, что да, но внешность может быть обманчива. Хотя Максвелл создал свои уравнения для описания сил, действующих локально, он признавал, что они могли так же хорошо описывать силы, действующие нелокально. При такой интерпретации пространство не заполнялось бы материальной средой; оно было бы в основном пустым, а объекты, рассеянные тут и там, притягивали бы и отталкивали друг друга издалека.



2.2. Магнитное поле заполняет пространство внутри и вокруг стержневого магнита. Оно воздействует с определенной силой и в определенном направлении на магнитные тела, такие как железная стружка (Иллюстрация автора)

ка. Числа, присваиваемые точкам в пространстве, отвечали бы на гипотетические вопросы вроде: если поместить объект в таком-то месте, как все остальные объекты во Вселенной будут действовать на него? Поэтому теория Максвелла вызвала те же самые споры об интерпретации, что и закон тяготения Ньютона за два столетия до того.

Три свойства полей подтверждали, что они действительно существуют. Во-первых, поля живут собственной жизнью. Они не просто посредники, передающие импульсы от одного объекта к другому. Они могут действовать сами, независимо от материи; пространство, абсолютно лишенное частиц, может быть насыщено волновой активностью. Это явление чуждо нелокальному описанию. Во-вторых, электрические и магнитные возмущения требуют времени, чтобы проявить свои воздействия. Задержка кажется странной, если силы перепрыгивают непосредственно от одного объекта к другому, но совершенно естественна, если импульс должен пройти через среду. На самом деле скорость, с которой распространяются эти воздействия, равна скорости света. Очевидно, что свет — это электромагнитная волна. Наконец, поля имеют энергию, а это сама сущность реальных объектов (и довольно новое понятие в физике в то время). Их возможность запасать энергию гарантирует, что никакая энергия не пропадает за то время, которое требуется возмущению, чтобы распространиться в пространстве.

Эти три критерия — волны, задержка, энергия — убедили большинство современников Максвелла в том, что поля дают локальное объяснение электрических и магнитных сил. Общепринятое мнение опять изменилось на противоположное: нелокальность из общепринятой концепции превратилась в «очень старую, но очень пагубную ересь» и во что-то «немыслимое». В историческом масштабе эти высказывания кажутся знакомыми. В данном случае также было поколение физиков, которые делали уверенные заявления, противоречившие уверенным заявлениям физиков предыдущих поколений. На самом деле бравада скрывала некоторую неловкость.

Новые трудности локальности

Физиков конца века беспокоило то, что у них было две отдельные теории: электромагнетизм и механика. Огромная трещина проходила через их картину мира, она не только разрушала мечту о простоте, но и делала невозможным решение различных практических проблем. Чтобы определять траекторию бейсбольных мячей и планет, они применяли законы Ньютона. Чтобы создавать генераторы и электромагниты, они применяли уравнения Максвелла. Но что делать в тех случаях, когда есть и движение, и электромагнетизм? Как движущийся объект влияет на электрические и магнитные поля и наоборот?

Эти две теории казались совершенно несовместимыми. Для одного из центральных аспектов законов Ньютона, тяготения, не было места в теории Максвелла. Если электрические и магнитные силы могут притягивать или отталкивать, то сила тяжести всегда притягивает. Кроме того, поле тяготения не удовлетворяло ни одному из критериев, существовавших о реальном существовании электрических и магнитных полей. Например, наблюдатели не видели никаких признаков того, что гравитации требовалось время на распространение. Согласно влиятельной (хотя в ретроспективе неправильной) оценке, сила тяготения пронесится через пространство мгновенно. В начале века сила тяготения была моделью для других сил; к его концу она стала приводящим в замешательство исключением.

Еще более фундаментальная проблема состояла в том, что уравнения Максвелла выделяли одну скорость как особенную, а именно скорость света, хотя законы Ньютона не предполагают такого понятия, как абсолютная скорость чего-либо. В его законах скорость всегда относительна. Относительно человека, бросающего бейсбольный мяч, этот мяч может лететь со скоростью 30 км/ч; относительно того, кто смотрит на это из движущегося поезда, — 160 км/ч; относительно астронавта на космической станции — 27 000 км/ч. Если вместо того,

чтобы бросить мяч, человек включает фонарь, насколько быстро световые волны перемещаются относительно этих же наблюдателей? Годы спустя один физик вспоминал, как читал об электромагнетизме в 16 лет и размышлял: «Если двигаться со скоростью света, будет ли казаться, что волны остановились?» Одни теоретики думали, что да, другие, что нет. Эксперименты были так же противоречивы.

Одним из теоретиков, ломавших голову над несовместимостью механики и электромагнетизма, был голландец Хендрик Лоренц. Его дочь Гертруда, которая впоследствии сама стала уважаемым физиком, вспоминала, как они с братом и сестрой в шутку называли отца белым медведем из-за того, что он ритмично ходил взад и вперед в своем подвальном кабинете, как медведь в клетке. Во время этих медвежьих прогулок он придумал, как согласовать механику с электромагнетизмом. По его мнению, электромагнетизм был более глубокой теорией из двух. Она могла объяснить законы движения Ньютона и, возможно, даже тяготение. В подходе Лоренца *появилось* такое понятие, как абсолютная скорость тел, обусловленная электромагнитной средой. Если двигаться со скоростью, равной собственной скорости волн, то они будут казаться неподвижными.

У Лоренца был готовый ответ на результаты эксперимента, которые предполагали, что все иначе: физиков вводила в заблуждение схема эксперимента. Чтобы измерить скорость, им требовалась линейка, и приходилось надеяться на то, что эта линейка окажется надежным стандартом длины. Эта надежда была неуместна. По рассуждениям Лоренца, когда линейка находится в движении, электромагнитное поле сопротивляется этому движению, сжимая линейку в продольном направлении, так же как аэродинамическое сопротивление заставляет падающую дождевую каплю сплющиваться. Этот эффект сбивает все измерения и заставляет экспериментаторов ошибочно считать, что скорость света относительно измерительного прибора никогда не меняется. В общем, хотя

и истинная, абсолютная скорость существует, электромагнетизм мешает нашим попыткам ее измерить.

Чисто практически теория Лоренца была огромным успехом, и в 1902 г. благодаря ей он получил незадолго до того учрежденную награду — Нобелевскую премию. Но такие шутки природы с экспериментаторами казались слишком уж коварными. К тому же эта теория сама создавала новые проблемы. Физики и философы тысячелетиями метались между дискретными частицами и непрерывной средой, а Лоренц объединил в своей теории *и то и другое*, что имело неприятные последствия. Например, электрическое поле должно было передавать воздействия не только каждой заряженной частицы на все остальные, но также и воздействия каждой частицы на самое себя. Этот цикл взаимодействия частиц самих с собой приводил к парадоксам. Частица должна была начать ускоряться *прежде*, чем к ней прикладывали силу, словно ясновидящая. Способность частицы немного заглядывать в собственное будущее можно было бы использовать для бесконечно быстрой отправки сообщений из одного места в другое.

Мало того, теория предсказывала, что частицы должны взрываться под давлением их собственного накопленного электрического поля. Чтобы объяснить, почему частицы во Вселенной не взрываются как петарды, физики решили, что они должны быть геометрическими точками нулевого размера. Что-то настолько несущественное не могло бы взорваться. Но, как заметил Зенон за две тысячи лет до этого, точка — парадоксальная вещь. Всегда, когда в физике появляется ноль, бесконечность не заставляет себя ждать. Если электрическое поле фокусируется в бесконечно малой точке, оно становится бесконечно сильным. По аналогичным причинам если бы длина волны света могла быть любым числом вплоть до нуля, то у ящика, заполненного световыми волнами, была бы бесконечная емкость для хранения энергии. Такой ящик засасывал бы энергию, как черная дыра, не из-за гравитационной силы, а из-за неограниченной емкости: как люди в телесериа-

ле «В плену ненужных вещей» (Hoarders), которые стали такими барахольщиками, что вещи исчезают в их доме бесследно.

В общем, всякий раз, когда физики пытались описать частицы, взаимодействующие локально, либо сталкиваясь, либо посылая волны через поля, они натыкались на слово «бесконечность». Некоторые начали сомневаться не только в теории Лоренца, но и в понятии полей вкупе с принципом локальности. Проблема физиков XIX в., связанная с отсутствием единства в их предмете, очень похожа на сегодняшнюю ситуацию, в которой теоретики пытаются согласовать гравитацию с другими силами природы. Скоро тот молодой человек, который задавался вопросом о световых волнах в 16 лет, подрастет и устранил эту путаницу.



Локальность Эйнштейна



В колледже Эйнштейн нередко прогуливал занятия. Он был невысокого мнения об уровне преподавания физики. Его преподаватели обходили стороной все интересное, в том числе тот переполох, который подняла теория электромагнетизма Максвелла. Эйнштейн проводил большую часть своего времени в кафе «Метрополь» в Цюрихе, изучая великие философские труды Юма, Канта, Маха. Если бы не конспекты его друзей, он, возможно, так и не получил бы высшего образования. Преподаватели, в свою очередь, находили его слишком самодовольным и давали ему плохие рекомендации. Начальникам лабораторий по всей Европе пришлось позже молча сожалеть, что они отклонили заявление самого Альберта Эйнштейна о приеме на работу.

В самом начале своей карьеры Эйнштейн не придавал особого значения локальности. Он был ньютонианцем. В первых научных статьях он предполагал, что частицы действовали друг на друга на расстоянии. Если законы Ньютона противоречат уравнениям Максвелла, тем хуже для Максвелла. В частности, если законы Ньютона утверждают, что все скорости относительны, то и скорость света должна быть относительной, о чем бы ни говорили уравнения Максвелла. Поэтому Эйнштейн подправил эти уравнения, чтобы сделать скорость

света зависимой от скорости его источника, создав новую версию теории электромагнетизма, которая была нелокальной. Именно тогда он изменил свое мнение. Пересмотренная теория внесла такие серьезные изменения в оригинальную версию теории Максвелла, что эксперименты ее исключили. Больше того, она предсказывала, что одни люди должны были видеть, что электромагнетизм подчиняется уравнениям Максвелла в их оригинальной форме, а другие — видеть искаженную версию — такая перспектива оскорбляла эгалитарные чувства Эйнштейна.

В момент прозрения Эйнштейн понял, что скорости могут быть относительными, а свет в то же время может устанавливать абсолютную планку скорости. В этом нет никакого противоречия, как думали все остальные. Нужно только быть аккуратными, говоря об относительной скорости. Обычное правило, воплощенное в законах Ньютона, состоит в том, что относительная скорость вычисляется путем складывания или вычитания: бейсбольный мяч, летящий со скоростью 30 км/ч навстречу поезду, двигающемуся со скоростью 130 км/ч, перемещается со скоростью 160 км/ч относительно пассажира поезда. Все же это правило содержит негласное и ничем не подкрепленное предположение о мгновенной передаче информации или, что эквивалентно, о нелокальности.

Эйнштейн осознал это, когда размышлял о том, что на самом деле подразумевает сравнение скоростей. Он использовал — в действительности впервые — один из самых любимых у современных физиков стилей рассуждения, «операциональное» мышление, которое заключается в том, что вы спрашиваете, откуда вам известно то, что известно. Часто обнаруживается, что существующие убеждения необоснованны и даже неверны. Между прочим, этот стиль может пригодиться в любом споре. Чтобы поднять уровень политического спора, спросите, как происходит что-то. Например, если кто-то поддерживает или выступает против государственного финансирования системы здравоохранения, спросите, как вообще устроено

медицинское страхование. Те, кто очень уверен в своем мнении, увидят собственное невежество или по крайней мере признают, что вопрос не так уж прост.

В случае относительных скоростей Эйнштейн заметил, что для измерения скорости мяча тому, кто его бросает, и пассажиру поезда необходим секундомер. И они не могут заведомо считать, что их часы идут одинаково. Это нужно установить, сравнивая показания часов, а для этого необходимо обмениваться какими-то сигналами. Если сигнал передается между ними мгновенно, то они могут подтвердить, что час для одного человека — это то же самое, что час для другого. Но если передача сигнала занимает время, они не могут быть уверены в этом, поскольку их положение изменится, пока сигнал будет в пути, что создаст задержку. Также они не могут знать, что километр для одного из них равен километру для другого. Подразумевается, что измерение длины проводится в один и тот же момент, т. е. сигнал может мгновенно переместиться от одного конца объекта к другому. Если наблюдателям доступны только сигналы, передающиеся с ограниченной скоростью, измерение может быть ошибочным из-за того, что они или объект измерения движется.

Эйнштейн нашел альтернативу ньютоновскому правилу сложения скоростей, которая учитывает время передачи сигнала, тем не менее гарантируя, что с точки зрения того, кто бросает мяч, и с точки зрения пассажира поезда это выглядит совершенно эквивалентно. Согласно его правилу, относительная скорость *меньше*, чем простая сумма. Для пассажира мяч летит со скоростью чуть-чуть меньше, чем 160 км/ч. Чем быстрее летит мяч, тем больше его относительная скорость отличается от предсказаний законов Ньютона. Если же вместо того, чтобы бросать мяч, посветить фонариком, что так интересовало теоретиков XIX в., то световые волны будут перемещаться со скоростью 1080 млн км/ч относительно того, кто светит, и со скоростью 1080 млн км/ч относительно пассажира поезда. Собственное движение пассажира перестает иметь значение.

Таким образом свет перемещается со скоростью, которая одинакова для всех наблюдателей даже при том, что их собственные скорости всегда относительны.

Пересмотренная Эйнштейном версия понятия относительной скорости объясняла все эксперименты, которые озадачивали его современников. Несоответствия исчезали — не было никакой причины подозревать, что природа злонамеренно мешала экспериментаторам. Эти успехи привели к тому, что он уже не был готов мириться с нелокальностью.

•

Поддержав идею относительности всех скоростей, Эйнштейн устранил основное противоречие между законами движения и электромагнетизмом. Это произвело впечатление даже на тех преподавателей, которых он раздражал как студент, и один из них указал на некоторые следствия, упущенные нахальным молодым гением. Поправки в такие фундаментальные понятия, как скорость, решают не одну проблему, а делают гораздо больше. Скорость определена в пространстве и во времени, поэтому новая интерпретация Эйнштейна изменила и то, что физики подразумевают под этими понятиями. Поскольку люди, перемещающиеся с разными скоростями, не могут обеспечить синхронизацию часов, временные интервалы зависят от их скорости, так же как и расстояния в пространстве, по похожим причинам. Но комбинация временного интервала и расстояния в пространстве — расстояние в пространстве-времени — не зависит от скорости; это объективный факт, насчет которого ни у кого нет разногласий. Именно так теория относительности Эйнштейна привела к объединению пространства и времени в единое понятие, пространство-время. Для сегодняшних физиков это объединение — истинное значение теории, а морока с поездами и сигналами была только одним из способов сделать это открытие.

Мы все еще воспринимаем пространство-время как пространство и время, но ни один человек не обладает исключи-

тельным правом разделять пространство-время на «пространство» и «время». То, что является чисто пространственным для одного наблюдателя, является комбинацией пространственного и временного для другого. Для пассажира поезда газета на коленях находится «здесь» (чисто пространственное обозначение), но для наблюдателя за пределами поезда газета — это движущийся объект (комбинация пространственного и временного). У этих двух людей также разные взгляды на понятие «сейчас» и разные мнения по поводу того, какие события происходят одновременно. Слово «одновременно» — это чушь с точки зрения теории относительности: объективно такой вещи не существует.

Один кусочек пазла все же не подходил к остальным: гравитация. Теория относительности в ее оригинальной версии применима только в особом случае нулевой гравитации. В 1915 г. Эйнштейн дополнил картину с помощью своей общей теории относительности, согласно которой сила тяготения возникает благодаря полю, аналогичному электромагнитному. Причина искривления траектории бейсбольного мяча в полете не в том, что Земля действует на мяч с некоторой силой на расстоянии, как предполагала теория Ньютона. Мяч реагирует на поле тяготения в непосредственной близости от него. Когда масса Земли немного смещается (например, когда геологическая активность или течения в океане перераспределяют вещество), поле тяготения немного изменяется. Это возмущение распространяется через поле со скоростью света, и, проходя через бейсбольное поле, оно изменяет поле тяготения в этом месте, так что при следующем броске мяч может падать чуть быстрее или медленнее.

Впрочем, гравитационное поле — это не просто какое-то поле. Оно играет особую роль в природе. Все другие поля действуют избирательно: электромагнитное поле, например, действует только на электрически заряженные объекты, и чем сильнее заряжен объект, тем быстрее он будет ускоряться. Гравитационное поле одинаково действует на все объекты.

Все падает вниз с одним и тем же ускорением. Поле, таким образом, определяет путь всех объектов в отсутствие других сил. Но это и есть сама функция пространства. Таким образом, гравитационное поле, по мнению Эйнштейна, *не расположено* в пространстве, а *является свойством* пространства. Если структура пространства-времени похожа на ковер, а движущийся объект похож на мраморный шарик, катящийся по ковру, то поле тяготения Земли — это вздутие на ковре, которое отклоняет шарик в сторону.

Так же как неожиданный поворот в романе не меняет историю полностью, но все же может заставить вас пересмотреть свое отношение к более ранним событиям — персонаж, которого вы считали плохим, может на самом деле оказаться хорошим парнем, — так и общая теория относительности побудила физиков заново оценить теорию гравитации Ньютона. Его теория не является строго неправильной — она неполная. Она примерно описывает эффекты гравитации, но не в состоянии объяснить, как распространяется сила тяготения. Теория относительности отвечает на этот вопрос. Она реабилитирует туманные догадки Ньютона и Лейбница о том, что гравитация имеет какое-то отношение к природе пространства.

Локальность спасает физику от сумасшествия

Эйнштейн разрабатывал теорию относительности, размышляя о том, что именно означает локальность для наших измерений времени и длины. Эта теория содержит положения, которые укрепляют позиции локальности. Прежде всего, она подразумевает, что ничто не может двигаться быстрее, чем свет. Технически теория не запрещает движение со скоростью выше скорости света как таковое. Она только говорит, что свет перемещается с одной и той же скоростью для всех наблюдателей. Однако в большинстве случаев это требование преобразуется в глобальное ограничение скорости. Если бы вы могли догнать свет, то, как размышлял Эйнштейн еще подростком, вам бы

показалось, что свет остановился — он бы перестал двигаться относительно вас с той же скоростью, что и относительно всех остальных. Независимо от того, как быстро вы движетесь, как стараетесь, вам его не догнать. Это так же бесполезно, как искать, где кончается радуга.

На практике, если вы пытаетесь разогнать какой-нибудь объект до скорости света, некий надзиратель будто жмет на тормоза, так что приходится прикладывать все больше усилий за каждую прибавку к скорости. Именно поэтому современные ускорители частиц должны быть такими гигантскими. Крошечная разница между 99,9999% скорости света (скорость частиц в старом ускорителе «Тэватрон» в Fermilab*) и 99,999999% (скорость частиц в Большом адронном коллайдере) превращается в десятикратную разницу в энергии. Для того чтобы достичь скорости света, потребовалось бы бесконечное количество энергии.



Глобальный предел скорости исключает бесконечно быстрые нелокальные силы, которые постулировал Ньютон. Больше того, как просвещенный родитель, который не просто придумывает домашние правила, но и обстоятельно объясняет их смысл, теория относительности не просто запрещает движение со сверхсветовой скоростью, но и четко разъясняет, почему это было бы так проблематично.

Прежде всего превышение предела скорости привело бы к нарушению причинно-следственных связей. У разных людей были бы разногласия не только по поводу того, что такое «сейчас», но и по поводу того, что такое «раньше» и «позже». Чтобы понять почему, вернемся в режим операционального мышления Эйнштейна и спросим себя: «Каким образом я узнаю, в каком порядке происходят события?» Нам необходимо

* Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми, расположенная недалеко от города Чикаго, штат Иллинойс, США. — *Прим. пер.*

наблюдать эти события, используя свет или какой-то другой «зонд», которому требуется время для прохождения через пространство. Если события происходят настолько быстро друг за другом, что свет не может дойти до нас за промежуток времени между ними, то наблюдения за этими событиями могут противоречить друг другу и у людей возникнут разногласия не только в том, как быстро происходили события, но и в том, что, в сущности, произошло.

Например, вернемся к сценарию с поездом и на этот раз предположим, что мы бросаем мяч со скоростью выше скорости света в сторону поезда, который удаляется от нас. Мяч догоняет поезд, пробивает дыру в последнем вагоне, летит через весь поезд и вылетает из его передней части. По крайней мере, так будет казаться вам. Пассажир в поезде, возможно, увидит что-то иное. Свету требуется время, чтобы достичь глаз пассажира от места резкого вторжения мяча и от места его вылета, а тем временем поезд продолжает двигаться вперед, так что свет, идущий от последнего вагона поезда, должен преодолеть бóльшую дистанцию, чем свет от передней части поезда. Следовательно, пассажир мог увидеть, как мяч пробивает стенку первого вагона *прежде*, чем он пробьет стенку заднего. Фактически, вся последовательность событий была бы инвертирована: мяч летит назад, из последнего вагона поезда прямо к вам в руки, готовые его поймать. Даже если пассажир осознает, что не все то правда, что кажется ему, и учитывает, что свету нужно время для распространения, он думает, что события происходят в обратном порядке. И так как точка зрения пассажира абсолютно равнозначна вашей собственной, вы оба правы. Когда объекты перемещаются быстрее света, порядок событий объективно неоднозначен.

Такое обращение причин и следствий — это не просто взрыв мозга, но и разрушение теории. Это все равно что перемещение назад во времени. Передавая сигналы через наблюдателей, которые перемещаются быстрее света или взаимодействуют нелокально, вы могли бы отправить сообщение в свое собствен-



ное прошлое. Эйнштейн осознал это еще в 1907 г. «Используя сверхсветовые скорости, мы могли бы телеграфировать в прошлое», — заметил он на одной конференции. Эта перспектива казалась ему веселой, но писателям-фантастам было виднее. Они уже строили сюжеты на основе того ящика Пандоры, который открывают путешествия во времени. Пожалуй, самый первый пример, написанный в 1881 г. американским писателем Эдвардом Пейджем Митчеллом, рассказывает историю путешественника во времени, спасающего осажденный в XVI в. голландский город Лейден, используя свои исторические знания о том, что произошло, таким образом создавая причинно-следственную петлю: путешественник становится ответственным за каждое событие, которое он помнит. Более поздние сюжеты обыгрывали возвращение в прошлое и предотвращение своего собственного рождения путем убийства бабушки или другого предка. Ну а в реальной жизни физики и философы стали считать путешествия во времени совершенно невозможными. Если законы физики не делают ничего другого, они должны по крайней мере предотвращать логические противоречия. Непреодолимый предел скорости делает именно это.

Кроме сохранения единственного направления связи причины и следствия ограничение скорости гарантирует, что само понятие закона физики имеет смысл. Если бы объекты или силы могли перемещаться бесконечно быстро, мир впал бы в анархию. Яркий пример был обнаружен Полем Пенлеве, человеком, который как министр обороны и премьер-министр Франции в особенно мрачный период Первой мировой войны довольно хорошо был знаком с анархией. В безмятежные дни середины 1890-х гг. Пенлеве был скромным математиком. Один из его проектов состоял в применении закона тяготения Ньютона к плотным кластерам звезд. Пенлеве понял, что звезды, которые снуют одна вокруг другой, как пчелы в улье, могут собраться в такую безумную кучу, что законы физики будут не способны сказать, что произойдет после этого — непреодолимая проблема, известная как сингулярность.

Сингулярность — это любое место или событие, в которых физические величины становятся бесконечными, а законы природы сходят с ума. Центр черной дыры — это еще один пример, хотя по другим причинам. В случае, который описывает Пенлеве, одна из звезд могла бы улететь в открытый космос с бесконечной скоростью. Это уже плохо, но еще хуже то, что могло произойти то же самое, только наоборот. В любой момент новая звезда могла бы примчаться из бесконечно удаленного места подобно космическому захватчику, как позже выразился один философ. Если так, то законы физики не могли бы предсказать наверняка, что произойдет с кластером или вообще с чем-либо. Захватчик из космоса мог бы примчаться через всю Вселенную, украсть носки из вашей корзины для белья и вернуться домой прежде, чем вы что-либо поймете. Это гораздо хуже других примеров случайности в физике, потому что в данном случае невозможно даже присвоить вероятности возможным исходам.

Эта кажущаяся нелепость не ограничивается законами Ньютона. Некоторые типы полей также позволяют импульсам распространяться через них с бесконечной скоростью. Всякий раз, когда скорость становится бесконечной, расстояние в пространстве теряет всякое значение и мир превращается в недетерминистский, в нем правит не закон, а прихоть. Все, что физики пытались создать начиная со времен Древней Греции, рухнуло бы. Налагая ограничение на максимальную скорость, теория относительности восстанавливает закон и порядок, не говоря уже о том, что она охраняет вашу корзину для белья. Как сказал Стив Гиддингс, теоретик-ледолаз: «Все, что нелокально, потенциально может оказаться мусором». Относительность подтверждает старую интуитивную догадку о том, что нелокальность сделала бы Вселенную непостижимой.

•

Давайте подведем итог того, как обстояли дела накануне квантовой революции. В Античности философы убеждали себя в том,

что объекты взаимодействуют, только сталкиваясь друг с другом. Во времена Ньютона они убеждали себя в том, что взаимодействие путем прямого контакта на самом деле не имело никакого смысла и что объекты должны воздействовать друг на друга на расстоянии. Затем с Майкла Фарадея началось еще одно изменение взглядов, которое достигло кульминации при Эйнштейне, и все решили, что объекты должны взаимодействовать локально. Даже Нильс Бор, который не соглашался с Эйнштейном во многом другом, назвал дальное действие «иррациональным» и «абсолютно непостижимым».

Атомисты различали два аспекта локальности. Принцип локального действия гласит, что воздействия не перепрыгивают из одного места в другое, но проходят через все промежуточные точки. А принцип делимости гласит, что каждый отдельный объект обладает своей независимой реальностью. У мира есть структура — вещи не сливаются вместе, образуя бесформенную массу. Электромагнитное, гравитационное и другие поля воплощают обе эти идеи, но таким образом, о котором античные атомисты не могли даже помыслить. Объекты могут взаимодействовать не только при соприкосновении, но также и путем непрерывного воздействия: за счет колебаний полей. Каждая точка поля является отдельным объектом сама по себе, существование которого — объективный факт, признаваемый всеми наблюдателями.

Если греческие философы, а позже и философы-механицисты полагали, что локальность самоочевидна, то Эйнштейн считал необходимым ее обосновать. Какой бы важной она ни была, с его точки зрения, он осмотрительно признавал ее предположением, о котором нужно судить по практическому успеху той системы взглядов, частью которой оно является. И эта система взглядов, несомненно, имела успех. То, насколько хорошо полевые теории работали сообща, утвердило локальность в обоих ее аспектах.

Итак, физики действительно думали, что на сей раз они правы. Однако как раз в момент своего триумфа принцип локаль-

ности — а с ним и вся классическая концепция пространства — подвергся новым нападкам со стороны возникшей тогда квантовой механики. Идея, которую философы и физики в течение двух с половиной тысячелетий пытались не допустить, — о том, что взаимодействия могут происходить, невзирая на оковы пространства, — все-таки нашла себе лазейку. Поскольку Эйнштейн так глубоко внедрил локальность в науку, ее новые трудности потрясли основы науки сильнее, чем когда-либо, и физики все еще расхлебывают последствия.

Необычное происхождение квантовой механики

«Квантовая механика была зачата во грехе», — говорит историк и философ Артур Файн из Вашингтонского университета. Если физики в телесериалах, таких как «Теория большого взрыва», показаны забавными чудаками, то отцы-основатели квантовой механики были эпическими фигурами, часто с измученными душами. Некоторые из них боролись с депрессией; один совершил самоубийство. Другой жил с женой и любовницей под одной крышей. Третий присоединился к нацистским штурмовикам. Они не гнушались извращением доводов конкурентов, чтобы добиться своего. Они признавали, что не знали, что делают, в половине случаев. При таком начале стоит ли удивляться, что споры не утихают до сих пор?

Эйнштейн был центральной фигурой в этой сумасшедшей драме. В учебниках его вклад в квантовую механику обычно сводится к единственному открытию, известному как фотоэффект, за который он получил Нобелевскую премию в 1921 г. Но его можно справедливо назвать отцом теории, и в течение десятилетия он фактически был единственным, кто верил в нее. Его цель сначала состояла в том, чтобы понять природу света. Начиная с Демокрита, затем при Аристотеле, Ньюtone и Томасе Юнге теоретики металась между представлением о свете как о волне и как о частице. В начатой в 1905 г. серии статей Эйнштейн уладил этот вопрос: свет является *и тем*

и другим. Это звучит так же странно, как и мясник-вегетарианец. Как может свет быть одновременно распределен по гладкой волне и упакован в локализованные сгустки энергии?

Если отбросить очевидную несовместимость в терминах, двойственный характер света создал определенную проблему: он противоречил принципу локальности. Если бы свет был *либо* частицей, *либо* волной, было бы не о чем беспокоиться. Частицы скачут повсюду и взаимодействуют путем прямого контакта или, может быть, благодаря близкодействующим силам; волны распространяются через среду или поле в непрерывном движении. Атомисты выступали за частицы, сторонники теории полей были в восторге от волн, но все сходились в том, что свет локализован. Но когда он ведет себя *и* как волна, *и* как частица, нелокальность кажется неизбежной. Причина состоит в том, что для сочетания этих двух видов поведения требуется высокая степень координации в пространстве. Эйнштейн и другие теоретики не сразу осознали эту нелокальность. Они считали локальность мира само собой разумеющейся; действительно, на их взгляд, реабилитация локальности была самым большим уроком физики XIX в., воплощенным в теории относительности. Но нелокальность прокралась в их сознание, когда они попытались и не смогли совместить двойственное поведение света с одной из старых теорий.

Например, предположим, что свет — это все-таки волна, но производит впечатление, что он частица, поскольку атомы поглощают энергию волны дискретными порциями. Большинство современников Эйнштейна приняло это описание. Но Эйнштейн очень рано увидел, что это противоречит тому, что физик Джон Крамер из Вашингтонского университета назвал «парадоксом пузыря». Волна распространялась бы от источника, как раздувающийся пузырь. Когда она достигает атома, пузырь лопается: волна разрушается и концентрирует всю свою энергию в одном месте, как морская волна, врывающаяся в узкую бухту. К тому моменту пузырь может быть огромным — разрушение волны внезапно произошло бы в обширной

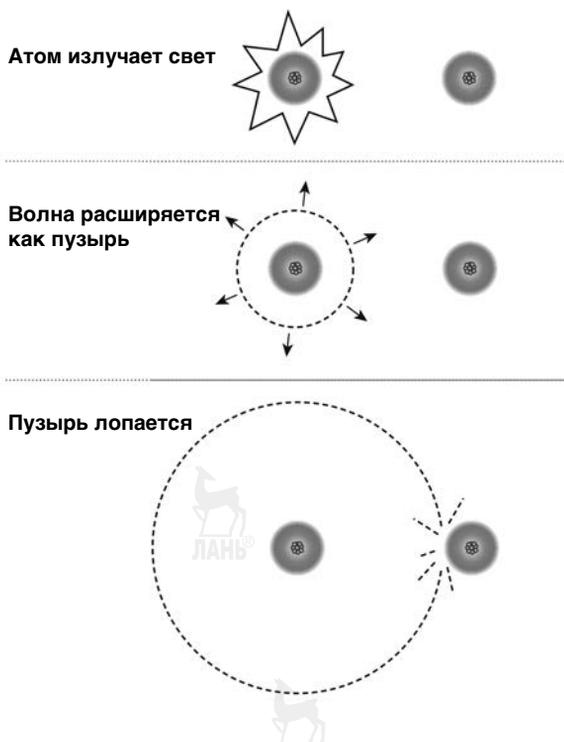


области пространства. Как удаленные друг от друга части пузыря узнали бы, что они должны прекратить распространяться дальше? Здесь должен быть задействован какой-то таинственный нелокальный эффект.

Другой вариант: предположим, что свет — это все-таки частица. Если свет иногда и похож на волну, то только потому, что частицы колеблются в унисон, как зрители, исполняющие «волну» на стадионе. Таково было изначальное интуитивное ощущение Эйнштейна. Но он быстро понял, что это должно противоречить наблюдениям. Частицы света, существующие независимо, могли объяснить коротковолновую часть светового спектра, но не длинноволновую. В случае длинных волн частицы не могут быть независимыми; какое-то внешнее влияние должно было бы заставить их колебаться в унисон.

В качестве третьего варианта Эйнштейн предположил, что у света может быть два отдельных компонента: один компонент может быть частицей, а другой — волной, и каждый из них подчиняется принципу локальности. Частицы переносят излучаемую энергию, в то время как призрачное «направляющее поле», не обладающее собственной энергией, переносит частицы подобно тому, как волна в океане переносит серфингиста. Бор тоже рассматривал одну из версий этой идеи. Однако двухкомпонентная теория света работала не так, как было задумано. Чтобы сохранять полную энергию частиц постоянной, направляющее поле не могло вести каждую частицу по отдельности — если бы оно подтолкнуло одну частицу сильнее, то должно было бы замедлить какую-то другую частицу для сохранения баланса. Таким образом, волна должна действовать всюду сразу, т. е. она обязана быть нелокальной.

Все доступные способы объяснения двойственного характера света так или иначе требовали наличия нелокальности. Существование мясника-вегетарианца выглядело странным. А теперь у физиков имелся мясник-вегетарианец, который был еще и волшебником. Ни Эйнштейн, ни кто-либо из его коллег не думал, что нелокальность действительно могла суще-



3.1. «Парадокс пузыря», описанный Эйнштейном. Он придумал этот парадокс в 1909 г. как аргумент в пользу того, что атомы излучают свет в виде дискретных частиц, а не непрерывных волн. Непрерывная волна должна распространяться во все стороны от атома в виде увеличивающейся сферы, как надувающийся мыльный пузырь. Когда волна доходит до другого атома, пузырь должен лопнуть: энергия, распределенная по границам сферы, должна сфокусироваться в одном месте. Это был нелокальный процесс, который Эйнштейн и его современники считали маловероятным. Более логично говорить, что первый атом испускает частицу в направлении второго атома. Позже Эйнштейн распространил этот парадокс со световых волн на квантовые волновые функции (Иллюстрация Джен Кристенсен)

ствовать, однако это казалось неизбежным. Бор писал коллеге, что в сердце атома происходит что-то подозрительное, что-то «представляющее трудность для нашего привычного пространственно-временного описания природы». Чтобы почувствовать, насколько странным казалось Эйнштейну поведение света, задумайтесь о том, что он сделал с целью отдыха

от этих размышлений: он создал общую теорию относительности. Это примерно так же, как в качестве отдыха от мирных переговоров на Ближнем Востоке изобрести лекарство от рака.

Волны материи

В начале 1920-х гг. Эйнштейн и его молодые коллеги, такие как Эрвин Шрёдингер, совершили решающий скачок. Они предположили, что все формы энергии и материи, а не только свет, могут вести себя и как частица, и как волна. Неразбериха со светом теперь затронула и материю. Чему бы вы ни отдали предпочтение, волнам или частицам, всюду была нелокальность.

Шрёдингер был за волны. «Частицы — не что иное, как своего рода “барашки” на волновом излучении, которое лежит в основе всего», — предполагал он. По его мнению, если далеко отстоящие друг от друга частицы «качаются» на одной и той же волне, они остаются согласованными естественным образом — не нужно никаких нелокальных влияний. Работая с этой идеей, Шрёдингер придумал уравнение, известное теперь просто как уравнение Шрёдингера, которое преподносится студентам-физикам как само определение квантовой механики. Оно позволяет делать все: от расчета траектории движения частицы до вычисления цвета света, который атом испустит или поглотит. Но, к своему огорчению, Шрёдингер понял, что его уравнение описывает не волну, а «волновую функцию», любопытную математическую абстракцию, в которой закодированы свойства частиц и систем частиц. Волновая функция нелокальна. У целой кучи частиц *одна* волновая функция, которая связывает их судьбы друг с другом, независимо от того, насколько далеко друг от друга они могут разлететься. Даже волновая функция одной-единственной частицы распространяется на всю Вселенную.

Конкурент Шрёдингера, немецкий физик Вернер Гейзенберг, протеже Бора, склонялся к теории о том, что частицы

первостепенны, и придумал собственную систему уравнений. Как оказалось, она была математически эквивалентна уравнению Шрёдингера — эти двое дошли до одной и той же теории разными путями. Но версия Гейзенберга не очень-то способствовала объяснению того, что происходит в действительности. Гейзенберг признавал, что не знал, как его уравнения для частиц объясняли волновые эффекты. Позже физики поняли, что частицы в подходе Гейзенберга являются волнообразными, поскольку они могут реагировать не только на то, что происходит непосредственно рядом с ними, но также и на то, что происходит в удаленных областях пространства.

В общем, ни Шрёдингер, ни Гейзенберг не раскрыли загадку нелокальности, а усугубили ее. Действительно, теория казалась немного обрывочной. Если теория относительности органически проистекала из одного-единственного убедительного принципа (симметрии) и быстро была принята, то квантовая механика была кое-как слеплена из разных не связанных друг с другом догадок, и физикам приходилось восстанавливать базовые принципы, которые она воплощала, уже по готовой теории. Ситуация была очень похожа на то замешательство, которое возникло в связи с теорией гравитации Ньютона два столетия назад. Чтобы понять, что они сотворили, физикам пришлось смотреть дальше уравнений и обратиться к интуиции за подсказкой о том, как должен быть устроен мир. Именно тогда начались настоящие споры.

Эйнштейн и Шрёдингер заняли позицию, аналогичную позиции критиков Ньютона, таких как Лейбниц: поскольку теория предсказывает нелокальность, она должна быть предварительной, временной. Теория не была неправильной, но она была неполной. Должна быть какая-то более глубокая теория, которая объясняет нелокальность. Бор и Гейзенберг утверждали, что это не так, что теория не была предварительной. Это было заключительное слово в физике. Безусловно, Эйнштейн и Шрёдингер соглашались друг с другом не во всем, и Бор с Гейзенбергом тоже не всегда сходились во взглядах. Но все же



справедливо говорить о двух сторонах в споре хотя бы потому, что ученые сами воспринимали это таким образом.

Представления Бора и Гейзенберга превратились в так называемую копенгагенскую интерпретацию. Один из ее центральных принципов заключается в том, что природа по сути своей случайна. Обоснование этого принципа было отчасти эмпирическим. Квантовые процессы выглядят случайными — например, когда атом испускает фотон, момент этого события, а также направление вылета фотона не определяется ни одним известным законом. Но сторонники копенгагенской интерпретации пошли дальше, чем того строго требовали экспериментальные данные, и утверждали, что никакого такого закона не может существовать, и точка. Волновая функция определяет вероятность обнаружения частицы в данной точке пространства или вероятность ее движения с данной скоростью. Пока никто не начнет искать эту частицу, она существует в состоянии неопределенности, не имея конкретного местоположения, ни импульса, но характеризуется множеством возможностей. Измеряя ее положение, экспериментатор вызывает коллапс волновой функции, которая превращается в узкий пик, случайным образом расположенный в пределах диапазона возможностей, и частица появляется в определенном месте. Коллапс происходит внезапно и необъяснимо, он выходит за рамки уравнений Шрёдингера и Гейзенберга. Как писал один философ: «Этот коллапс является чудом в буквальном смысле».

В их защиту скажу, что поиск причин случайных капризов жизни неизбежно ведет к расстройству. Некоторые вещи просто происходят. Добродетельные люди терпят неудачи, а грешники процветают. Для сторонников копенгагенской интерпретации индетерминизм был уроком современности, противопоставленным от неуместной веры в здравый смысл родом из эпохи Просвещения, которую многие немецкие интеллектуалы 1920-х гг. считали ответственной за поражение их страны во время Первой мировой войны. Многие историки полагали, что это культурное настроение восходит к вере времен магиче-

ского мышления и романтизма в то, что природа не подвластна рациональному пониманию.

Эйнштейн и Шрёдингер питали отвращение к такому толкованию квантовой механики. Бог не играет в кости, как сказал Эйнштейн. Это знаменитое и часто цитируемое высказывание звучит так, как если бы у Эйнштейна было религиозное отвращение к индетерминизму. Истина, как всегда, гораздо сложнее и интереснее. Эйнштейн никогда не возражал против случайности как таковой — он потратил большую часть своей карьеры, изучая вероятностные процессы. Его опасения были более прагматичны. Другие вероятностные явления были следствием механических движений более мелкого масштаба. Почему с квантовой случайностью дело должно было обстоять иначе? Почему физики должны оставить поиски более глубокого уровня устройства природы? Как я упоминал в одной из предыдущих глав, Эйнштейна поражал тот факт, что Вселенная постижима во многих отношениях, и он считал, что было бы странно видеть исключение в частицах. Вселенная должна быть либо постижимой, либо непостижимой, а не наполовину постижимой и наполовину непостижимой одновременно.

Кроме того, Эйнштейн понимал, что индетерминизм повлечет за собой нелокальность. Причина состоит в том, что якобы случайные события в квантовой механике скоординированы. Мы не только наблюдаем, что они скоординированы, но они *должны* быть скоординированы, иначе какое-то количество энергии или импульса будет теряться или, наоборот, приобретаться. Например, те волшебные монеты, о которых я говорил в первой главе, выпадают произвольным образом орлом или решкой, но делают это жестко синхронно. Как они это делают? Если результат броска определяется на лету, монеты должны общаться нелокальным образом, чтобы гарантированно падать одинаково. И наоборот, если они не общаются, то результат должен быть предопределен, и квантовая теория, будучи не в состоянии точно предсказать этот результат, должна быть неполной. В течение многих лет Эйнштейн продолжал

работать над этой дилеммой между индетерминизмом с нелокальностью и детерминизмом с локальностью.

Дебаты 1927 г.

Первый раз Эйнштейн представил свою дилемму миру в октябре 1927 г. на конференции, которая считается одной из самых величайших встреч в истории физики. Фонд, основанный бельгийским промышленным магнатом Эрнестом Сольве, взял на себя все расходы, чтобы 28 изысканно одетых мужчин и одна элегантная дама провели неделю в шикарном отеле, читая в институте Брюсселя лекции о квантовой механике (которые после этого были опубликованы) и общаясь друг с другом в неформальной обстановке (протоколы не велись, чтобы никто не чувствовал себя скованно). Эйнштейн не представил собственного доклада, но изложил свои доводы против копенгагенской интерпретации, когда одному из докладчиков задавали вопросы.

Его аргументом была обновленная версия парадокса пузыря. Квантовая волновая функция распространяется в пространстве как расширяющийся пузырь, однако частица, которую она представляет, появляется только в одном определенном месте, если вы начнете ее искать. Что заставляет пузырь лопнуть? Что мешает частице появиться в нескольких местах? Что-то должно управлять коллапсом, чтобы частица гарантированно материализовалась в одном, и только одном месте. Тем не менее в этом сценарии не задействована никакая сила — ни электричество, ни магнетизм, ни тяготение. Да никакие силы и *не могли* быть в нем задействованы, поскольку эффект происходит мгновенно и потенциально на бесконечном расстоянии. Этот эффект должен быть нелокальным; он должен противоречить теории относительности. На Сольвеевском конгрессе Эйнштейн выразил это следующим образом: «Вероятность того, что *эта* частица будет найдена в данной точке, предполагает наличие исключительно необычного механизма

действия на расстоянии, который мешал бы волне, непрерывно распределенной в пространстве, действовать в двух местах». Такое действие на расстоянии, сказал он коллегам, «подразумевает, по моему мнению, противоречие постулату относительности».

С точки зрения Эйнштейна, естественным было отказаться от пузыря, который лопается, оставляя после себя частицу. Вместо этого частица должна сидеть и ждать в том месте, где ее находят. Никакой нелокальной координации не нужно. Эту возможность иногда называют «реализмом», потому что у частицы *в действительности* всегда есть определенное положение, даже если квантовая теория не может сказать, где оно. Положение частицы — это то, что физики называют «скрытым параметром»: «скрытым» в том смысле, что он не появляется в уравнениях Шрёдингера и Гейзенберга. Более полная теория должна включать такую переменную. Эйнштейн пытался придумать такую теорию, основанную на его более ранних идеях о направляющем поле, и французский физик Луи де Бройль представил такую модель на Сольвеевском конгрессе. «Я думаю, что мистер де Бройль правильно делает, что ищет в этом направлении», — сказал Эйнштейн.

Бор безусловно принял дилемму «нелокальность или неполнота». Его согласие с тем, что уравнения предсказывают нелокальность, выразилось в словах, обращенных к Эйнштейну: «Все основания для каузального описания пространства-времени разрушаются квантовой теорией». Но Бор подходил к вопросу с точки зрения того, что мы можем и не можем измерить, а не того, какой физический процесс мог координировать поведение частицы на больших расстояниях и какие проблемы вызовет существование такого процесса. С его точки зрения, достаточно было того, что квантовая механика предоставляла «некоторые математические методы, достаточные для описания наших экспериментов». А что еще нужно?

Эти двое провели несколько дней в глубоких дискуссиях за завтраками и ужинами. Мы никогда не узнаем наверня-

ка, что они говорили друг другу, но, по всем свидетельствам, их разговор ушел от нелокальности и вертелся вокруг случайности, а именно вокруг принципа неопределенности Гейзенберга, который количественно определяет степень случайности, свойственной поведению частицы. Эйнштейн неоднократно пытался обойти этот принцип, но Бор каждый раз не давал ему это сделать, создавая впечатление, что он перехитрил кудрявого гения. Один из свидетелей, австрийско-голландский теоретик Пауль Эренфест, написал об этом так: «Как игра в шахматы. Эйнштейн все время с новыми примерами... чтобы нарушить СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ. Бор, сидя с философским видом в клубах дыма, постоянно искал инструменты, чтобы разгромить один пример за другим. Эйнштейн каждое утро выпрыгивал, как черт из табакерки, со свежими доводами». Тем временем Бор оставил без внимания основной повод для беспокойства Эйнштейна: связи между удаленными точками пространства. С этого непонимания начались недоумения, которые препятствовали принятию нелокальности в течение полувека.

Дебаты 1930 г.



К следующему Сольвеевскому конгрессу три года спустя Эйнштейн разработал другой сценарий, чтобы обосновать свою точку зрения. Это был первый черновой вариант аргумента, вокруг которого будут строиться все последующие споры. Предположим, что у нас есть коробочка, заполненная фотонами, которые со стуком перекатываются в ней, как конфетки «Тик Так» в пластмассовом контейнере. Один из них выскакивает через отверстие и улетает в космос. Коробочка с остальными фотонами отскакивает в противоположном направлении. Поскольку вся система частиц описывается единственной волновой функцией, судьбы коробочки и вылетевшего фотона остаются связанными. Некоторое время спустя вы измеряете положение коробочки, зная которое можно вычислить положение фотона.

Это означает одно из двух. Либо измерение коробочки оказывает какое-то воздействие на фотон, либо оно не оказывает никакого воздействия на фотон. Согласно копенгагенской интерпретации, верен первый вариант. То есть перед тем, как вы измеряете коробочку, и она, и фотон находятся в состоянии неопределенности, не имея определенного положения. После того как вы ее измеряете, волновая функция коллапсирует и фотон появляется в каком-то месте. Независимо от того, каким прибором вы проводили измерения, коробочка должна действовать как пульт дистанционного управления. Нажмите кнопку и — бац! — частица немедленно воплощается из неопределенного тумана потенциальной возможности в реальный импульс света. Поскольку фотон перемещается со скоростью света, сигнал от «пульта дистанционного управления» должен распространяться быстрее света, чтобы догнать его. «Если бы происходило такое физическое воздействие со стороны В на улетающий квант света, — писал Эйнштейн позже, — это было бы действие на расстоянии, которое распространяется со сверхсветовой скоростью. Такое предположение, конечно, логически возможно, но оно очень сильно противоречит моему физическому чутью». Согласно второму варианту — когда измерение никак не влияет на фотон — частица уже существует в том месте, где вы ее обнаруживаете, даже если волновая функция «слепа» к этому факту. Копенгагенская интерпретация вводит в заблуждение, и вы думаете, что у вас есть пульт дистанционного управления, в то время как его, увы, нет.

В общем, этот новый сценарий излагал ту же самую дилемму, что и прежде: квантовая теория либо нелокальна, либо неполна. К сожалению, одна особенность доклада Эйнштейна в 1930 г. посеяла многолетние сомнения даже среди его сторонников. Эйнштейн заметил, что вместо измерения положения коробки можно измерять ее импульс. То есть у вашего пульта дистанционного управления как будто есть две кнопки: одна заставляет фотон материализоваться с определенным поло-

жением, а другая заставляет его материализоваться с определенным импульсом. Но эта дополнительная функциональность вторична. Главная проблема в том, что у вас вообще есть пульт дистанционного управления.

Несколько лет спустя Эйнштейн попытался прояснить эту мысль: «То, что действительно существует в точке В, не должно, следовательно, зависеть от того, *какое* измерение выполнено в области пространства А; оно также должно быть независимо от того, *выполнено ли вообще какое-либо измерение* в области пространства А [курсив автора]». Мой предшественник из журнала *Scientific American*, который работал над статьей с Эйнштейном, однажды сказал мне, что этот великий человек не очень-то благосклонно воспринимал редактирование. Но если бы редактор уговорил его вычеркнуть первую часть упомянутого предложения и оставить только ту часть, которая идет после точки с запятой, мир был бы мудрее.

Отчасти из-за этой путаницы разговор между Эйнштейном и Бором уходил в сторону на двух Сольвеевских конгрессах подряд. Бор поддался на отвлекающий маневр выбора. По его мнению, Эйнштейн утверждал, что можно установить и точное положение, и точный импульс фотона одновременно, а именно это исключается принципом неопределенности Гейзенберга. Если бы запутанные частицы нарушили этот принцип, то квантовая механика была бы не просто неполной, а неверной. Предание гласит, что великий датчанин полночи не спал, анализируя процедуру измерения, и утром торжествуяще объявил, что принцип неопределенности устоял и квантовая механика спасена. Но согласно другим участникам дискуссии, Эйнштейн больше не спорил с принципом неопределенности. Он признал, что точные измерения положения и импульса были взаимоисключающими, и считал квантовую механику логически непротиворечивой теорией. Он целил в копенгагенскую интерпретацию, сторонники которой были не в состоянии честно признаться в нелокальности, которую подразумевало их представление.

Статья ЭПР

На этом великие сольвеевские дебаты оборвались. В 1933 г. нацисты совершили налет на дом Эйнштейна, находившийся на берегу озера, толпы студентов сжигали его книги, и мало кто из немецких физиков поддержал его. Он отказался от немецкого гражданства и навсегда уехал из Европы. Два года спустя, устроившись в Институт перспективных исследований в Принстоне, он наконец довел свою обеспокоенность нелокальностью до печати. Статья, общеизвестная как «ЭПР» — по первым буквам фамилий Эйнштейна и двух его молодых соавторов, Бориса Подольского и Натана Розена, — разожгла споры по переписке среди физиков, рассеянных по миру: некоторые отправляли до трех писем в день в разные места. Шрёдингер, который также бежал из Германии, был так взволнован этой статьей, что написал на эту же тему несколько собственных. В одной из его статей было изобретено название для явления, обнаруженного Эйнштейном: запутанность. В другой был изложен известный жутковатый сценарий с котом, который был и жив и мертв одновременно, показывая, что квантовая неопределенность не ограничена крошечными частицами и может распространяться на объекты всех размеров, даже на те, у которых есть мех.

Эйнштейну не понравились последствия статьи ЭПР, и он отреагировал так, как отреагировал бы любой другой ученый на его месте: обвинил своих соавторов. Основная проблема была в заключительном разделе, добавленном Подольским, где он пошел дальше, чем намеревался Эйнштейн, и попытался опровергнуть принцип неопределенности Гейзенберга. Это усугубило недопонимание, пустившее под откос сольвеевские дебаты в 1930 г. В следующем году Эйнштейн опубликовал собственную версию статьи, в которой основное внимание уделялось дилемме нелокальности и неполноты.

Однако дело уже было сделано. Бор вцепился в сомнительные дополнения Подольского и выпустил опровержение, кото-

рое было воспринято большинством как завершение этого спора. Вместе с тем, когда физики пытаются подробно объяснить, что именно говорилось в опровержении Бора, они похожи на участников пародийного телешоу Монти Пайтона «Кратко изложи Пруста», которые неуклюже пытаются резюмировать «В поисках утраченного времени» за 15 секунд. Один из них писал: «Большинство физиков (включая меня) признают, что Бор выиграл спор, хотя, как и большинство физиков, я затрудняюсь выразить словами то, как именно он это сделал».

По сей день копенгагенская интерпретация остается доминирующей в квантовой механике. Победа Бора во многом была связана с социальными факторами. Если Эйнштейн, по собственному признанию, был одиночкой, то Бор был авторитетом, внушавшим доверие. Он и его последователи написали почти все первые рассказы об этих дебатах. В них естественным образом подчеркивался вклад Бора и преуменьшался вклад Эйнштейна, что повлекло за собой преуменьшение значения нелокальности, поскольку это был интерес Эйнштейна. В этих рассказах нелокальность была достойна упоминания только как «недопонимание» со стороны Эйнштейна. Коллега Бора из того же института глумился: «Я должен признать, что, если бы студент одного из первых курсов имел такие возражения, я счел бы его довольно умным и подающим надежды». Такая снисходительность задавала тон этому спору на протяжении большей части XX в. Только в последние два десятилетия историки, в частности Артур Файн, разобравшись в переписке того периода, показали смелость взглядов Эйнштейна и восстановили его доброе имя.

В истории физики часто случалось, что ученые не могли добиться успеха из-за нехватки технологий или фундаментальных знаний. Фарадей, например, вряд ли мог создать двигатель или электромагниты прежде, чем была изобретена батарея. Но у физиков, изучавших квантовую механику, не было таких оправданий. Они могли понять нелокальность в 1930-х гг. так же легко, как в 1960-х. На самом деле они почти сделали

это. Историки смогли нарисовать абсолютно правдоподобные альтернативные сценарии, в которых, если бы события приняли немного другой ход, Эйнштейн выиграл бы у своих коллег. Странное сочетание личных конфликтов и самоподдерживающихся недоразумений помешало этому, и потребовалось новое поколение физиков во главе с Джоном Стюартом Беллом, чтобы восстать против широко распространившегося отрицания реальности.





Великий спор

В начале 2011 г. во время встречи с философом Тимом Модлином он поведал мне о предстоящем симпозиуме в Дрездене, Германия, который обещал стать местом крупных дебатов по квантовой нелокальности. Модлин считает, что квантовый мир нелокален. Другие же приглашенные на это событие полагают, что нелокальность — это заблуждение. У меня сложилось впечатление, что организаторы просто хотели собрать в одном месте светил физики, и только позже я понял, что это было равносильно приглашению демократов и республиканцев на одну и ту же вечеринку после выборов. «Там может разразиться чертовски крупный спор, — сказал Модлин. — Организаторы боятся этого. Они просят нас быть вежливыми». Естественно, я надеялся, что участники *не будут* вежливы, и купил билет на самолет, как только вернулся домой.

Не то чтобы я любил драки, но меня раздражало то, что ученые никак не могли устранить разногласия по поводу оснований квантовой теории. Они обсуждали существование нелокальных воздействий начиная с момента, когда Бор и Эйнштейн впервые вступили в спор в 1920-е гг., и по всем законам это дело уже должно было разрешиться. Только начав заниматься вопросом о том, является ли природа действительно нелокальной или просто хорошо притворяется (и, следовательно, находятся ли наши привычные представления о простран-

стве в таком бедственном положении, как кажется), я полагал, что побываю на парочке конференций, поговорю с несколькими людьми за кофе и выясню это. Все начиналось хорошо. Первый человек, с которым я пообщался, говорил очень разумные вещи. Второй человек, с которым я пообщался, говорил очень разумные вещи. Так же было и с третьим. К сожалению, то, что они мне рассказывали, полностью противоречило одно другому. Очевидно, план не сработал. Я был не столь наивен и не рассчитывал на то, что целый зал профессоров придет к единому мнению, но я думал, что по крайней мере смогу точно определить, в чем именно они не соглашались, и свести спор к выбору между одинаково обоснованными предположениями. Часто это удавалось. Но иногда в попытке постичь суть разногласий я обнаруживал, что хватаюсь за воздух.

Даже участники дебатов говорили мне, что они озадачены. Многие из них в течение десятилетий были друзьями, но все же чувствовали разобщенность из-за этого вопроса. Когда я просил, чтобы они объяснили, почему их противники думают так, как думают, они отводили взгляд, несколько мгновений смотрели куда-то вдаль и разводили руками. Иногда верх брало разочарование. Один скептик обвинял сторонников нелокальности в «лености» и называл их аргументы интеллектуальной «трясиной». Другой жаловался: «Эти люди очень высокого мнения о себе». «Он просто прет как танк», — соглашался третий. В свою очередь, сторонники нелокальности считали, что скептики виноваты в глупых ошибках. «Он просто крайне, абсолютно, недосягаемо, ужасающе неправ», — стонал один из них. В поисках (почти) нейтральной стороны, которая бы провела меня через эту физическую свару, я подошел к философу и историку Артуру Файну. Первое, что он мне сказал, было: «Добро пожаловать в гоббсовский мир принципов [квантовой механики]: война всех против всех!»

Казалось бы, если ученые спорят по такому глубокому вопросу, как нелокальность, они могли бы собраться вместе и обсудить ситуацию. Однако такие встречи примечатель-

ны тем, что споров на них практически нет. Во время разговоров у меня нередко складывалось впечатление, что через меня пытаются обмениваться представлениями, подобно тому как рассорившиеся супруги общаются через своих детей. Я надеялся, что на дрезденской встрече наконец начнется открытый обмен мнениями. Увы, этого так и не произошло. Участники конференции не пришли ни к какому соглашению. Они выступили с докладами и отправились ужинать в дорогой ресторан, где болтали о политике и других сравнительно безопасных вещах. И все же я не зря проделал этот путь. Я начал понимать, что систематическая неспособность достичь согласия занимательна сама по себе и является очень человеческой реакцией на глубину тех тайн, которые ставит перед нами квантовая механика. Даже если главные действующие лица никогда не пожмут друг другу руки, спор может быть окончен другими способами. Как мы увидим, противоположные позиции приводят к очень похожим заключениям о фундаментальной нереальности пространства.

Разное отношение к квантовой физике отражает несомнимые эмоциональные стимулы в науке: наслаждаться тайной и обличать глупость. «Для одних невыносима мысль о том, что фундаментальную физику — т. е. квантовую механику — нельзя примирить со здравым смыслом, — говорит Файн. — А для других невыносима мысль о том, что квантовую механику можно примирить со здравым смыслом! Это различия в характере, которые вряд ли можно устранить, поговорив за чашечкой кофе. Иногда они выглядят как философские разногласия... но если посмотреть внимательнее, то хотя вы, конечно, найдете там выражение философских предубеждений, едва ли в них есть какие-либо серьезные утверждения о философии как таковой. Вместо этого язык философии обеспечивает своего рода способ выражения эмоциональных различий». Ученые не бывают беспристрастными наблюдателями, и они не обязаны ими быть, поскольку кто вынесет тяжелый труд научной жизни без мотивации? Если поэзия — это

эмоции, выражающиеся в порядке, то наука — это порядок, выражающийся в эмоциях: это борьба за то, чтобы сохранять ясность мышления, находясь в водовороте страстного любопытства.

Доводы за нелокальность

По меркам физики, доводы в пользу квантовой нелокальности — проще некуда. Исходная статья Эйнштейна, написанная в соавторстве с Борисом Подольским и Натаном Розеном в 1935 г., уместилась всего на четырех страницах; на последующую работу Джона Белла, опубликованную 30 лет спустя, хватило шести страниц. Ни в одной из них нет сложной математики. Даже наоборот, уравнения скорее мешают: Эйнштейн позже жаловался, что его основная мысль в статье ЭПР была «задушена формализмом». Эти две статьи представляют собой два логических шага. Эйнштейн изложил дилемму: квантовая механика либо нелокальна, либо неполна. Белл опроверг вторую возможность: он показал, что даже в случае неполноты нельзя избежать нелокальности.

Чтобы понять смысл этого, вернемся к квантовому эксперименту, который я описывал в главе 1. В этом эксперименте частицы ведут себя как волшебные монеты, которые можно использовать, чтобы выполнять разнообразные трюки. Как и обычные монеты, они случайным образом падают орлом или решкой, если их подбросить. В отличие от обычных монет, результаты подбрасываний могут демонстрировать необычную закономерность. В самом простом случае у вас есть две такие монеты, и вы даете одну из них другу. Вы оба подбрасываете монеты, и они каждый раз падают одной и той же стороной: обе орлом или обе решкой. В соответствии с логикой Эйнштейна есть два возможных объяснения такой синхронности. Это могут быть жульнические монеты, результат броска которых заведомо определен: например, монеты, у которых с обеих сторон или орел, или решка. Это вариант реше-

ния дилеммы в пользу неполноты: теория «неполна» в том смысле, что наблюдатель знает о монетах не все и принимает их за честные, тогда как на самом деле они жульнические. Или монеты и в самом деле могут быть волшебными, объединенными какой-то таинственной связью (вариант в пользу нелокальности).

Эйнштейн склонялся к неполноте. Он и Луи де Бройль предполагали, что частицы ведут себя одинаково благодаря некоему невидимому направляющему полю, которое ведет их подобно овчарке, пасущей стадо. Частицы всегда существуют в определенных положениях, и измерение просто показывает, где они находятся в каждый конкретный момент точно так же, как подбрасывание монеты с одинаковыми сторонами показывает предопределенный результат. Такой механизм, по мысли Эйнштейна, мог создавать видимость нелокальности. Хотя это казалось хорошим объяснением в коротком обзоре, из попыток Эйнштейна создать для него математическую теорию так ничего и не вышло. В какой-то момент Эйнштейн написал статью, отправил ее в журнал для публикации и лишь после этого понял, что описанная в ней теория была нелокальной. К тому времени статья уже пошла в печать, и Эйнштейну пришлось звонить редактору, чтобы остановить печатные машины. (Подобные вещи можно вытворять, если вы Эйнштейн.) Как показал Белл, существовала простая причина, по которой Эйнштейну было так трудно избежать нелокальности: неизбежность нелокальности.

Белл использовал тактику, знакомую всем тем, кто любит портить другим праздник: предложить фокуснику-самозванцу доказать свои способности, выполнив трюк, который совершенно определенно требует магии. В одном из вариантов его теста вы и ваш друг подбрасываете монеты либо правой, либо левой рукой, и Белл требует, чтобы у пары монет иногда выпала одна и та же сторона, а иногда *противоположные*. У вас есть в общей сложности четыре варианта: вы оба подбрасываете монету правой или левой рукой, вы — правой, а ваш друг —



левой, и наоборот. В трех из этих четырех случаев Белл хочет, чтобы у монет выпадала одна и та же сторона. Но он настаивает, чтобы в четвертом случае у монет выпадали противоположные стороны. Это неважно, какой именно случай будет особым, но предположим, что это будет происходить, когда вы используете левую руку, а ваш друг — правую. То, как выпадут монеты, зависит от действий каждого из вас, так что ситуация неизбежно нелокальна. Даже самая хитрая монета не может предопределить результат заранее.

Лучшее, что могут сделать мошенники, — это подстроить так, чтобы монеты каждый раз выпадали одной и той же стороной. Например, вы с другом можете подбрасывать монеты с одинаковыми сторонами — тогда результаты ваших бросков всегда будут одинаковыми, что удовлетворяет требованию Белла в 75% случаев. Но вы не сможете справиться с задачей (и таким образом раскроете шарлатанскую сущность ваших трюков) в тех случаях, когда монеты должны выпадать разными сторонами. Я и мои коллеги когда-то сделали видеоролик, чтобы показать, как этот тест может выглядеть на практике*.

Схема Белла не произвольна — она соответствует определенным настройкам поляризатора в экспериментальной установке. Квантовые монеты справляются с задачей приблизительно в 85% случаев. Дополнительные 10% — результат нелокальности. (Тот факт, что волшебство несовершенно, т. е. монеты справляются с задачей в 85%, а не в 100% случаев, — интересное указание на природу квантовой нелокальности, подробнее о которой я расскажу позже.) И эта ситуация не является из ряда вон выходящей. Физики обнаружили десятки похожих на монеты квантовых систем, поведение которых нельзя объяснить какой-либо возможной «ловкостью рук». Эти системы состоят из двух, трех, четырех, миллиардов — из любого числа частиц.

* Видео размещено на веб-сайте книги, spookyactionbook.com. — Прим. авт.

Выбранная рука	Вы	Выбранная рука	Ваш друг	
	Результат под- брасывания монеты		Результат под- брасыва- ния монеты (для жульниче- ских монет)	Результат под- брасыва- ния монеты (для нелокаль- ных монет)
Левая	Орел	Левая	Орел	Орел
Правая	Решка	Правая	Решка	Орел
Левая	Решка	Левая	Решка	Решка
Правая	Орел	Правая	Орел	Орел
Правая	Решка	Правая	Решка	Решка
Левая	Решка	Правая	Решка	Орел
Правая	Орел	Левая	Орел	Орел
Правая	Орел	Левая	Орел	Орел

4.1. Тест, позволяющий отличить истинную нелокальность от шарлатанства. Вы и ваш друг подбрасываете монеты левой или правой рукой по случайному выбору. Если результат был предопределен заранее, например в результате использования жульнических монет, выбор руки не будет иметь значения. Но если монеты взаимодействуют нелокальным образом, этот выбор может влиять на результат. В данном примере результаты, выделенные жирным шрифтом, отмечают отклонения, указывающие на существование нелокальности

Эйнштейн утверждал, что более глубокий уровень реальности был единственной надеждой на спасение локальности. Белл разрушил эту надежду. Установив, что природа нелокальна, Белл задался вопросом, каким образом могла бы действовать нелокальность. Он рассуждал, что «призрачное» воздействие требует наличия «призрака»: какого-то нематериального объекта, который переносит воздействия из одного места в другое. И на эту роль был кандидат: направляющее поле. Хотя Эйнштейн и де Бройль уже предлагали направляющее поле для избежания нелокальности, американский теоретик Дэвид Бом заново придумал его в начале 1950-х гг. как механизм *возникновения* нелокальности. Это поле чем-то похоже на поле тяготения, как задумывал его Ньютон, или на Силу в «Звездных войнах». Воздействуя на поле в одном месте, можно было заставить двигаться частицу в каком-нибудь другом месте Вселенной. В принципе, такое поле способно не только создавать



причудливые последовательности из поляризованного света, но и ударить по лицу вашего врага, находящегося на другом конце страны, хотя на практике для этого вам пришлось бы, отслеживать отдельные частицы и управлять ими с невероятно высокой точностью. (Однако некоторые теоретики смогли придумать такие обстоятельства, при которых это становилось осуществимым, например в экстремальных условиях в момент Большого взрыва.) Немногим физикам понравилось предложение Бома, и даже сегодня большинство чураются его, сетуя на нелокальность направляющего поля. Но в этом и есть весь смысл. Если вы, как Эйнштейн с Беллом, подспудно считаете, что квантовая механика нелокальна, то предположение Бома открыто заявляет об этом.

Имеющие причины не согласиться

С логикой доводов Эйнштейна и Белла трудно спорить. Так почему же так много людей оспаривают ее? Я думаю, что их сомнения проистекают из трех источников.

Во-первых, некоторым ученым просто не нравится нелокальность. Она противоречит очень многим другим аспектам науки, так что интуиция говорит о ее ошибочности, даже если мозг не может ответить почему. Скептики сначала судят о нелокальности, а потом ищут логические доводы в подкрепление своего мнения. У психологов есть название для этой общечеловеческой склонности: «мотивированное суждение». Такие субъективные суждения могут казаться непонятными и догматичными тем, на кого они направлены, но они очень важны для науки. Социологи обнаружили, что самые творческие ученые наиболее упрямы. Это миф, что ученые не должны иметь предубеждений: если бы они их не имели, то каждая новая идея заставляла бы их менять взгляды, как флюгер меняет направление при малейшем дуновении ветра. В чем состоит задача ученого, если не в создании устойчивого, последовательного представления о том, как устроен мир? Соответ-

ственно, ученые судят об идеях по тому, как они вписываются в остальную систему знаний. Они сомневаются в том, что с ней не согласуется, какими бы убедительными ни казались поначалу доводы «за». Они много раз видели, как якобы неопровержимые аргументы давали трещину.

Вторая причина скептицизма состоит в том, что эксперименты с квантовыми монетами отдают мошенничеством. Когда вы создаете монеты — например, когда лазерный луч заставляет оптический кристалл, который является основным элементом эксперимента Гальвеза по запутанности, испускать пару фотонов, — то специально создаете их таким образом, чтобы они были согласованы друг с другом. Это слишком похоже на задачу пары жульнических монет. Призванный испортить праздник тест Белла, казалось бы, исключает такое мошенничество: никакие мыслимые жульнические монеты не могут оставаться согласованными в таком широком диапазоне условий, как квантовые монеты. Но скептики все еще не до конца убеждены. Как насчет *немыслимых* жульнических монет? Может быть, сравнение с монетой вводит нас в заблуждение? Вероятно, у частиц есть возможность оставаться синхронизованными, не обмениваясь информацией нелокальным образом?

Еще один подозрительный момент возникает, когда мы сравниваем результаты. Вы спрашиваете своего друга: «Какой стороной упала твоя монета?» Он говорит вам. Вы восклицаете: «Ничего себе, и у меня то же самое. Какое замечательное совпадение!» До этого разговора вы не в состоянии сделать никаких выводов о нелокальности. Таким образом, вы можете задаться вопросом, является ли сам разговор частью действия. В конце концов, разговор — это квантовый процесс, и скептики считают, что невозможно быть слишком внимательным, когда речь идет о квантовой физике. Рассуждение Белла чем-то похоже на iPhone: он тоже сперва кажется таким простым (всего одна кнопка!), но стоит его включить — и вот она сложность.

Третья причина, и возможно самая важная, состоит в том, что предполагаемая нелокальность кажется многим довольно

беспомощной. Этот эффект абсолютно невозможно ощутить в тот момент, когда он должен происходить. Все, что вы видите, когда подбрасываете квантовую монету, — это та же самая случайная последовательность «орел, решка, решка, орел, орел, решка», которую вы видите, когда подбрасываете обычную монету. В ней заложен принцип, но, чтобы увидеть его, вам нужно сравнить эту последовательность с той последовательностью, которую наблюдал ваш друг. Эта последовательность похожа на зашифрованное сообщение, которое вы не можете прочитать, пока ваш друг не отправит вам ключ к коду. И единственный способ это сделать — использовать какой-нибудь обычный вид связи вроде электронной почты, телефона или гонца. Это дополнительное требование производить сравнение делает запутанные частицы бесполезными для передачи сигнала.

Физики многократно пытались найти способ обойти это требование, но законы природы мешали каждой такой попытке. Ближе всех к решению проблемы подошел физик Ник Герберт в начале 1980-х гг. В сущности, его план состоял в проведении ряда повторных экспериментов. Предположим, что вы и ваш друг договорились о коде: левая — если по суше, правая — если по морю. Ваш друг подбрасывает свою монету либо левой, либо правой рукой и оставляет ее лежать. Вы подбрасываете свою монету, затем подбрасываете ее снова и снова, иногда левой рукой, иногда правой, наблюдая за последовательностью. Если результаты ваших левых бросков подчиняются законам вероятности, а результаты правых бросков, скажем, тяготеют к орлу, то вы можете прийти к заключению, что ваш друг подбросил монету правой рукой и его монета упала орлом. Вашему другу удалось передать вам сообщение: британские войска прибывают по морю.

Автоматизируйте этот процесс, добавьте какую-нибудь футуристическую обертку, и у вас будет «подпространственное радио» или «гиперволновой ретранслятор», придуманные писателями-фантастами для межзвездного общения в реальном времени. Сообщение переносилось бы от передатчика

к приемнику быстрее света. Герберт дал своей схеме название под стать: FLASH — навевающий мысли о космосе акроним, который расшифровывается как «первый сверхсветовой коммуникатор с лазерным усилением»*. Сначала даже великий Ричард Фейнман не мог найти упущение в этой системе, но практически все знали, что в ней должно было быть *какое-то* упущение хотя бы потому, что сверхсветовая передача информации позволила бы отправлять сигналы в прошлое и посеять хронологический хаос: убить своего дедушку и все в этом роде. Вскоре теоретики нашли его: квантовая механика явно запрещает повторы. Каждая пара монет допускает только одноразовое использование — как только вы подбрасываете монеты, связь между ними нарушается, так что вам все-таки не удастся провести эти повторные эксперименты. Квантовая механика не предоставляет скрытого канала для тайного обмена сообщениями.

Для скептиков невозможность сверхсветовой коммуникации очень подозрительна. Если вы видите в пустыне водоем, но, сколько ни пытаетесь, не можете сделать ни глотка, должно быть, это мираж. Аналогично: если вы видите связанные частицы, но не можете использовать их для передачи сообщения, то, возможно, предполагаемая связь — иллюзия. Даже тот, от кого можно было бы ожидать благожелательного отношения, — Стив Гиддингс, который сделал так много, чтобы убедить струнных теоретиков в возможности существования нелокальности в черных дырах, — говорит, что не считает квантовую нелокальность реальной: «ЭПР — это не настоящая нелокальность. Вы не можете послать сигнал с ее помощью». Те, кто действительно думает, что запутанность является истинной нелокальностью, подтверждают наличие как минимум проблемы в отношениях с людьми. «Тот факт, что в стандартной квантовой механике нельзя посылать сигналы, наводит на некоторые мысли», — признает Модлин.

* Англ.: First Laser-Amplified Superluminal Hookup. — *Прим. пер.*

Руководствуясь этими общими мотивами, скептики нелокальности предложили несколько избавительных оговорок к аргументации Эйнштейна и Белла. Некоторые из этих альтернатив могут показаться сомнительными, но если вы собираетесь подвергнуть сомнению что-то настолько фундаментальное, как локальность, то вполне можете пересмотреть и остальные свои убеждения, не так ли?

Вариант 1: отказаться от свободы воли?

Один из вариантов состоит в том, что эксперименты с запутанностью были подстроены под момент Большого взрыва. Вспомните, почему нелокальность кажется необходимой: без нее частицы должны быть предварительно запрограммированы для каждого возможного случая, который может произойти, и стандартная версия квантовой механики не дает возможности сделать этого. Например, если вернуться к сравнению с монетами, то они должны быть настроены так, чтобы реагировать одним образом, если вы подбрасываете их правой рукой, и другим, если вы подбрасываете их левой рукой: что же это за монеты, обладающие такой способностью? Если монеты нельзя заранее подготовить к каждому возможному случаю, у них должна быть какая-то нелокальная связь, чтобы они оставались синхронизованными.

Но мы не приходим к этому выводу, если частицы знают заранее, что вы собираетесь с ними делать. Тогда они могут быть готовы только к этому одному случаю. Это возможно, например, если ваш выбор способа измерения предопределен. Задумайтесь: почему вы стали подбрасывать монету правой рукой? Возможно, эта рука зачесалась, или у вас когда-то была девушка, имя которой начиналось с буквы *П*, или вы подбросили монету пару раз левой рукой и решили, что теперь очередь правой. Люди принимают решения по самым разнообразным причинам, и не все из них полностью рациональны. Эти причины вытекают из более ранних событий, и в конечном счете

цепочку причин можно проследить до момента рождения Вселенной. Как в космическом флешмобе, частицы во Вселенной были направлены таким образом, чтобы встретиться как раз в нужном месте и в нужное время, подготавливая клетки вашего мозга к выбору правой руки.

Возможно, те же самые факторы, которые подтолкнули вас выбрать правую руку, также гарантировали то, что ваш друг тоже выбрал правую руку и что обе монеты упали одной и той же стороной. За спиной у вас Вселенная может быть охвачена грандиозным заговором, цель которого — согласовать ваш выбор руки с движением монеты и таким образом заставить вас думать, что Вселенная нелокальна, хотя на самом деле она локальна. Эта идея называется «супердетерминизмом». Она кажется странной, поскольку связывает между собой явления, которые по своей сути должны быть абсолютно несвязанными. Как связан полет монеты в воздухе со сложным процессом принятия решения внутри вашего черепа?

О супердетерминизме часто говорят, что он лишает нас свободы воли. На самом деле все гораздо хуже. Даже обычный детерминизм — без приставки «супер» — заставляет многих сомневаться, что у нас есть свобода воли. С помощью законов физики можно связать каждый сделанный нами выбор с распределением вещества на заре времен. Это не обязательно означает, что ваша воля несвободна: свобода может быть эмерджентным свойством, которым не обладают отдельные частицы, но обладают системы частиц. Что касается вас, ваш выбор может быть абсолютно свободным, пока вы не сделаете его. Тем не менее философы, ученые и студенты, ведущие разговоры до поздней ночи, все еще спорят на эту тему. Супердетерминизм вонзает нож еще глубже. Все, что вы делаете, не просто решено заранее, но Вселенная еще и залезает вам в мозг, мешая провести тот самый эксперимент, который открыл бы вам ее истинную сущность. Во Вселенной все не просто предопределено заранее. Оно предопределено заранее, чтобы одурачить вас.

Я даже не собирался включать эту теорию заговора в свой список (она слишком похожа на сюжет романа Дэна Брауна), пока не поговорил с нобелевским лауреатом, физиком Герардом 'т Хоофтом, одним из отцов-основателей Стандартной модели физики элементарных частиц. Он считает, что локальность настолько жизненно важна, что физики должны рассматривать даже безумно звучащие идеи, чтобы сохранить ее. «Я склонен по возможности придерживаться общепринятого представления о пространстве и времени, поскольку придаю большое значение локальности, — сказал он. — Мне думается, что без локальности основные законы физики будет очень трудно или даже невозможно сформулировать». 'т Хоофт замечает: что заговор для одного человека, для другого — закон физики. Многие вещи в мире на первый взгляд похожи на тайный сговор, но являются результатом хорошо известных законов, согласно которым объекты координируют свое поведение. Тот факт, что Луна вращается вокруг своей оси с точно такой же скоростью, с которой она вращается вокруг Земли (таким образом, оставаясь повернутой к нам одной или почти одной и той же стороной), — это не заговор, а результат физических законов, таких как закон сохранения углового момента. Аналогично какой-то новый закон физики предположительно мог бы согласовывать свойства частиц с выбираемым людьми способом их измерения. «То, что сегодня кажется заговором, может происходить из-за закона сохранения, о котором мы пока не знаем», — объяснил он.

Артур Файн также выступает за супердетерминизм. Он считает, что правдоподобным его делает тот факт, что эффект синхронизации запутанных частиц едва заметен. Чтобы создать его, грандиозному космическому заговору не пришлось бы управлять вами, как марионеткой, а нужно было бы всего лишь мягко подталкивать. Если, в принципе, у вас есть 1000 вариантов того, какое измерение сделать, но Вселенная позволяет вам выбрать только из 950, то такого небольшого ограничения вашей свободы было бы достаточно, чтобы создать иллю-

зию сверхъестественного воздействия. «Ограничения обычные в физике, и оказывается, что достаточно даже небольшого количества ограничений», — говорит Файн.

Вариант 2: частицы — это хрустальные шары

Второй вариант объяснения, каким образом частицы могут быть готовы к вашим действиям, предполагает, что частицы способны видеть будущее. Они могут быть похожи на главного героя романа «Стрела времени»* Мартина Эмиса, нацистского врача, который проживает свою жизнь наоборот, от смерти до рождения. Прошлое частиц может быть вашим будущим. На частицы могут влиять события, которые, с нашей точки зрения, должны произойти в будущем. Они могут рождаться, уже обладая «памятью» о том, что будет происходить, в частности могут помнить настройки поляризаторов, с которыми позже встретятся, и быть готовыми отреагировать соответственно.

Сторонники этой идеи не отрицают, что запутанность — это магия. Они просто считают, что такая магия — вид предвидения, а не телекинеза. Считать ли это прогрессом, зависит от вашей точки зрения. Однако, когда такие известные физики, как Фейнман и Джон Уилер, предполагают, что частицы обладают даром предвидения, стоит отнестись к этой идее серьезно. Даже Модлин допускает это как логическую возможность: «Обратная причинно-следственная связь, в принципе, может объяснять это явление». Объединив пространство и время, теория относительности Эйнштейна привела к тому, что стало естественным думать о моментах времени, распределенных как точки в пространстве, все они одинаково реальны, даже если наши крошечные мозги могут воспринимать только один момент за раз. Будущее должно быть способно влиять на настоящее так же, как это делает прошлое, и настоящая тайна в том, почему обычно мы не видим, как это происходит.

* Эмис М. Стрела времени, или Природа преступления. — М.: Астрель, Corpus, 2011.

Вы можете думать об обратной причинно-следственной связи как об одной из форм путешествия во времени. Физиков обычно передергивает от путешествий во времени из-за страха причинных парадоксов. Однако в этом случае никакого парадокса возникнуть не может, потому что частицы не способны перенести даже сигнал, не говоря уже о целом путешественнике. Путешествие во времени ограничено интервалом между рождением частицы и ее измерением, которого достаточно, чтобы дать частицам мельком увидеть свое будущее, но недостаточно, чтобы открыть портал в прошлое. Вы не можете использовать запутанность, чтобы переписать историю или посмотреть завтрашние курсы акций.

Какими бы вескими ни были доводы за обратную причинно-следственную связь, вы сталкиваетесь с проблемой, когда кто-то говорит, что путешествие во времени может быть меньшей из двух тайн. Посмотрев на эти две первые альтернативы нелокальности, уже можно понять, к чему все идет. Аргументы Эйнштейна и Белла, возможно, не являются строгим доказательством призрачного дальнего действия, но они являются доказательством того, что мы живем в очень странном мире.

Вариант 3: параллельные вселенные

Третья альтернатива предполагает, что нелокальность — это иллюзия, вызванная существованием параллельных вселенных, которые мы не можем наблюдать непосредственно. Это похоже на прыжок в бездну. Как могут несколько светящихся цифр на дисплее счетчика убедить вас в том, что мы существуем в пространстве с бесконечным количеством других миров?

На самом деле рассуждение очень простое. Для начала немного перефразируем аргумент Эйнштейна. Запутанность означает, что две частицы или более согласованы друг с другом. Им приказывают быть согласованными. «Вы должны быть согласованы!» — говорит теория. Но насколько же безнадежно

неопределенна эта команда. Она не говорит частицам, как быть согласованными. Если они ведут себя, как монеты, им нужно сказать, какой стороной приземлиться, а без этой информации они входят в состояние неопределенности, одновременно падая орлом и решкой. Эта ситуация похожа на сцену из старого военного комедийного сериала «Отряд “Ф”». Сержант приказывает отряду: «Отряд, все в одну сторону, шагом — марш!» Но забывает сказать, в какую сторону. Какая-то часть отряда идет направо, другая налево, и начинается хаос. В отсутствие дальнейших инструкций у монет или солдат есть единственный способ одинакового выхода из своей неопределенности — телепатическая связь.

Но в этом доводе есть лазейка. Что, если квантовые монеты никогда не выходят из состояния неопределенности? Что, если каждая монета приземляется на обе стороны? В этом случае не требуется никаких нелокальных воздействий. Разумеется, такой взгляд противоречит тому, что говорят наши органы чувств. Всякий раз, подбрасывая монету, вы видите, что она падает либо орлом, либо решкой (либо ни тем ни другим, если она становится на ребро), но никогда тем и другим сразу. Но может быть, вы не должны верить своим глазам. Возможно, вы воспринимаете только один исход, несмотря на то что имеют место оба. Так могло бы произойти, если бы вы также вошли в состояние неопределенности, т. е. находились в неоднозначной ситуации наблюдения монеты, упавшей орлом и решкой. В конце концов, человек, который это наблюдает, — такой же квантовый объект, как и частица. Если частица может находиться в состоянии неопределенности, то почему не можете вы? Эта ситуация похожа на печально известную ситуацию с котом Шрёдингера, который и жив и мертв одновременно, за исключением того, что теперь мы представляем себе, какво быть этим котом.

Главное, что вы видите эту неоднозначность не в себе, а только в других. Фактически у вас есть несколько личностей, которые не подозревают о существовании друг друга. Одна

личность видит, что монета упала орлом, другая видит, что она упала решкой. Возвращаясь к метафоре из «Отряда “Ф”»: хотя сбивающая с толку команда сержанта вызывает хаос, он никогда этого не заметит, если страдает расстройством мозга, которое достойно пера Оливера Сакса*. Его левое полушарие видит солдат, идущих направо, а правое полушарие — солдат, направляющихся налево, и оба полушария рады, что отряд повиновался команде.

Это дает нам новый способ интерпретации того, что происходит, когда вы с другом подбрасываете пару квантовых монет. Когда вы спрашиваете друга, что он видел, каждая из ваших личностей слышит свой ответ. Личность, которая увидела орла, общается с той личностью друга, которая увидела орла. Личность, которая увидела решку, общается с той личностью друга, которая увидела решку. Обе личности соглашаются, что поведение монет было согласованным. Любопытно, что они делают этот вывод даже при том, что результат броска остается неоднозначным.

Сторонники такого представления утверждают, что расщепление личности — естественный способ интерпретации квантовой механики. Это не имеет никакого отношения к нашему мозгу как таковому, но является результатом устройства Вселенной. Самое знаменитое объяснение, известное как теория множественных миров, предполагает, что эти другие возможные личности представляют собой почти точные копии вас, существующие в параллельных вселенных. В нашей вселенной вы можете видеть, что монета выпадает орлом. В другой вселенной «вы» — т. е. существо, которое не является тем же самым набором атомов, что и вы, но выглядит в точности как вы и полностью убеждено, что оно является вами, — видите, что монета приземляется решкой. Все, что может произойти, действительно происходит в каком-нибудь из множе-

* Оливер Сакс (1933–2015) — американский невролог и нейропсихолог. — *Прим. ред.*

ства миров, хотя у нас есть прямой доступ только к тому миру, в котором мы живем. Мы думаем, что у каждого события есть единственный результат, поскольку не можем видеть другие миры, где наблюдаются альтернативные исходы.

Множественные миры — не единственный способ объяснения расщепления личности. Другие физики предлагают интерпретации, которые приводят к тому же самому, но без порождения множества космологических сущностей. Суть в том, что у нас есть доступ только к какой-то части реальности. Разные наблюдатели могут делать, казалось бы, несовместимые выводы о действительности, и это нормально, потому что их заключения относятся только к той части действительности, которую они видят. Нет никакой потребности в нелокальных воздействиях, чтобы добиться непротиворечивости. Но, какой бы безупречной ни была логика, вывод все еще звучит фантастически. Сомнение в собственном самосознании (не говоря уже о природе Вселенной) кажется многим слишком высокой ценой за объяснение какого-то непонятного физического эксперимента. Но чтобы избежать призрачного дальнего действия, физики готовы пойти даже на это.

Вариант 4: не будьте реалистами

Сюрреалистичность вышеупомянутых возможностей объясняет привлекательность четвертого и заключительного варианта: это все просто большая ошибка, доказательства Эйнштейна и Белла были неверно истолкованы, и, при более тщательном рассмотрении, они не подразумевают нелокальности или любого другого сходного по значимости явления. Этот довод был в центре внимания на той встрече в Дрездене, на которой я присутствовал. Там проходила ежегодная конференция Немецкого физического общества, самого большого в мире профессионального объединения физиков, и это был настоящий фестиваль физики. Среди многочисленных палаток, установленных в университетском городке, можно было про-



гуливаться с пивной кружкой, покупая усилители мощности и криогенные чаны. В лекционных залах физики делали доклады с такими заголовками, как «Дорогая, я уменьшил лазер». Была даже «Потасовка с Эйнштейном», когда высказаться о теории относительности со сцены могли все желающие. Гвоздем программы, однако, стал день, посвященный природе квантовой реальности. Аудитория на тысячу мест была заполнена до предела, люди сидели в проходах, стояли в дверях в нарушение местных норм пожарной безопасности и вытягивали шеи, чтобы увидеть докладчиков.

Четвертый вариант защищал Антон Цайлингер, венский физик-экспериментатор, который сделал больше, чем кто-либо другой, для превращения квантовой запутанности из теоретического курьеза в практическую реальность. Он сказал мне, что в австрийской деревне в предгорьях Альп, где он вырос, у него была репутация любопытствующего человека: было удивительно, насколько он был любопытным. «По сей день жители той деревни говорят, что считали меня немного сумасшедшим, — говорит он. — Я сидел на подоконнике у себя на кухне и часами смотрел на улицу». Цайлингер и Модлин — во многом родственные души: оба бунтовали против всеобщего игнорирования каверзных вопросов Эйнштейна. «Когда я начал заниматься физикой в 1960-х гг., отношение к этому было таким: давайте не будем беспокоиться о фундаментальных вопросах», — вспоминает Цайлингер. Он изучал квантовую механику самостоятельно, а не на занятиях, и у него никогда не было впечатления, что прошлые поколения уже нашли ответы на глубинные вопросы. «Я понял, эти ребята не знали, что все это значит, — говорит он. — Чего-то не хватало». Параллельно с физикой Цайлингер изучил многие философские труды: Канта, Маха, Поппера, Витгенштейна.

В чем Цайлингер расходится с Модлином, так это в том, что он никогда не считал копенгагенскую интерпретацию чем-то, против чего нужно восставать. Наоборот, она ему скорее по душе. Будучи экспериментатором, Цайлингер, есте-

ственно, согласен с Бором и Гейзенбергом в высокой оценке значимости акта измерения и, в частности, с копенгагенским тезисом о том, что измерения активно помогают создавать действительность. Он возражает против реалистического представления Эйнштейна о том, что измерения — это пассивные операции, с помощью которых регистрируется то, что уже существует.

Цайлингер видит аргумент Белла в таком свете: это опровержение не локальности самой по себе, а «локального реализма», который объединяет два интуитивных суждения Эйнштейна о том, что физика локальна (частицы взаимно независимы) и реалистична (частицы обладают определенными свойствами до того, как над ними проводятся измерения). Если аргумент Белла относится к локальному реализму, а не только к локальности, то только одно из этих суждений находится под ударом. По аналогии, если говорят, что кто-то — не кассир-феминистка, то нам нужно больше информации, чтобы узнать, кем она не является: феминисткой или кассиром, или же она и не феминистка, и не кассир. В этом случае, возможно, мы должны отказаться от реализма, а не от локальности. Цайлингер и его команда провели эксперименты, которые оказались убийственны для реализма.

В одном из них частицы оставались в контакте друг с другом, так что вопрос о локальности не стоял. Это была чистая проверка реализма, и частицы ее провалили. Если вы попытаетесь объяснить результаты измерений, предполагая, что у частиц были определенные свойства на протяжении всего времени, то придете к противоречию. Переведем это на язык монет: предположим, пять человек сидят за столом. Каждый подбирает монету и сравнивает результат с результатом своего соседа справа. Поскольку пять — нечетное число, то по крайней мере у одного человека результат совпадет с результатом соседа. Но это верно только для обычных монет. Для квантовых монет вы можете обнаружить, что ни у одного из них результат не совпадет с результатом соседа справа, что невозможно, если

у бросков есть определенные результаты, которые существуют до осуществления сравнения.)

Безусловно, такие эксперименты не полностью исключают реализм. Некоторые теории, основанные на реализме, такие как концепция направляющего поля Бома, остаются жизнеспособными. Но эти результаты все же наводят на размышления. Уже в тот момент, когда вы пытаетесь представить себе то, какими должны быть частицы перед измерением, вы призываете на помощь нелокальные воздействия. Перестаньте пытаться представить их таким образом и, возможно, сможете сохранить локальность. «На мой взгляд, проблема не в локальности, — сказал Цайлингер аудитории в Дрездене. — На мой взгляд, главная помеха — это идея о реализме».

Противостояние в Дрездене

Когда Цайлингер сел, встал Модлин. «Хочу сказать, что я по-другому смотрю на эти вещи», — начал он. Цайлингер, по его мнению, упустил суть аргументов Белла. Белл действительно опроверг локальный реализм, но это было только второй частью его довода в пользу нелокальности. Первая часть была исходной дилеммой Эйнштейна. По его логике, реализм — это тот вариант решения дилеммы, который мы вынуждены принять, если хотим избежать нелокальности. «Эйнштейн не принимал реализм, — сказал Модлин. — Он его вывел». Проще говоря, Эйнштейн исключил локальный антиреализм, Белл исключил локальный реализм, а значит, независимо от того, подчиняется физика принципам реализма или нет, она должна быть нелокальной.

Как сказал Модлин, красота этого рассуждения в том, что оно превращает спорную тему реализма в отвлекающий маневр. В качестве авторитетного источника Модлин процитировал самого Белла, который горевал о том, что люди склонны рассматривать его работу как приговор реализму, и в конечном счете повторно вывел свою теорему, но уже не употребляя



слово «реализм» и его синонимы. Не имеет значения, создают ли эксперименты действительность или просто фиксируют ее, является ли квантовая механика заключительным словом в физике или просто прелюдией к более глубокой теории, или, вообще, состоит ли действительность из частиц или чего-то еще. Просто проведите эксперимент, отметьте закономерность и спросите себя, есть ли способ объяснить ее локальным образом. При соответствующих обстоятельствах такого способа нет. По словам Модлина, нелокальность — это эмпирический факт, и точка.

Единственный способ избежать вывода о нелокальности состоит в том, чтобы усомниться в правомерности экспериментов, а это мы, по существу, и делаем в вышеупомянутых вариантах устранения нелокальности. То есть может быть так, что выполнить действительно контролируемый эксперимент невозможно (из-за супердетерминизма или обратной причинно-следственной связи) или что невозможно полностью зарегистрировать результаты эксперимента (из-за нашей неспособности видеть другие вселенные). Но такие варианты — анафема для экспериментаторов вроде Цайлингера.

Ясно, что четвертая альтернатива нелокальности относится к другой категории, нежели первые три. Немногие отрицают, что предопределенность, предвидение и параллельные вселенные — это логичные возможности, но вокруг того, является ли отказ от реализма допустимой опцией, все еще кипят споры. Даже если да, то что тогда? Как удаленные частицы остаются согласованными? Что стоит за этим фокусом? Цайлингер и другие ученые, которые выступают за антиреализм, никогда не говорят определенно, что именно происходит. Наоборот, они отрицают любую потребность в таком объяснении. Вот где разверзается пропасть взаимонепонимания.

•

Когда Модлин закончил, Цайлингер поднял руку. Это был тот момент, ради которого я пролетел полмира. Может, Цайлингер

укажет на какое-то упущение в рассуждении Модлина? Признает ли он неправоту? Пронесутся ли глубокие мысли через зал словно молнии? Оглядываясь назад, едва ли мне следовало удивляться, когда Цайлингер просто подтвердил свое заключение: «Этот вывод о нелокальности, похоже, основан на довольно реалистической интерпретации информации. Если вы не предполагаете этого, вам не нужна нелокальность». Это все, что можно сказать о том страшном конфликте, который так пугал организаторов конференции.

Позже Дэвид Альберт, философ из Колумбийского университета, близкий друг Модлина, прокомментировал, почему спор снова не удалось закрыть: «Студенты должны принять во внимание ужасающий факт: прошло 45 лет после публикации статьи Белла, и сегодня мы наблюдаем очень глубокие разногласия по поводу того, что именно было доказано в ней. Тим и я считаем, что это была нелокальность. Другие говорят, что есть выбор между реализмом или локальностью. Я хотел бы призвать остальных обратить внимание на это разногласие и постараться добраться до его сути самостоятельно». И Цайлингер, и Альберт по отдельности говорят мне, что они недовольны неспособностью найти общий язык. По словам Цайлингера, он настолько обеспокоен, что принял в свою команду человека специально для каталогизации разнообразных интерпретаций квантовой механики и их допущений. Альберт предлагает *мне* организовать открытые дебаты. Он говорит, что у общественности есть интерес к прояснению этого вопроса. «Потраченные вами средства не окупятся», — задумчиво говорит Альберт. Я очень старался устроить встречу Цайлингера и Альберта, но безуспешно.

Возможно, мне не следовало бы удивляться этим многочисленным неудачным попыткам решить вопрос. Аргументы Эйнштейна и Белла могут быть очень убедительными, но таков и принцип локальности. Другой философ, к которому я обратился за советом, Джон Джаррет из Иллинойского университета в Чикаго, сказал мне: «Учитывая впечатляющий успех того

мировоззрения, которому бросают вызов результаты экспериментов по проверке неравенств Белла, мы должны предвидеть большой простор для разногласий между множеством разумных и, в данном случае, очень выдающихся людей».

Быть прагматичным

И с чем же мы остаемся в итоге? Хочу заметить: на мой взгляд, Модлин прав насчет нелокальности. Логика Эйнштейна и Белла просто слишком убедительна. Но я также выработал здоровое уважение ко всем, «своим» и «чужим», и лишился своей уверенности в том, что одна только логика может решить дело. В любом случае научные споры редко просты для понимания. Сравнение двух позиций — это процесс вычитания, обнаружения различий, а вычитание — это операция, которая множит ошибки. Это похоже на расчеты в «Дэвиде Копперфилде»: «Ежегодный доход двадцать фунтов, ежегодный расход девятнадцать фунтов девятнадцать шиллингов шесть пенсов, и в итоге — счастье. Ежегодный доход двадцать фунтов, ежегодный расход двадцать фунтов шесть пенсов, и в итоге — нищета». Изменение в расходах меньше чем на 1% приводит к изменению участи человека на противоположную. Аналогичным образом небольшое недопонимание одной из участвующих в споре сторон может полностью ввести вас в заблуждение при попытке понять, кто же из них прав.

Однако это не значит, что мы должны ходить по кругу. Цайлингер рассказывает мне поучительную историю. В бытность студентом колледжа он со своим кузеном путешествовал по Франции на скутерах. Однажды вечером они подъехали к хостелу, который рекомендовали в путеводителе, и обнаружили, что тот закрыт и заброшен. Они решили пробраться внутрь и все равно переночевать там. Устроившись на ночлег, Цайлингер открыл окно чтобы проветрить, но кузен довольно быстро закрыл его. Некоторое время спустя Цайлингер вновь открыл окно. И так происходило всю ночь. «Мне каза-

лось, что душно, ему — что сквозило», — вспоминает Цайлингер. И только утром они заметили, что в окне не было стекла. Их пассивно-агрессивное поведение ночью было бессмысленным. По мнению Цайлингера, мораль в том, что всегда нужно подвергать сомнению собственные предположения.

Я бы не стал заходить так далеко и говорить, что споры о нелокальности столь же пусты, как та оконная рама, но их нескончаемое продолжение наводит на мысль, что пора отступить на шаг и взглянуть на проблему по-новому. Есть три способа сделать это: одно из предложенных решений могло бы получить одобрение на практике просто потому, что оно полезнее в применении, чем другие; спорные концепции могли бы получить признание потому, что они являются частью более общих закономерностей, а не просто отдельными курьезами; а также у различных вариантов, возможно, есть общие черты, которые укажут нам путь вперед независимо от того, какой из них окажется верным. Давайте разберем их один за другим.

Скептики сомневаются в нелокальности в значительной степени потому, что она кажется им жалкой из-за невозможности передачи сигналов с ее помощью. Однако те, кто выдвигает такие претензии, обычно оказываются теоретиками. Я провел много времени с экспериментаторами в их лабораториях и ни разу не слышал, чтобы они принижали значение нелокальности. Наоборот, их переполняет энтузиазм, когда они говорят о том, какие возможности она нам дает.

Например, хотя запутанные частицы не могут передать сигнал самостоятельно, их можно комбинировать с обычными световыми или радиосигналами, чтобы вместить в сообщение дополнительную информацию. В одном из экспериментов Цайлингер и его коллеги отправили сообщение, используя поток фотонов. Обычно каждый из фотонов может перенести один бит информации. Но при использовании целой кучи запутанных фотонов и процедуры, называемой «сверхплотным кодированием», физики смогли упаковать в каждый из отправлен-

ных ими фотонов по два бита. Фактически часть информации была передана посредством нелокальной связи.

Запутанные частицы также могут создать проблему для секретных служб, которые занимаются перехватом сообщений. Причина в том, что каждую пару запутанных частиц можно использовать строго один раз. Последовательность таких частиц позволяет вам отправить своему другу ключ от шифра. Как только ваш друг прочитает ключ, запутанность нарушается, как самоуничтожающиеся аудиокассеты в фильме «Миссия невыполнима». После этого ваш друг может отправить вам зашифрованное сообщение, имея абсолютную гарантию его конфиденциальности. Если тот, кто пытается вас прослушать, доберется до частиц первым, он не может не нарушить запутанность, и вы будете знать, что за вами наблюдают.

Конечно, мало пользы в защите персональных данных от секретных служб, если вы выкладываете их на веб-сайте. К счастью, запутанные частицы могут помочь и с этим тоже. В процедуре, известной как «безопасное» или «слепое» вычисление, вы можете передать данные веб-серверу, сохраняя содержание в строгой конфиденциальности. Например, предположим, что вы хотите открыть кредитную линию и сервер спрашивает, какая у вас зарплата, чтобы удостовериться в вашем соответствии требованиям. Вы можете отправить размер своей зарплаты в зашифрованной форме и доказать, что зарабатываете больше порогового значения, не раскрывая точного числа.

Все экспериментаторы, с которыми я говорил, называют эти явления нелокальными. Даже Цайлингер называет их так, несмотря на свои теоретические сомнения. Технически «нелокальность» для экспериментатора просто означает что-то, что отличает квантовые частицы от классических атомов. Это может быть не настоящая нелокальность, а иллюзия, порожденная, скажем, существованием параллельных вселенных. Но большинство экспериментаторов все еще представляют себе призрачные воздействия, прыгающие через пространство. Просто так легче думать.

В общем, нелокальность получает одобрение на практике, как когда-то происходило с законом тяготения Ньютона. Ньютон предупреждал, что нелокальность, которую подразумевает закон, может быть иллюзорной, но после открытия закона выросло новое поколение физиков, которые видели, насколько он полезен, и не чувствовали потребности в его оправдании. Они приняли силу тяжести как силу, возникающую на расстоянии. Как заметил психолог Уильям Джемс в XIX в., «мы обычно не верим в те факты и теории, которые для нас бесполезны». Но ученые быстро примут даже самый диковинный факт, если вы покажете им, как они могут его использовать. Выдающийся экспериментатор в области квантовой физики, Николя Жизан* из Женевского университета, отмечает, что его студенты растут со знанием о нелокальности и принимают ее как должное. «Молодые считают это захватывающим, но не изумляются, — говорит Жизан. — Местные дети говорят, что мир просто так устроен».

Размышляя не только о квантах

Кроме своей полезности нелокальность также выделяется среди других предложенных объяснений тем, что она вписывается в более общую картину. В следующей главе я расскажу о случаях нелокальности в других областях фундаментальной физики, но, даже если остановиться на квантовой механике, задумайтесь об интересном факте, который состоит в том, что запутанные частицы могут достичь желаемой последовательности результатов в 85% случаев, а не в 100%. Кажущаяся произвольность этого числа, по мнению многих, свидетельствует о том, что квантовая механика — только одна из целого класса возможных нелокальных теорий. Нелокальность как явление работает не по принципу «все или ничего», а имеет целый спектр возможных исходов.

Некоторые типы нелокальности слабее той разновидности, которую описывали Эйнштейн с Беллом. В той же самой ста-

* Жизан Н. Квантовая случайность: Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса. — М.: Альпина нон-фикшн, 2017.



тье, где был введен термин «запутанность», Шрёдингер описал, как запутанная частица может «руководить» своим партнером: это чрезвычайно тонкий вид дистанционного управления, который даже не приводит к особой последовательности результатов в экспериментах, построенных по принципу подбрасывания монет. С тех пор физики нашли другие способы «приглушить» нелокальность. Даже такой ослабленной нелокальности достаточно, чтобы выполнять полезные задачи, например избегать слежки со стороны властей.

В то же время физики придумали типы нелокальности, которые необычайно сильны. В своей статье, оказавшей большое влияние на науку в 1990-е гг., Санду Попеску из Бристольского университета и Даниэль Рорлих из Университета имени Бен-Гуриона в Израиле описали «суперквантовые» монеты, которые достигают желаемой последовательности результатов больше чем в 85% случаев. Насколько мы знаем, суперквантовых частиц не существует, но они были полезным гипотетическим сценарием. Инженеры могли бы использовать такие частицы для создания устройств, которые без них были бы невозможны. Для примера рассмотрим одну из мелких неприятностей повседневной жизни: поиск подходящего всем времени для встречи. Это обманчиво трудная задача, и компьютеры (даже те, которые используют возможности квантовых частиц) сводят ее к просмотру календарей участников и сравнению расписаний, по одному дню за раз. Но компьютер, использующий суперквантовые частицы, мог бы найти подходящее всем время за один шаг.

Организаторы конференций и любители быстрых знакомств, конечно, были бы рады иметь немного таких суперквантовых частиц. Но за эту возможность пришлось бы заплатить. Мир, в котором могут существовать такие частицы, страдал бы от глубокой логической противоречивости или склонности сложных структур к распаду. Каким-то непостижимым образом человеческая жизнь была бы невозможна, если бы назначать даты встреч было слишком просто. Попе-

ску и Рорлих думают, что попытка точно определить, какого количества нелокальности было бы слишком много, позволила бы узнать, почему квантовая механика такова, какова она есть. Таким образом, понятие нелокальности демонстрирует свою способность порождать новые идеи, которую физики так высоко ценят.

Нелокальность, как ее ни назови

Пожалуй, самый замечательный факт о спорах вокруг нелокальности состоит в том, что разнообразные альтернативы не так сильно отличаются от нее, как пытаются показать их сторонники. Призрачное воздействие. Абсолютная предопределенность. Предвидение. Параллельные вселенные. Нереалистичность. Вот это список! Какая бы из этих возможностей ни оказалась верной, физики остаются в выигрыше. Все они — даже те, которые якобы сохраняют локальность, — предполагают наличие уровня реальности, лежащего за пределами нашего обыденного понимания пространства. Все они связывают частицы и наблюдателей на противоположных сторонах лабораторного стола, Земли или видимой Вселенной. Единственная разница в том, как это делается.

Чтобы понять это, давайте снова пройдемся по разным вариантам. Самой простой версией является направляющее поле Бом. В доработанных версиях исходной работы Бом предлагал считать это поле жидкостью, заполняющей все пространство. Волны могут распространяться по ней, как рябь по поверхности пруда, передавая воздействие от одной частицы к другой. На самом деле эта идея не просто ширма, чтобы скрыть невежество. Волны в этом поле совсем не похожи на обычные волны на поверхности воды — с точки зрения математики они распространяются в абстрактном многомерном пространстве и делают это с бесконечной скоростью. Бесконечная скорость не идеализация, а неотъемлемый элемент этой модели. Если бы предполагаемые волны перемещались с высо-

кой, но все же конечной скоростью, то взаимодействия внутри групп частиц передавали бы сигналы со сверхсветовой скоростью, а такого никогда не наблюдалось.

Как только вы произносите слова «бесконечная скорость», становится ясно, что здесь что-то не так. Бесконечно быстрое движение едва ли имеет право называться движением — предмет, который «перемещается», уже находится в месте своего назначения, а значит, как можно говорить, что он туда движется? Направляющее поле на самом деле является не средой, в которой могут распространяться волны, а математическим подтверждением того факта, что каждая частица зависит от всех остальных частиц. Сам Бом пришел к мысли, что направляющее поле не существует в реальном мире, а сигнализирует о том, что наши понятия о пространстве не работают. По его предположению, вместо того чтобы считать, что пространство заполнено направляющим полем или жидкостью, о пространстве вообще не нужно думать.

Про следующий вариант, супердетерминизм, говорят, что он устраняет нелокальность. При ближайшем рассмотрении ничего подобного не происходит. Он просто сдвигает нелокальность во времени из настоящего момента в момент Большого взрыва. Некий закон природы должен был определить то, как выглядела Вселенная в момент времени 0. Этот закон похож на властную мать на свадьбе дочери, которая настаивает, что все должно быть именно так, а не иначе. Частица номер 1 618 034 и частица номер 137 035 999 обрели согласованные свойства и были приведены в движение таким образом, чтобы 13,8 млрд лет спустя, после бесчисленных столкновений и взаимодействий, они встретились в лаборатории на Земле, в месте, которое тогда еще даже не существовало. Фактически, в этом законе была заранее заложена вся эволюция Вселенной, включая взаимосвязи между частицами. В чем именно состоит отличие от разрешения Вселенной развиваться и действовать нелокальным образом «на лету»? Даже 'т Хоофт, главный защитник супердетерминизма, не уверен, действительно ли это позво-

ляет сохранить локальность. «Это действительно очень трудный вопрос, над которым я сам постоянно размышляю... Я все еще считаю, что ЭПР/эксперименты по проверке неравенств Белла являются проблемой», — говорит он.

Третья альтернатива, обратная причинно-следственная связь, соединяет частицы посредством сигналов, передающихся назад во времени. Эта схема привлекает своей элегантностью. Она не требует сомнительного направляющего поля, чтобы передавать воздействия от одной частицы к другой, — частицы сами переносят их через все свое существование, «помня», что происходит с ними в будущем. Поскольку воздействие перемещается вместе с частицами, оно ни в какой момент не распространяется со сверхсветовой скоростью, не говоря уже о бесконечной. Таким образом, эта схема удовлетворяет теории относительности Эйнштейна, что гарантирует ослабление противоречий между теориями. К тому же обратная причинно-следственная связь не требует тонкой настройки параметров вещества в момент Большого взрыва.

Несмотря на все эти преимущества, здесь есть несуразность. Одна из главных причин, по которым физикам не нравится нелокальность, состоит в том, что она может допустить возможность путешествий во времени. Чтобы избежать этой проблемы, сторонники обратной причинно-следственной связи предлагают... путешествие во времени. Так что же мы выигрываем? Возможно, было бы проще принять путешествия во времени, подразумеваемые нелокальностью.

Действительно, можно утверждать, что обратная причинно-следственная связь на самом деле является не альтернативой нелокальным взаимодействиям, а *типом* нелокального взаимодействия. Двум частицам на противоположных концах Вселенной все же удается оказывать друг на друга влияние. Новизна в том, что они делают это, тайком передавая сообщение назад во времени. Эйнштейну это понравилось бы ничуть не больше призрачного воздействия на расстоянии. Его основное возражение против нелокальности состояло в том,

что она грозила лишить Вселенную постижимости. Он задавался вопросами о том, как можно точно определить причину события, когда она может находиться в какой-то галактике, слишком удаленной, чтобы видеть ее? Как провести контролируемый эксперимент, если нельзя изолировать экспериментальную систему от удаленных воздействий? Те же самые возражения применимы и к обратной причинно-следственной связи. Как точно определить причину события, если она может находиться в будущем? Как провести контролируемый эксперимент, если нельзя изолировать систему от событий, которые еще только должны произойти?

Четвертая альтернатива, параллельные вселенные и другие формы расщепления личности, гласит, что синхронизованность запутанных частиц — это своего рода иллюзия, артефакт очень выборочного видения действительности, которым мы обладаем из-за того, что живем только в одной из многих вселенных. Для простых смертных вселенная выглядит нелокальной, но для Бога, который может наблюдать всю картину, она строго локальна. Однако, как и другие варианты объяснения запутанности, параллельные вселенные, в сущности, являются нелокальными. Каждая вселенная должна обладать внутренней согласованностью: нужная личность одного наблюдателя должна говорить с нужной личностью другого наблюдателя. И эта согласованность является видом нелокальности. Кроме того, параллельные вселенные выбивают почву из-под ног экспериментальной науки таким же образом, как и явная нелокальность. Эксперименты никогда не позволят исследовать весь набор вселенных, в котором локальность якобы сохраняется.

У теории параллельных вселенных также есть несколько довольно тревожных следствий. По мнению Эйнштейна, важная роль локальности состояла в определении того, что значит быть отдельным человеком: без локальности отдельные вещи потеряли бы свою индивидуальность. Почти то же самое происходит и в сценариях с параллельными вселенными. При достаточно большом количестве вселенных каждая

возможная конфигурация вещества повторяется. Несколько существ отзываются на ваше имя, делят с вами все ваши воспоминания и верят в то, что они — это вы. Вот *это* уже пугает. Какое из них — вы? Вы не можете знать. Вы можете быть здесь, там и вот там: в любом числе мест. Таким образом, даже если вариант с параллельными вселенными сохраняет концепцию локальности, он не выполняет тех функций, которые должна выполнять локальность.

К пятой, и заключительной, альтернативе — отказу от реализма — труднее придаться. Ее хулители считают, что отказываться от реализма абсолютно неправильно, а ее сторонники тратят на то, чтобы опорочить другие варианты, больше энергии, чем на изложение собственного объяснения, почему запутанные частицы ведут себя согласованно. Но давайте применим к этому варианту презумпцию невиновности. В сущности, антиреалисты говорят, что никакого объяснения не может быть и что оно не нужно. У Артура Файна (собственные представления которого нельзя точно классифицировать как реалистические или антиреалистические) есть хороший способ изложения этой идеи. Отсутствие реализма означает, что до того, как вы посмотрите на квантовую монету, она находится в состоянии неопределенности и акт наблюдения монеты заставляет ее выйти из него и случайным образом выбрать орла или решку. Нет никакой причины, по которой монета выбирает орла или решку и наоборот. Она просто это делает. Файн предлагает пойти дальше в этом рассуждении. Как только вы признаете, что у отдельных событий нет никакой причины, естественно предположить, что и у *парных* событий нет никакой причины. Если ничто не заставляет монету выбирать одну или другую сторону, возможно, ничто не заставляет ее запутанного партнера выбирать ту же самую сторону. «Если причины одиночных событий неопределены, то что, кроме веры в детерминизм, заставит нас думать, что что-то “должно” порождать корреляции между ними?» — спрашивает Файн.

Другими словами, корреляции, беспокоившие Эйнштейна и Белла, могут быть не более таинственными, чем последовательности, которые обнаруживаются в любой серии случайных событий. Подбросьте монету много раз, и она упадет орлом или решкой почти в равных пропорциях по законам вероятностей. Файн предполагает, что квантовая механика расширяет этот принцип. Подбросьте одну монету здесь и одну монету там, и они могут продемонстрировать последовательность результатов, согласующуюся с более общей концепцией законов вероятностей. Файн называет эти корреляции «согласованной случайностью». Я слышал подобное описание и от Жизана, швейцарского экспериментатора: «У нас есть случайность, но эта случайность может проявляться в нескольких местах».

ЛАНЬ •

Избегая описания механизма взаимосвязи частиц, Файн, однако, неявным образом делает важное заявление о природе этих частиц. Когда два человека подбрасывают квантовые монеты, в действительности они подбрасывают *одну* монету, и результат можно видеть в двух местах — это похоже на выключатель, который включает две лампочки сразу. Таким образом, казалось бы, отдельные частицы теряют свою индивидуальность так же несомненно, как это происходит в случае других интерпретаций запутанности. Отказ от реализма не устраняет нелокальность, а всего лишь иначе ее истолковывает.

Сравните «согласованную случайность» Файна с направляющим полем Бома. Интерпретация Файна не подчиняется принципу делимости: два, казалось бы, различных события на самом деле не являются *двумя* событиями. Интерпретация Бома насмехается над принципом локального действия: две частицы могут общаться бесконечно быстро. Следовательно, каждый из этих вариантов подчиняется одному аспекту локальности и нарушает второй. Эйнштейн считал отсутствие любого из аспектов «полностью недопустимым». С точки зрения эксперимента эти варианты также зашли в тупик. Оба

запрещают использование нелокальности для передачи сигналов, и оба по одной и той же причине: вы не можете управлять частицами.

На протяжении всей этой книги я следовал за Эйнштейном и рассматривал принципы делимости и локального действия как единый комплекс. Одна из причин состоит в том, что, хотя их можно было бы разделить в кратком изложении, в реальности они почти всегда сопутствуют друг другу. Например, предположим, что Бом прав, и принцип локального действия не соблюдается. Это означает, что объекты могут действовать друг на друга, даже если они не соприкасаются. Эти объекты теряют свою независимость. Нарушение принципа локального действия также лишает какого-либо смысла принцип делимости. Предположим теперь, что Файн прав, и принцип делимости не соблюдается. Это значит, что нет никаких отдельных объектов. Но если нет отдельных объектов, то как можно говорить об объектах, находящихся в прямом контакте? Принцип локального действия теряет смысл.

Пространство обречено, как бы там ни было

В целом совершенно не нужно разрешать споры о нелокальности для осознания того, что пространство не выполняет те функции, которые люди всегда ему приписывали. Если одна частица может влиять на другую мгновенно, местоположение теряет смысл — быть где-то означает быть всюду. Если одно событие проявляется в двух местах, то эти два места скорее не связаны друг с другом, а превращаются в одно. Пространство — это зеркальный зал. Каков тогда его смысл?

Эйнштейн не случайно назвал квантовую нелокальность «призрачным действием на расстоянии», а не просто «действием на расстоянии». Она в корне отличается от известных ранее типов нелокальности, о которых я говорил в главе 2. Сила гравитации Ньютона также действует мгновенно, но по крайней мере она ослабевает, когда вы удаляетесь от притягива-

ющего вас объекта, и, таким образом, все же обладает пространственными качествами. Однако запутанность не только действует мгновенно, но и совершенно не теряет своей силы с расстоянием. Это похоже на связь между влюбленными: она зависит только от того, что происходило между ними в прошлом, и совершенно не теряет своей силы независимо от того, насколько далеко друг от друга они находятся. Как романтично! Однако частицы не должны быть романтиками. Они должны быть шестеренками в часовом механизме пространства.

Я думаю, что вместо представления квантовой нелокальности явлением, происходящим в пространстве, мы должны воспринимать ее как знак обреченности самого понятия пространства. «Мы на самом деле должны пытаться понять эти корреляции не как результат законов или воздействий, а как органическое следствие понимания того, какие степени свободы лежат в их основе», — говорит Дженанн Исмаэль, философ из Аризонского университета. Как выразился один из учителей Эйнштейна, отдельные объекты сами по себе исчезают и становятся лишь тенями, и только что-то похожее на их союз сохраняет независимое реальное существование. Вселенную нельзя разрезать на отдельные области пространства, ее нужно рассматривать холистически.

«Холизм» — это слово, с которым нужно обращаться осторожно. Мало того что это понятие само по себе скользкое, оно еще стало символом недовольства наукой и современной жизнью вообще. Многие ученые и философы в качестве защитной реакции избегают этого слова в принципе. Я видел, как ученые выворачиваются наизнанку, пытаясь избежать описания квантовых явлений как холистических. У меня нет таких проблем. Нелокальность действительно означает, что мы живем в холистической Вселенной, которая не может быть сведена к своим пространственным частям. Мир обладает качествами, которые скрыты от нас, когда мы рассматриваем его по частям, но которые обнаруживают себя, когда мы воспринимаем его в целом. В конечном счете именно поэтому мы не можем использовать

квантовую нелокальность, чтобы отправлять сообщения. Чтобы измерить холистические свойства пары запутанных частиц, необходимо измерять обе частицы одновременно. Такие свойства не будут заметны, если измерять только одну частицу саму по себе. Поэтому нельзя воздействовать на одну частицу, ожидая, что кто-то, наблюдая за другой частицей, заметит какое-либо изменение.

Холизм, о котором мы говорим здесь, существует на значительно более глубоком уровне, чем то, о чем говорят учителя йоги или специалисты, практикующие альтернативную медицину. Как ни странно, чувства, которые движут этими сторонниками холизма, — ощущение взаимосвязи с остальной частью природного мира и неудовлетворенность тем, что современная медицина не в состоянии рассматривать всего человека в целом, — опираются на нехолистическую физику. Нельзя чувствовать свою взаимосвязь, если нет никакого «я». Наша человеческая индивидуальность и целостность требуют, чтобы мир состоял из независимых частей. Таким образом, мир вполне может быть целостным, но он не был пригодным для жизни, пока не разделился. Именно *разделение* мира, а не его взаимосвязанность, должно вызывать удивление.

«Квантовые корреляции просто происходят каким-то образом за пределами пространства-времени», — заключает Жизан. Чтобы объяснить эти корреляции, физики и философы должны выйти за рамки пространства-времени, а также за рамки квантовой механики. Теория предоставляет варианты, но не предлагает окончательного решения, и стандартный набор экспериментов не сильно добавляет ясности. «Возникает соблазн думать, что холизм указывает на фундаментальную ошибку в самом нашем понимании пространства и времени, — писал Модлин. — В конце концов, если... частицы 1 и 2 так фундаментально взаимосвязаны, возможно, мы ошибаемся, думая, что они действительно разные и занимают разные области пространства-времени. И возможно, наши понятия пространства и времени могли бы остаться после их фундаментального

пересмотра. Но несостоятельность редукционизма в квантовой механике не заставляет нас выбирать этот вариант».

Ситуация меняется, когда ученые смотрят со стороны на другие области физики. Нелокальность не исчезает, как надеялись многие. Она даже сильнее укореняется, и новые типы нелокальности усиливают согласованность частиц, о которой говорил Эйнштейн. Эти новые явления не просто свидетельствуют об ошибочности представлений о пространстве, они кричат о ней. «Не сомневаюсь, что у пространства-времени нет будущего, — говорит Жизан, — но я уверен, что будет что-то интересное».







Нелокальность и объединение физики

Когда Стив Гиддингс собрался в 2003 г. покорять вершину Денали, он, естественно, выбрал один из самых сложных маршрутов — Кассин Ридж. Этот маршрут проходит через зону лавин и ледниковых расселин, которая носит название Долина смерти. Спасатели с трудом спускают вниз погибших там альпинистов, иногда они даже не могут найти тела. Маршрут Кассин Ридж — комплексный тест альпинистского мастерства: техники скало- и ледолазания, преодоления расселин, выживания в арктических условиях и, не в последнюю очередь, выдержки. Гиддингс тренировался в горах в окрестностях Санта-Барбары, где он многократно взбирался на крутые склоны и спускался в ущелья с рюкзаком весом более 20 кг. Подъем на Денали начался хорошо, но напарник Гиддингса очень сильно стер ноги. А когда они добрались до верхнего базового лагеря на высоте 4000 м, их накрыла буря, и подъем пришлось прекратить. Даже обычный маршрут был закрыт. «Мы видели, как группы альпинистов, почти достигших следующего лагеря на высоте 5000 м, поворачивали назад под натиском непогоды», — вспоминает Гиддингс.

Работа Гиддингса в сфере исследования черных дыр — своего рода интеллектуальный эквивалент восхождения на Денали.

Эти загадочные космические объекты служат комплексным тестом для современной физики. Из-за чудовищной силы притяжения их анализ требует применения уравнений теории гравитации, а именно общей теории относительности Эйнштейна. А поскольку там также сильны квантовые эффекты, необходимо учитывать и квантовую теорию. Так что обойтись какой-то одной теорией и таким образом облегчить работу не удастся. Но если вы применяете обе эти теории к черным дырам, то они не стыкуются. Чтобы выйти из теоретического тупика, Гиддингс в начале 1990-х гг. выдвинул предположение о том, что в этих объектах действует нелокальный механизм.

Эта идея вызвала бурю. В физике, как и в альпинизме, трудно определить, когда нужно энергично продолжать, а когда повернуть назад, — упрямство вознаграждается в этой области, но до определенного уровня. Гиддингс решил переключиться на другие проблемы. «Возможно, ученое сообщество было еще не готово к этому», — говорит он. Большинство его коллег, отказываясь от локальности, не увязывали две теории настолько, чтобы покончить с проблемой. Эйнштейн и другие создатели теорий занимались этим с явной целью исключить нелокальность из физики. Ньютоновское тяготение действовало на расстоянии словно по волшебству, а общая теория относительности разломала волшебную палочку на две части. Таким же образом квантовая механика в своей первоначальной инкарнации описывала, как частицы реагируют на силы, но умалчивала о том, как передаются эти силы. Иными словами, она неявно предполагала, что силы перепрыгивают через пространство. Физикам пришлось создать ее новую версию, получившую название квантовой теории поля, чтобы ввести механизм распространения. До сих пор они представляют общую теорию относительности и квантовую теорию поля студентам и публике как лучший пример локальности.

Вместе с тем физические теории, как и горы, обладают сверхъестественной способностью преподносить неожиданности. При создании любой теории физики объединяют идеи,

возникающие вследствие экспериментов и интуитивных прозрений. Результат неизменно выходит за пределы изначального контекста. Генрих Герц, внесший значительный вклад в создание теории электромагнетизма в XIX в., заметил: «Невозможно изучать эту удивительную теорию без ощущения, что математические уравнения живут самостоятельной жизнью и обладают собственной логикой, что они умнее нас и даже своего разработчика, что они говорят больше, чем он вложил в них». То же самое происходило и столетие спустя с общей теорией относительности и квантовой теорией поля. Независимо от намерений создателей эти теории открылись другой стороной, когда физики стали применять их. Действие сил природы оказалось пронизанным эффектами нелокальности.

Эта глава посвящена примерам нелокальности, которые отличаются от тех, что пугали Эйнштейна в свое время. Они показывают, что локальность, наблюдаемая нами в повседневной жизни, не обязательно характерна для реальной сущности вещей. Хотя силы действуют локально — их влияние распространяется в пространстве с ограниченной скоростью, — эта локальность, похоже, не лежит в основе структуры мира. В нем нет отдельных объектов, которые сообщают и воспринимают эти силы, мир нельзя разделить на независимые пространственные части. А раз так, то пространство не должно быть истинным предметом физики.

Потребовались десятилетия, чтобы большинство физиков переварили эти особенности теорий. Перелом наступил в 1990-х гг. В то время теоретики, работавшие над объединением физики, были разделены на два лагеря, которые пришли к сходным заключениям относительно нелокальности. Сторонники подхода, известного как петлевая квантовая гравитация, утверждали, что силовые поля — это большой клубок, который связывает удаленные части пространства друг с другом. Что касается конкурирующего подхода, теории струн, то он настолько отошел от первоначальной идеи — представления элементарных частиц в виде вибрирующих нитей или спи-

ральной энергии, — что физики стали именовать его не иначе как «теорией, ранее известной как теория струн». Сторонник теории струн Хуан Малдасена, раньше представлявший Гарвард, а теперь работающий в Институте перспективных исследований, предложил концепцию, известную как «AdS/CFT-соответствие», согласно которой кажущиеся удаленными участки на деле могут располагаться один над другим. То, что кажется расстоянием в пространстве, в реальности представляет собой различие в энергии.

Дон Маролф, коллега Гиддингса по Калифорнийскому университету в Санта-Барбаре и один из немногих вхожих в клубы сторонников и теории петлевой квантовой гравитации, и теории струн, рассказывает, как нелокальность выплыла из небытия: «В конце 1980-х — начале 1990-х гг. дискуссия заметно активизировалась в результате рождения и становления теории петлевой квантовой гравитации, которая сделала вопрос более актуальным для растущего сообщества. Затем в 1997 г. Малдасена обнаружил AdS/CFT, и это вызвало большой интерес у *значительно* более широкого сообщества».

В результате, когда Гиддингс в 2001 г. вновь вернулся к теме нелокальности в черных дырах, к нему отнеслись совершенно не так, как раньше. Нелокальность больше не казалась чем-то бредовым. Более того, она теперь воспринималась теоретиками как нечто совершенно естественное. Если уж в квантовой теории поля и в теории гравитации присутствовала нелокальность, то существование определенного нелокального механизма в черных дырах выглядело вполне правдоподобно. Получив поддержку в сфере профессиональных интересов, Гиддингс два года спустя решился на восхождение на вершину Денали. В течение 10 дней он с напарником переждал непогоду в базовом лагере. Когда небо наконец прояснилось, Гиддингс с еще одной группой альпинистов успешно достиг вершины. «Самой потрясающей частью этого предприятия был спуск на лыжах по леднику Кахилтна следующим вечером в характерных для Аляски сумерках, когда соседние пики

Аляскинского хребта отбрасывали на лед тени, чередующиеся с пятнами света, — говорит он. — Я никогда не забуду красоту того момента».

Квантовая теория поля

Как я говорил в главе 3, Эйнштейн и другие разрабатывали квантовую механику с тем, чтобы разрешить парадоксы, связанные с классической концепцией света. Каково же было разочарование, когда оказалось, что первое математическое описание теории не может объяснить природу света. Уравнения прекрасно описывали материальные частицы, движущиеся с умеренными скоростями, но не налагали никаких ограничений на скорость, как того требовала теория относительности. В результате они не могли справиться с объектами, движущимися с околосветовой или световой скоростью. Невозможность рассмотрения света, движущего со скоростью света, была серьезным недостатком.

Квантовая теория поля была совместной с теорией относительности, а значит, и со светом и представляла собой развитие квантовой механики. При ее разработке физики в 1920–1930-х гг. применяли два подхода в зависимости от того, чем они считали свет — частицей или волной. Одни, например Поль Дирак в Англии, а позднее Ричард Фейнман в США, придерживались версии частиц и рисовали атомистскую картину, где крошечные бильярдные шары соударялись и отскакивали при столкновениях. Такую картину нужно было лишь немного усложнить, добавив в нее возможность возникновения и аннигиляции шаров на лету. Атомы испускали свет, создавая фотон, и поглощали его, разрушая фотон. Классические электромагнитные волны формировались из огромной массы фотонов. Еще один электромагнитный феномен, такой как статическое электричество и магнитные силы, тоже можно было представить как фотонный бильярд. Хотя эта теория изначально распространялась только на фотоны и электроны, позднее в нее

включили нейтрино, кварки, бозоны Хиггса и прочих представителей субатомного зоопарка.

Другие теоретики, такие как физик австрийского происхождения Вольфганг Паули, отдавали предпочтение волнам. Для них мир был чем-то вроде водоема во время ливня, покрытого кругами, которые появлялись, распространялись и сливались. «Водоем» — это невидимое для нас электромагнитное поле, которое заполняет пространство вокруг. Волны всех видов бороздят его вдоль и поперек: длинные, короткие, высокие, низкие. Теоретики применяют квантовую механику к каждому типу волн и суммируют эту удивительную неразбериху. В соответствии с такой точкой зрения то, что мы воспринимаем как «частицы», — это не крупинки материи, а единицы волновой энергии.

Как ни удивительно, подходы, основанные на частицах и волнах, приводят к получению одних и тех же уравнений. Нет никакой необходимости разграничивать их. Свет, да и не только его, а любую форму энергии и материи, можно считать имеющим корпускулярную или волновую природу, а предмет можно называть как физикой частиц, так и квантовой теорией поля. (Даже сейчас физики используют эти названия как синонимы.)

Достижением в значительной мере было взаимоувязывание этого с теорией относительности. Создатели квантовой теории поля включили в нее *не всю* теорию относительности — они оставили данное Эйнштейном объяснение гравитации на потом и сосредоточились на том, чтобы частицы или волны не превышали скорость света. Это оказалось неожиданно сложным делом. Как подчеркивал Паули, движущаяся частица или волна может прекратить существование в любой момент и передать свою энергию новым частицам или волнам, сводя на нет ваши попытки отследить ее и тем более узнать, нарушает ли она установленное ограничение скорости. Вместо введения ограничения как такового Паули сконцентрировался на *последствиях* превышения скорости, подобно полицейско-

му, который выписывает вам штраф не на основании показаний своего радара, а на основании того факта, что вы добрались до дома быстрее, чем предполагалось.

Представьте, что пространство разделено на две части: на такую, где сигнал может прийти в течение определенного времени, и такую, где это невозможно. Если вы посылаете сигнал, а предполагаемый получатель находится в первой части, то он должен получить его. Если же получатель находится во второй части, то просто забудьте о сигнале. Физики называют это правилом «микропричинности». Под «причинностью» понимается тот факт, что подача сигналов является хрестоматийным примером причинно-следственной связи. Микропричинность оставляет за кадром, что именно является носителем сигнала: частица, волна или что-то еще. Существует определенное расхождение во мнении, можно ли считать микропричинность основным уроком, почерпнутым из теории относительности, однако альтернативы также делят пространство на зоны, которые свет либо может, либо не может достичь.

Все эти особенности квантовой теории поля отражали интуитивную приверженность физиков локальности. Обе конкурирующие картины мира, дававшие начало теориям, — частицы или волны — были локальными. Частицы — это локализованные кусочки материи, которые взаимодействуют друг с другом только при прямом контакте или через посредство других частиц. Волны в поле передают силы из одного места в другое в результате непрерывного движения без каких-либо сверхъестественных нелокальных прыжков. В самом деле, единственная причина, по которой Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл ввели понятия электрического и магнитного полей, как было отмечено в главе 2, заключалась в стремлении сохранить локальность. Микропричинность или любое другое эквивалентное правило гарантирует, что частицы или волны движутся с конечной скоростью, и, таким образом, обеспечивает изолированность отдельных частей пространства.

Фраза «физики разработали квантовую теорию поля» подразумевает, что они знали, что делают. На деле они спотыкались сплошь и рядом и глубоко сомневались в отношении того, в ту ли сторону идут. Объединяя элементы квантовой механики и теории относительности, физики совершали бракосочетание под дулом пистолета с непредсказуемыми последствиями. И по сей день они пытаются постичь, что именно квантовая теория поля говорит им о мире. Как мы видели в предыдущей главе, обычная квантовая механика не является образцом прозрачности во всех смыслах, однако она по крайней мере довольно проста с точки зрения математики — для проведения вычислений не требуется даже калькулятор. Квантовая теория поля — другое дело. Она заслужила репутацию самого математически сложного предмета в науке. Даже экспертам приходится сражаться с ним изо всех сил. Джо Полчински из Института теоретической физики в Санта-Барбаре говорит, что он дважды прослушал курс теории, получил степень доктора философии*, но так до конца и не освоился с ним.

Выяснять смысл физики — дело философов, однако жуткая сложность квантовой теории поля отпугивает большинство из них. Одним из тех, кто не испугался, является Ханс Халворсон из Принстонского университета. Больше всего на свете ему нравится продираться сквозь математические дебри. Он из тех, кто самостоятельно рассчитывает свои налоги каждый год да еще сетует, что это слишком просто. «Когда я в аспирантуре начал влезать в квантовую теорию поля, мне было так интересно, — вспоминает он. — Это нескончаемый поток проблем». Любовь к разгребанию алгебраических нагромождений — именно то, что нужно для этого предмета. Если уж на то пошло, перед Халворсоном, в отличие от других философов, стоит противоположная проблема: он борется с понятийным мышлением, краеугольным камнем философии. Одна-

* Ученая степень, присуждаемая в западных странах во всех научных областях. В данном случае речь идет об аналоге нашей ученой степени кандидата физико-математических наук. — *Прим. науч. ред.*

ко тот факт, что построение философской базы дается нелегко, лишь подзадоривает его — это вершина, которую он решил покорить. «Я склонен подходить к вещам чересчур математически, — говорит он. — Один математик как-то посоветовал мне: “Оторвись ты от этих формул на минуту”. Математик называется!.. Самое трудное — интерпретировать смысл математики».

Прощайте, частицы

Это означает со всей очевидностью, что наш мир не состоит ни из частиц, ни из полей, по крайней мере в той форме, в которой их обычно представляют: как структуры, олицетворяющие принцип локальности. Физики по-прежнему говорят о «квантовых частицах» и «квантовых полях», но это звучит как «общеизвестный секрет» или «оплачиваемый доброволец». Под определением «квантовый» понимается «подобная частице, но не частица» или «имеющее совершенно непохожие на поле характеристики».

Возьмем для начала подход с точки зрения частиц. В соответствии со старой квантовой механикой положение и скорость частицы неопределенны. Вы не знаете, где она окажется или как быстро будет двигаться. Но по крайней мере она находится *где-то*. Это правило перестает выполняться, как только вы принимаете во внимание теорию относительности, что приходится делать, если скорости приближаются к скорости света. Логика ведет нас назад к ключевому факту квантовой неопределенности. Скорость и положение частицы не являются независимыми величинами. Если известно рассеяние возможных скоростей, то можно рассчитать рассеяние возможных положений, опираясь на принцип неопределенности Гейзенберга, и наоборот. Теория относительности нарушает это преобразование, требуя, чтобы принцип неопределенности был независимым от наблюдателя. Теперь при преобразовании скорости в положение оказывается, что разные позиции больше не являются взаимоисключающими. Одну и ту же частицу можно обна-

ружить одновременно в двух местах или найти частицу в одном месте, а ее энергию где-то еще. Объединение квантовой механики с теорией относительности нарушает локальность в том аспекте, который был для Эйнштейна принципиальным: оно нарушает положение о том, что все вещи имеют свое место.

Соединение относительности с нелокальностью означает полный переворот. Эйнштейновское ограничение космической скорости должно было покончить с нелокальностью, а не подкреплять ее. «Увидев это, мы говорим: “Ну вот, а нам казалось, что все позади”, — замечает Халворсон. — Все считают, что относительность устраняет нелокальность, а здесь она, наоборот, *приводит* к нелокальности».

В проведенном в 1949 г. авторитетном анализе пионер квантовой теории Юджин Вигнер и его студент Тед Ньютон показали, что частица может иметь однозначное положение, только если теория относительности не применяется при определении положения. В этом случае, однако, наблюдатели должны расходиться во мнении о том, на что похожа Вселенная, и, таким образом, привносить в физику опасную субъективность. Это слишком большая жертва, да к тому же она не решает проблему. Теперь наблюдатели должны расходиться во мнении не только о положении частицы, но и о существовании этого положения в принципе. Одни могут сужать место положения частицы до ограниченной области, а другие предполагать ее материализацию в любой точке Вселенной. Те же наблюдатели, которые все же обнаруживают частицу в некотором четко определенном месте, могут увидеть, как она неожиданно перепрыгивает в отдаленную область Вселенной — эффект, который, если он реален, должен позволить инженерам создать сверхсветовую коммуникационную систему. Можно, конечно, сказать: давайте оставим попытки определить точное положение частиц и просто пересчитаем их. Но даже такая скромная задача окажется невыполнимой, поскольку разные наблюдатели будут давать разные ответы.

В общем, квантовая теория поля говорит, что поиск частиц сродни игре в наперстки. Их невозможно засечь, они могут

исчезать из одного места и появляться в другом, нельзя получить даже согласованной оценки их количества. Эти проклятые штучки начинают казаться сплошным надувательством. Большинство физиков и философов пришли к выводу, что маленькие бильярдные шарики просто не могут существовать в нашей Вселенной. «Нет ничего, что действительно можно привязать к определенному месту», — говорит Халворсон.

«Частицы», которые описываются в уравнениях квантовой теории поля, фактически являются разновидностью волны. Такие «частицы» не существуют в каком-то одном месте, они распределены по всему полю подобно тому, как звук, извлеченный с помощью гитарной струны, не существует в каком-то ее месте, а распространяется по всей длине. Единственная причина для использования термина «частица» заключается в том, что это образование представляет дискретный сгусток энергии и импульса*. Но даже такое усеченное применение слова «частица» работает только тогда, когда энергию и импульс можно разделить на независимые сгустки. В случае интенсивного взаимодействия полей волны настолько перепутаны, что частицы перестают существовать даже при таком вольном определении.

Физики привычно рассуждают о частицах. Почти все, что написано о физике, от учебников до надписей в туалете, связано с частицами. Во многих случаях разговор о частицах по-прежнему имеет смысл. Однако в том языке, на котором говорит сама природа, такого слова нет. Каждый раз, когда вы видите нечто напоминающее частицу, с этим объектом необходимо разбираться более тщательно. Например, наиболее широко используемое описание квантовой теории поля — фейнмановская система контурных рисунков, о которой я говорил в главе 1, — показывает взаимодействие частиц в определенных местах в пространстве и времени. Диаграммы Фейнмана обычно используются для изучения сценариев столкновения двух частиц.

* В ряде случаев этот сгусток имеет электрический заряд, спин и другие «приписываемые» частице атрибуты. — *Прим. науч. ред.*

Однако описание любого такого сценария требует бесконечного множества диаграмм, хотя вполне можно обойтись «всего лишь» сотнями или миллионами. Отдельно взятая диаграмма не имеет ничего общего с реальным миром — только совокупность множества таких диаграмм имеет смысл. Таким образом, диаграммы — это всего лишь полезный математический аппарат, способ разбивки крупной проблемы на удобоваримые части вроде статистических данных, которые говорят, например, что в средней американской семье 1,9 ребенка и 2,3 автомобиля. Частицы, которые появляются на этих диаграммах, в том числе «виртуальные частицы», нередко фигурирующие в дискуссиях физиков, не более чем умозрительные образы. «Они фактически ничего не могут сказать о реальности», — говорит Халворсон.

Физики-экспериментаторы, со своей стороны, создают детекторы вроде камеры Вильсона, которые, понятное дело, должны обнаруживать частицы. На деле все, что они регистрируют, так это небольшие всплески волновой энергии — мимолетные возмущения, подобные отблескам солнца на беспокойной поверхности водоема. Очень соблазнительно соединить полученные точки и предположить, что это следы частички материи, пролетевшей через прибор. Не поддавайтесь этому соблазну.

Прощайте, поля

Если мир не состоит из частиц, то по умолчанию он должен состоять из полей, так ведь? Максвелл представлял электрическое и магнитное поля как совокупность конвейерных лент и вращающихся барабанов — подобно сталепрокатному заводу времен промышленной революции. Мы — дети информационной эпохи и можем сравнивать поля с жидкокристаллическим телевизором или компьютерным дисплеем, т. е. с мозаикой крошечных пикселей. Чтобы развить эту аналогию, нарисуем каждый «пиксель» в виде локальной штучки вроде частицы, но зафиксированной на месте. У него есть признаки, аналогичные яркости и цвету. Он может оказы-

вать силовое воздействие на объекты, реагировать на силы, прикладываемые к нему, и взаимодействовать с ближайшими соседями. Если, например, поместить компас в магнитное поле, ближайшие пиксели захватят стрелку и повернут ее в соответствии с собственным направлением. И наоборот, если взять магнит, то ближайшие пиксели будут реагировать на него, их соседи начнут реагировать на их реакцию, и рябь распространится по экрану. Такая метафора работает хорошо при условии, что вы воображаете экран с бесконечным разрешением, где элементы — это не крошечные квадратики света, а геометрические точки нулевого размера. Они образуют континуум без стыков или зазоров.

Это была грандиозная идея, как ни крути. Однако квантовая теория поля разрушает классическое представление о поле так же безжалостно, как она сметает частицы. Тезкой «полей» в квантовой теории поля является массив не элементов, а операций. Поле может оказывать воздействие, и на него можно воздействовать в конкретных местах. Оно может заставить стрелку компаса повернуться, оно может поглощать энергию, которую вы закачиваете в него. Но что создает эти эффекты? Теория об этом умалчивает. Она страдает все той же неоднозначностью интерпретации, которую мы видели у старой квантовой механики. Квантовая теория поля определяет, что поле делает, но не что оно представляет собой. И чем бы оно ни было, это определенно не может быть скоплением пикселей. Приведенные ранее аргументы против частиц также исключают из картины пиксели, расположенные в каждой точке пространства. Поле не может быть и любой другой разновидностью локальной структуры, поскольку оно обладает нелокальными свойствами. Что поле делает в одной части пространства, зависит от того, что оно делает в других частях. Понятие поля, по словам Халворсона, «похоже, становится своей противоположностью в квантовой теории поля. Вы можете разрезать пространство на блоки, однако эти блоки будут тесно связанными друг с другом. Мы перечеркиваем собственные теоретические достижения».



Запутанность на стероидах

Квантовая теория поля предполагает существование двух явных типов нелокальности. Первый — это интенсивная форма квантовой запутанности. Осторожные намеки на нее впервые появляются в работах Фейнмана, показавшего, что частицы могут превышать эйнштейновский предел скорости до тех пор, пока их не поймают, т. е. до тех пор, пока они не передадут информацию или не вызовут какое-либо событие, которое в противном случае не произойдет. Позднее физики признали фейнмановское сверхсветовое распространение разновидностью призрачной синхронности запутанных частиц. Запутанными, правда, являются не частицы, а точки поля. Если поместить измерительные приборы в разных частях поля, их показания могут совпадать, даже если ничего не проходит через разделяющее их пространство.

Теория относительности превращает запутанность полей в более чем перелицованную на новый лад версию обычной запутанности частиц. Напомню, что наблюдатель видит пространство как бы разделенным на две части, одна из которых достаточно близка, чтобы получить сигнал через определенный промежуток времени, а другая слишком удалена. Чтобы не нарушать это разделение, волны, распространяющиеся в поле, должны складываться правильным образом. Их высокая степень координации подразумевает наличие сильной связи между отдаленными местами. «Сам факт ограниченности импульса вещества... означает, что состояние вещества связано с положением в пространстве», — говорит Халворсон.

Результатом является то, что он и его коллеги называют «суперзапутанностью». Если обычная запутанность обуславливает связанность определенных аспектов двух или более частиц, таких как поляризация, то суперзапутанность приводит к связанности *всех* аспектов *всего*. Это не просто частица здесь и частица там. Каждая точка пространства запутана с каждой другой точкой. Это распространяется даже на точ-

ки, лежащие за пределами наблюдаемой вселенной. Помимо прочего, такая запутанность связывает настолько крепко, что напоминает затянутый узел на шнурках малыша из детского сада. Если связь между запутанными частицами можно разорвать, то разъединить поле невозможно.

Такая сложная паутина нелокальных связей создает впечатляющие эффекты. Она позволяет проводить эксперимент с волшебными монетами, описанный в главе 1, без канители, связанной с созданием и обменом запутанными частицами. Просто выдергивайте монеты из ничего, т. е. из полей, которые уже окружают вас, и подбрасывайте их. Они будут падать орлом или решкой случайным образом, но всегда согласованно друг с другом. Для усиления эффекта можно даже экспериментировать с идеальным вакуумом, а не с видимыми частицами. Просто разместите пару измерительных приборов в поле, они зарегистрируют его остаточную случайную вибрацию, и показания будут одинаковыми. «Забудьте об эксперименте, — говорит Халворсон. — За вас его проведет Вселенная».

Как любезно с ее стороны. Но эта благотворительность не безгранична. Эксперимент провести крайне трудно, и, несмотря на различные предложения, никто так и не попытался осуществить его на практике. Одна из причин в том, что для удовлетворения полем правила микропричинности и связанных с ним условий корреляция должна быть высокоспецифичной с точки зрения места. Ситуация напоминает неравномерность работы сотового телефона у меня дома: на кухне индикатор сигнала показывает пять делений, а в столовой сигнал падает до нуля. Стоит поменять сотового оператора, и сигнал вполне может появиться в столовой, но пропасть на кухне. По аналогии измерительные приборы физика могут зарегистрировать призрачную корреляцию в первый момент, но дать нулевой результат при самом незначительном смещении. В новых местах поле по-прежнему будет запутанным, однако экспериментатору придется перейти на измерительные приборы другого типа, чтобы и дальше детектировать корреляции.

ляцию. По словам Халворсона, поле «имеет эту нелокальность на всех расстояниях, но любой конкретный вид нелокальности будет затухать». Если физики смогут решить эту техническую проблему, то поля могут стать предпочтительным источником запутанности в целях квантовой криптографии и вычислений.

Запутанность полей делает возможным существование совершенно новых классов явлений. Можно установить запутанность атома с полем, а потом поля со вторым атомом. В этот момент два атома окажутся запутанными друг с другом, хотя они и не взаимодействуют напрямую. Запутанность также определяет существование вещества в других фазах помимо твердого, жидкого и газообразного состояния. Обычные фазы определяются расположением атомов и молекул: например, в кристалле они располагаются ровными рядами, а в газе распределены беспорядочно. Новые фазы организованы более сложно и подчиняются хореографии, достойной какого-нибудь индийского фильма. В этих ситуациях нелокальные эффекты не размываются с расстоянием и обеспечивают существование материалов с такими свойствами, которые когда-то казались волшебными, вроде сверхпроводимости, когда электрический ток течет без сопротивления.

До сравнительно недавнего времени большинство теоретиков считали такие явления дешевыми трюками. «Запутанность традиционно мало трогала моих коллег и меня, — рассказывает теоретик Нима Аркани-Хамед. — Непрофессионалам она нравилась — здорово, все действия происходят в других местах. Тот факт, что интерес к запутанности может окупиться нетривиальным образом, удивителен». Сейчас он считает, что запутанность полей вполне способна стать определяющей особенностью квантовой теории поля: «Правильным подходом к осмыслению квантовой теории поля может стать представление о ней как о взаимной запутанности областей».

Возвращаясь к нашей метафоре с жидкокристаллическим телевизором, можно представить запутанность полей как множество проводников на задней части экрана, которые связыва-

ют пиксели друг с другом. Для большинства целей это неплохой образ, к тому же он позволяет представлять поле в принципе так же, как это делали Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл. Однако по большому счету он никуда не годится. Запутанность не означает координацию яркости и цвета одного пикселя с яркостью и цветом другого. Смысл ее в том, что индивидуальные пиксели фактически не имеют яркости и цвета — этими атрибутами обладают только группы запутанных пикселей. Запутанное поле обладает холистическими свойствами, которые не существуют в любом отдельно взятом месте, а заполняют все пространство.

Вычеркивание калибровочной теории

Второй тип нелокальности в квантовой теории поля представляет собой не квантовый эффект, а внутреннюю структуру, присущую электрическому, магнитному и другим силовым полям. Вы можете получить некоторое представление о ней, глядя через окно на высоковольтную линию электропередачи и птиц, которые совершенно спокойно сидят на проводах. Птицы не поджариваются потому, что высокое напряжение само по себе не оказывает никакого эффекта. Они гибнут от электрического разряда только тогда, когда касаются одновременно двух проводов, создавая перемычку, по которой течет ток. Что приводит к возникновению электрического разряда, так это разность напряжений, или, точнее, разность электрических потенциалов.

Это свойство электричества называют калибровочной инвариантностью, поскольку электрическое воздействие не меняется в зависимости от того, повышаете вы или понижаете потенциал, пока разность потенциалов остается постоянной. Два проводника могут иметь потенциалы 0 и 120 вольт, 120 и 240 вольт или 1 000 000 и 1 000 120 вольт, и вы никогда не почувствуете разницу. Самую зрелищную демонстрацию этого принципа осуществил Фарадей. Впервые он сделал это

в 1836 г., и с тех пор его эксперимент неизменно вызывает охи и ахи зрителей в музеях науки. Фарадей соорудил деревянный куб высотой 3,5 м, обмотал его медным проводом и оловянной фольгой и забрался внутрь. Его помощник подвел к внешней обмотке электрический заряд с помощью гигантского электростатического генератора, сообщив кубу и тому, что было внутри, высокое напряжение. Электрические разряды начинали с треском пронизывать окружающее пространство, будто разверзлись врата ада. Фарадей же преспокойно проводил электрические эксперименты, словно он находился в тихом коттедже на берегу моря. Высокое напряжение не оказывало на него никакого влияния. Он писал: «Я входил в куб, двигался в нем, зажигал свечи, пользовался электрометрами и другими измерительными приборами и не мог обнаружить даже малейшего влияния на них или признаков чего-то необычного. В это время наружная поверхность куба была сильно заряженной, и с нее обильно сыпались крупные искры».

Аналогичная, разве что не такая красочная, картина наблюдается с магнитным полем. Оно обладает магнитным и электрическим потенциалом, и вы можете попеременно менять их оба, делая определение напряжения еще более зыбким. И другие силы помимо электромагнитных калибровочно-инвариантны. По правде говоря, слово «калибровка» по популярности у физиков-теоретиков стоит на втором месте после слова «кофе». Калибровочная инвариантность — центральный момент их концепции действия сил. Но что она означает? Почему значение имеет только разность потенциалов?

Теоретики обычно воспринимают калибровочную инвариантность как нечто само собой разумеющееся — как симметрию, или привлекательную сбалансированность, вроде сбалансированности окружности. Подобно тому как окружность при повороте не меняет своего вида, повышение и понижение потенциала не меняет ничего, поддающегося измерению. При таком представлении калибровочная инвариантность — это выражение элегантности природы, а физики питают сла-

бость к элегантности. Вместе с тем все большее число теоретиков находят такое объяснение неудовлетворительным. Повышение или понижение потенциала — это не физическое манипулирование миром, подобное вращению окружности; только разность потенциалов поддается нашему контролю. К тому же подозрительно то, что предполагаемая элегантность приводит ко множеству математических сложностей. «Учебники воспевают калибровочную симметрию, — говорит Аркани-Хамед. — Калибровочная симметрия — полная фикция. Это все в наших головах». Он считает калибровочную инвариантность признаком нелокальности: «Можно принять существование калибровочных полей за первый кивок среди большого множества намеков на необходимость отказа от локальности».

Локальность предполагает, что каждая точка пространства обладает свойствами, независимыми от других точек, т. е. провод должен иметь потенциал, определенный в абсолютном смысле. Возможно, это 1 000 000 В. Если птица, сидящая на этом проводе, ухватится второй лапой за провод с потенциалом 1 000 120 В, то разность потенциалов составит 120 В. Это выглядит очень разумным. Когда существует разность, наверняка должны быть два числа, которые вычитаются. Но если спросить электрика о потенциале одного провода — не о разности потенциалов между двумя проводами, а о потенциале отдельно взятого провода, — то он посмотрит на вас как на ненормального (и сдерет \$140 за потраченное время). Теоретик тоже лишится дара речи, если спросить его о том, как меняется потенциал во времени. Хотя уравнения Максвелла предсказывают значение потенциала, они также позволяют добавить к нему любое поправочное слагаемое. Локальность заставляет нас предполагать существование чего-то такого, что невозможно измерить или предсказать со всей определенностью. Ничего хорошего в этом нет.

Максвелл считал, что особенности конкретной ситуации — комбинация батарей, катушек и магнитов, соединенных вместе, — должны определять значение потенциала в каждой точ-

ке пространства. Однако неожиданно для себя предсказал, что возмущения потенциала должны переноситься с одного конца Вселенной на другой мгновенно. Открещиваясь от этой явной нелокальности, его ближайшие последователи вроде Генриха Герца объявили саму идею потенциала «глупостью» и торжественно обещали, довольно-таки эмоционально, «покончить» с ней. Они переписали уравнения Максвелла так, чтобы искоренить электрический потенциал как фундаментальный аспект природы. Уравнения, которые мы ныне называем максвелловскими, на самом деле не его.

Как бы эти уравнения в реальности ни назывались, они говорят о том, что все электромагнитные явления порождаются электрическим и магнитным полями, которые имеют определенную (и измеримую) силу везде в пространстве в соответствии с принципом локальности. Потенциал — это производная величина: она характеризует количество энергии, которое силовое поле может сообщить заряженным частицам. Математически потенциал — полезная, но опциональная концепция. Если вы действительно хотите вывести из себя того электрика, то говорите об электричестве, не употребляя слова «вольт». А если потенциал на самом деле не существует, неважно, можно ли его измерить или предсказать. Тот факт, что можно безнаказанно повышать или понижать его значение, не имеет фундаментального значения, а возмущения, способные распространяться мгновенно, — чистая выдумка.

•

Итак, физики Викторианской эпохи сочли, что акт теоретического убийства с их стороны примирил калибровочную инвариантность с локальностью. В середине XX в., однако, такие теоретики, как Поль Дирак, осознали, что присвоение главенства силовому полю не устраняет загадку. Силовое поле может выглядеть локальным, но при более глубоком исследовании у него выявляются определенные нелокальные свойства. Сила поля в определенном месте не может свободно принимать

любое значение, ему доступно только ограниченное меню, определяемое значениями в других местах пространства. Эти значения взаимозависимы, или, в соответствии с профессиональным жаргоном, взаимно «связаны». Если поле и похоже на жидкокристаллический телевизор, то на неисправный, где пиксели короткозамкнуты друг с другом так, что отдельный пиксель может включаться только при включении определенной комбинации других пикселей. Такой телевизор может воспроизводить лишь ограниченный набор изображений, например матчи Суперкубка, но не сериал «Аббатство Даунтон».

Примером такой связи является ориентация, или поляризация, световых волн. Свет может быть поляризован в двух направлениях. Именно поэтому в современных 3D-фильмах используется поляризованный свет: проектор создает два изображения на экране, каждое из которых имеет свою поляризацию, а 3D-очки позволяют каждому глазу видеть только свое изображение. Однако в этом есть нечто таинственное. Почему не бывает *трех* направлений поляризации? В конце концов, пространство имеет три измерения, т. е. три возможных направления движения. Некоторые типы волн, например сейсмические волны в земной коре, колеблются во всех трех направлениях. Почему свет не может этого? Из-за связи. Она соединяет разные точки поля, ограничивая диапазон их движения подобно связанным движениям исполнительниц канкана, которые выбрасывают ноги вперед, но никогда вбок. Математически связь определяется как свойства индивидуальных точек в пространстве, которые лишены автономии. Смысл локальности в отсутствии таких связей. Предполагается, что разные области поля независимы — способны влиять друг на друга, посылая возмущения через пространство, но не жестко взаимосвязаны в силу логической необходимости.

Чтобы подчеркнуть проблемность старого оптимистического представления о калибровочной инвариантности, в 1959 г. Дэвид Бом с Якиром Аароновым, тогда еще студентом, предложили квантовую версию эксперимента Фарадея. Индикато-

рами на этот раз служили электроны, а не зажженные свечи. Эксперимент оказался технически сложным, и физики не могли осуществить его до 1985 г., однако аналогичное тестирование магнетизма было проще, и его выполнили в течение года после предложения Бома и Ааронова. Результат: частицы ведут себя иначе внутри высоковольтной камеры. Волновая картина, которую они создают, смещается. Она смещается даже несмотря на то, что внутри камеры электрическое силовое поле равно нулю, — по классическим правилам электромагнетизма такого происходить не должно.

Для большинства физиков это прозвучало как гром среди ясного неба, и мало кто поверил в такое. Однако постепенно они признали, что локальные структуры не соответствуют реалиям электромагнетизма. Электрический потенциал — это слишком много: заданная разность потенциала может складываться из бесконечного множества абсолютных уровней потенциала, создавая более широкий набор возможностей, чем существует в природе. Электрическое поле — это слишком мало: оно недостаточно насыщено, чтобы уловить смещение волновой картины электрона, точно так же как экран компьютера не может должным образом передать насыщенность цветов картин Шагала. Теоретики нуждались в подходящей структуре. Когда локальные возможности исчерпаны, третий горшок каши, предположительно, должен быть нелокальным.

•

Философам потребовалось еще больше времени, чтобы переварить эти изменения. В числе первых был Ричард Хили из Аризонского университета. Если многие связывают свою любовь к науке с детскими впечатлениями — влиянием кого-то из родителей или учителя, открывшего им глаза на чудеса Вселенной, — то, по словам Хили, у него не было такого примера. «Меня окружали люди, которые знали множество вещей, но ничего не понимали в науке, — вспоминает он. — Я рос в такой обстановке». Школа лишь укрепила его

стремление поступать наоборот. «Физика в средней школе заставляла меня страдать, — говорит Хили. — Я ненавижу ее и знал, что эти парни что-то утаивают от меня. Мне хотелось знать больше, а этому не учили в средней школе». Его карьера тоже строилась на наблюдении за тем, что делают другие, и выборе чего-то иного. Поскольку философы в 1990-х гг. в массе своей отрицали калибровочную инвариантность, он, естественно, склонился на ее сторону. «В те времена я чувствовал себя очень одиноко», — признался он коллегам.

Хили завораживает то, что калибровочная инвариантность может привести к открытию нового типа нелокальности, совершенно непохожего на запутанность, которая так мучила Эйнштейна и Джона Белла. Электроны в эксперименте Ааронова — Бома не нужно было приводить в состояние запутанности или подготавливать как-то иначе. Они были больше «зрителями», чем «актерами». В силу своей волновой природы они чувствительны к таким аспектам мира, на которые обычные объекты совершенно не реагируют, и привносят в силовые поля своего рода спящую нелокальность.

Несмотря на отличие от запутанности, нелокальность калибровочной инвариантности имеет сходные эффекты. «Эффект Ааронова — Бома отличают от парадокса Белла, однако у них масса общего», — говорит Хили. Запутанность связывает частицы в единое целое, обладающее коллективными свойствами, которых нет у индивидуальных частиц. Калибровочная инвариантность аналогичным образом наделяет поля свойствами, которые не существуют ни в одном отдельно взятом месте, а присущи широкой области пространства. В обоих случаях система не является простой суммой ее пространственных частей в отличие от свойства локальности, которое Эйнштейн называл принципом делимости. Поле разделено почти по определению, поэтому нарушение этого принципа — плохая новость для понятия поля. В то же время и запутанность, и калибровочная инвариантность не противоречат другому определенному Эйнштейном аспекту локальности,

принципу локального действия, поскольку ни одно из явлений не позволяет передать сигнал, удаленно управлять дроном или транслировать восторженные чувства предмету обожания на другом конце земли.

Однако если силы не передаются ни полями, ни частицами, то как они вообще передаются? Хили придерживается идеи, восходящей к Дираку и получившей распространение среди физиков после эксперимента Ааронова и Боба. Она строится на следующем ключевом положении: потенциал в отдельно взятой точке может быть неопределенным, однако при сложении потенциалов множества точек, образующих замкнутый контур, его величина становится однозначной. Можно, например, от задней двери вашего дома обойти двор и возвратиться к исходной точке, измеряя по пути электромагнитный потенциал. Отдельно взятые показания будут зависеть от вашего произвольного выбора нулевого уровня потенциала, однако сумма всех показаний окажется независимой от этого выбора. Каким-то образом этот ряд показаний выявляет структуру природы, которую индивидуальные показания выявить не могут. Что бы ни заставляло электричество течь, а магниты притягиваться к холодильнику, это не аккуратная матрица вроде компьютерного дисплея, а запутанное кружево вроде вязаного шарфа. «Петли, а не точки — естественная колыбель электромагнетизма», — говорит Хили.

Петли разнесены (в нарушение делимости), однако передают электрические и магнитные силы, смещая друг друга (в соответствии с локальностью действия). При обычных обстоятельствах невозможно различить петли и классические поля. Фактически петли стянуты так сильно, что выглядят как точки в регулярной решетке. Однако истинный характер ткани проявляется, когда одна из петель цепляется за гвоздь и выдергивается. В эксперименте Ааронова — Боба наэлектризованная камера действует подобно такому гвоздю, вытягивая одну из петель и создавая эффекты, о которых Максвелл даже не подозревал. При попытке обнаружить эти эффекты с помо-

щью локальной структуры вроде потенциала остается некоторая неопределенность.

Мораль этой истории в том, что квантовая теория поля смешивается с нашим представлением о пространстве. Это не теория локализованных строительных блоков вроде частиц или пикселей — на деле такие вещи представляются невозможными. Это теория делокализованных структур, петель или чего-то еще. Технически этот факт не требует отказа от наших представлений о пространстве. Мы по-прежнему можем воображать, что петли или что-то другое вместо них существуют в пространстве. «Мы не теряем точки, — говорит Хили. — Эта структура, которая построена на них, нелокальна». Однако размещение петель в пространстве сродни проведению рок-концерта в консерватории. Вы можете сделать это, но все будет не на месте. Физики и философы всегда выводили природу пространства из поведения материи. Древнегреческие атомисты придумали концепцию пространства с тем, чтобы дать частицам место для существования. Для современных теоретиков пространство — это субстрат из полей. Если частицы и поля реально не существуют, пространство теряет свой смысл.

Эйнштейновская теория гравитации

Квантовая теория поля фактически сыграла с физиками шутку. Она локальна в одних отношениях, но нелокальна в других, и она заставляет нас сомневаться в том, является ли пространство таким, каким должно быть. Нечто подобное произошло и с другим столпом современной физики, общей теорией относительности. Вполне возможно, что крушение представлений о пространстве нечто еще более потрясающее, чем эта теория.

Как-то раз осенью мы с Доном Маролфом беседовали о проблеме гравитации в студенческом центре Калифорнийского университета в Санта-Барбаре, закусывая салатами и любуясь видом на лагуну. Стоп! Откуда мне известно, что я сидел имен-

но в этом студенческом центре в тот осенний день? В соответствии с принципом локальности я занимал определенное положение, студенческий центр занимал свое положение, и если эти положения совпадали, то я был там. Координаты в GPS-навигаторе в моем телефоне совпадали с координатами центра, а дата совпадала с датой на календаре, висевшем на стене. Вместе с тем эта вроде бы простая процедура не выдерживала критики. «Чтобы задать вопрос о том, “здесь” ли мы, нужно знать, что подразумевается под этим “здесь”, а это не так просто сделать», — говорит Маролф.

Одной из очевидных сложностей является то, что Калифорния тектонически активна. Тектоническая плита, на которой располагается Санта-Барбара, смещается на пять сантиметров в год на северо-запад относительно остальной Северной Америки и географической широты и долготы. Поэтому у студенческого центра нет фиксированного положения. Если я вернусь туда через несколько лет и попаду в точку с теми же координатами, то окажусь в лагуне. Картографические компании должны периодически анализировать смещение тектонических зон и учитывать его.

Можно, конечно, предположить, что студенческий центр все равно имеет определенное положение в абсолютном смысле, как занимаемое пространство. Однако пространство не более стабильно, чем тектоническая плита. Оно может опускаться, подниматься и деформироваться. Когда массивное тело смещается, оно распространяет возмущения по всему пространственно-временному континууму, изменяя его. Положение кафе может в результате измениться. Именно этот механизм, а не таинственное ньютоновское действие на расстоянии определяет передачу гравитации от одного места к другому в соответствии с теорией Эйнштейна. Как и геологические колебания, гравитационные возмущения распространяются с определенной конечной скоростью, а именно со скоростью света.

Чтобы представить себе изменение формы пространства-времени, разуму необходимо преодолеть сложности абстраги-

рования. Пространство-время не настолько осязаемо, как геологический ландшафт. Его просто нельзя увидеть, не говоря уже о том, чтобы распознать форму. И все же мы можем узнать кое-что по косвенным признакам. Объекты, которые свободно движутся в пространстве, не встречая помех со стороны других объектов, похожи на капли дождя, оставляющие следы на ветровом стекле автомобиля: они вычерчивают форму пространства. Например, астрономы регулярно регистрируют лучи света от звезд, которые сначала идут параллельно, проходят мимо гигантских скоплений массы вроде Солнца, а потом пересекаются. Учебники и статьи, описывающие это явление, обычно утверждают, что гравитация Солнца изгибает лучи света, однако это не совсем правильно. Лучи остаются такими прямыми, что прямее некуда. В действительности Солнце изменяет правила геометрии, т. е. искривляет пространство таким образом, что параллельные лучи могут пересекаться.

Изменение формы пространства и времени — это не просто предмет экзотических разделов физики. Оно влияет на движение любого падающего тела. Бейсбольные мячи, фужеры, дорогие смартфоны — все, что выскальзывает из ваших рук, движется с ускорением вниз к полу, поскольку масса Земли искривляет время. (Искривление пространства играет незначительную роль в этих случаях.) «Низ» определяется направлением, в котором время течет более медленно. Часы на уровне моря тикают медленнее часов на вершине Денали; часы, прикрепленные к вашей лодыжке, отстают от часов на запястье. По меркам человека, эти отклонения очень малы — от силы триллионные доли, — однако они достаточны, чтобы влиять на темп, с которым падающие тела набирают скорость. Когда яблоко падает с дерева, вы, фактически, видите, как оно катится по горизонталям времени.

•

Хотя изменение формы пространства-времени объясняет тот вид нелокальности, о котором говорил Ньютон, оно созда-

ет ряд новых разновидностей. Начнем с того, что общая теория относительности позволяет пространству-времени изгибаться и образовывать туннель, или кротовую нору, соединяющую две удаленные части Вселенной. Вход в такую нору похож на дверь, ведущую не в соседнюю комнату, а в другое место Вселенной. Вы можете пройти через нее, скажем, к альфе Центавра, и на это путешествие уйдет всего четыре года. Астрономы пока что не нашли кротовых нор, но общая теория относительности допускает их существование, да и предсказание Эйнштейна следует воспринимать как реальную возможность.

Строго говоря, кротовые норы совершенно не нарушают принцип локальности. Если вы войдете в такую нору, то будете двигаться по непрерывной траектории через пространство-время без таинственных скачков и в любой точке такого путешествия ваша скорость будет меньше скорости света. Все, что изменится, — это длина пути. Обратите, однако, внимание на мою оговорку «строго говоря». Если говорить нестрого, то у кротовых нор нужно ставить галочку в каждой клетке нашего контрольного листа нелокальности. Начать с того, что кротовая нора по своей сути нелокальная структура. По определению она соединяет несколько мест, т. е. не локализована в одном месте. Утверждение, что пространство-время имеет кротовую нору, равносильно утверждению о том, что крендель имеет узел: и то и другое относится к общей форме, а не к отдельно взятой части. Две вселенные — одна с кротовой норой, а другая без нее — могут выглядеть одинаково во всех местах, а разница становится заметной только при сравнении отдельных мест с целью выявления их взаимосвязей.

Кротовые норы тоже нелокальны. С помощью кротовой норы два объекта, которые выглядят удаленными, могут быть расположенными рядом или даже казаться одним объектом, видимым под разными углами. Многие теоретики строят предположения о том, что запутанные частицы связаны мини-норами, и именно это объясняет, почему они показывают одина-

ковые результаты при измерениях (к этой идее я вернусь в следующей главе). Конечно, эффекты кротовой норы могут не казаться нелокальными. Если, например, что-то проходит через кротовую нору, сталкивается с одной из частиц вашего тела и заставляет ее отклониться, все, что вы заметите, — это некоторую странность события. Вы не сможете отличить это от любого другого случайного и необъяснимого события, которые происходят с вами каждый день. Некоторые теоретики допускают, что здесь кроется объяснение, почему квантовые процессы имеют непредсказуемые результаты и почему фундаментальные параметры Вселенной, такие как напряженность поля, имеют необъяснимое значение.

Кротовая нора также ограничивает поведение материи во Вселенной, создавая петлю. Волна может пройти через пространство, войти в кротовую нору, возвратиться к начальной точке и наложиться на саму себя, как змей, пожирающий свой хвост. В результате кротовая нора изменяет волновое движение в огромной области и, возможно, не допускает формирование стабильных волн. Странность возрастает, если кротовая нора соединяет точки, разнесенные не только в пространстве, но и во времени, другими словами, если кротовая нора — временной портал. Если так, то кротовая нора создает *временную* петлю, полную логических парадоксов, которые так обожают любители научной фантастики. Чтобы предотвратить такие парадоксы, у путешественников во времени не должно быть той свободы действий, которой обладают обычные люди. Например, допустим, вы возвращаетесь в прошлое и пытаетесь застрелить своего деда. Что-то должно остановить вас. Вы знаете, что именно так должно быть хотя бы потому, что иначе этого путешествия во времени не было бы. Вы можете замешкаться с пистолетом, пистолет может дать осечку, метеорит может прилететь из космоса и выбить пистолет у вас из рук и т. д. Неважно, сколько раз и с каким рвением вы пытаетесь добиться своего, Вселенная по тайному умыслу будет защищать вашу цель. Вам же это покажется странной чередой совпадений.



Для объяснения подобных совпадений недостаточно проанализировать свое непосредственное окружение — необходимо исследовать общую структуру Вселенной. Требование логической непротиворечивости налагает ограничение на материю, которая проходит через кротовую нору (а иногда и на материю в других частях Вселенной), и подобное ограничение есть форма нелокальности. Происходящее в одном месте зависит от того, что происходит в других местах.

•

Второй тип нелокальности в общей теории относительности еще проще. Он вытекает из ключевого нововведения теории: такой вещи, как место, не существует за пределами пространства-времени, не существует внешней, или абсолютной, системы, относительно которой его можно оценивать. Это вроде бы очевидное положение имеет важные последствия. Оно означает, что пространство-время не только искривляется, но и теряет многие качества, которые мы связываем с ним, включая возможность определять местоположение.

Дон Маролф говорит, что «это очень тонкий момент и если честно, то Эйнштейн не понимал его довольно долго». Предыдущая концепция пространства, включая ньютоновское представление и даже ранние идеи самого Эйнштейна, предполагала, что пространство имеет фиксированную геометрию, которая позволяла мысленно подняться над ним и взглянуть на него сверху. В сущности, в какой-то момент Эйнштейн настаивал на существовании абсолютной точки отсчета, ибо в противном случае форма пространства становилась неопределенной. Чтобы понять, откуда появляется неопределенность, посмотрим, как мы пользуемся географическими данными в повседневной жизни. Можно предположить, что существует уникальная «реальная» форма ландшафта, иначе говоря, то, что показывает «Гуглблус», однако на практике форма определяется реальными наблюдениями ландшафта, а эти наблюдения могут варьировать. Студент, опаздывающий на экзамен, спортсмен, при-

храмывающий из-за растянутого сухожилия, преподаватель, беседующий на ходу с коллегами, и велосипедист, распугивающий пешеходов, воспринимают кампус по-разному. Короткое расстояние для одного может казаться бесконечным другому. Если не смотреть на местность с высоты птичьего полета, то мы не можем точно сказать, что где расположено.

Во время озарения, пришедшего в 1915 г., Эйнштейн понял, что неопределенность — это не недостаток, а свойство. Он заметил, что мы никогда не воспринимаем объекты с точки зрения абсолютного местоположения. Мы присваиваем положение на основе размещения объектов относительно друг друга, а главное — эти относительные положения объективны. Все без исключения прохожие в университетском кампусе распознают базовую последовательность мест. Они располагают студенческий центр Калифорнийского университета и лагуну рядом, а не разносят их по разным концам кампуса. Обитатели кампуса понятия не имеют, неподвижен ли ландшафт или он движется, сохраняя относительное расположение частей. Так и с пространством-временем. Разные наблюдатели могут приписывать месту разное положение, однако все сходятся во мнении о взаимном расположении мест. Именно взаимное расположение определяет происходящие события. «Если Джордж и Дон встречаются в определенном кафе в полдень в первом пространстве-времени, — объясняет Маролф, — то они делают это и в измененном пространстве-времени. Разница в том, что в первом случае это должно произойти в точке В, а в измененном случае — в точке А».

Кафе тогда располагается либо в точке А, либо в точке В, либо в точке С, D, E — в бесконечном множестве возможных позиций. Когда мы говорим, что это располагается в таком-то месте, в реальности используется привязка к другим ориентирам. В отсутствие определенных координат положение кафе должно определяться по отношению к соседним объектам. Чтобы найти его, нужно определить в мире место, где столики, стулья и салатный бар расположены именно так,



а патио выходит на лагуну, залитую солнцем Южной Калифорнии. Положение студенческого центра — это свойство не одного центра, а целой системы, к которой он относится. «Вопрос, который ты задал, в принципе применим и к пространству-времени в целом», — говорит Маролф.

•

Такая неопределенность положения имеет более чем поверхностное сходство с тем, что мы уже видели в случае электромагнетизма. Это гравитационная версия калибровочной инвариантности. Невозможность увидеть разницу между точками А, В и С сродни невозможности сказать, какую величину имеет потенциал, 0 В, 120 В или 1 000 120 В. Для гравитации, как и для электромагнетизма, неопределенность локализованных измерений является формой нелокальности. И она обусловлена не свойствами частиц и полей, а тем, что само пространство не может поддерживать локализованную структуру. Точки в пространстве неразличимы и равноценны. В силу того что у них нет отличительных особенностей, то, из чего состоит мир, не должно находиться в точках. Такие количественные показатели, как энергия, не могут быть связаны с каким-либо конкретным местом по той простой причине, что не существует такой вещи, как конкретное место. Определить положение — все равно что поставить флаг в море. Эти количественные показатели должны быть холистическими по своему характеру, т. е. свойствами пространства-времени в целом.

Более того, многочисленные эквивалентные формы пространства характеризуются различными конфигурациями гравитационного поля. В одной конфигурации поле может оказывать более сильное воздействие в отдельно взятом месте, чем в другой конфигурации, с соответствующими изменениями в остальных местах, позволяющими сохранять относительное расположение объектов. Точки в гравитационном поле должны быть взаимосвязанными так, чтобы они могли смещаться совместно, обеспечивая одно и то же внутреннее рас-

положение объектов. Такие связи нарушают принцип, в соответствии с которым отдельные участки в пространстве существуют независимо друг от друга. Маролф говорит об этом так: «Любая теория гравитации — это не описание локального поля. Даже в классической теории есть важные уравнения связи. Поле в *этой* точке пространства-времени и поле в *этой* точке пространства-времени не являются независимыми».

Это, однако, не означает, что пространство — чистая выдумка. Оно, несмотря ни на что, обладает определенной независимой реальностью — оно может расширяться и сжиматься, допускать распространение волн и существовать даже в отсутствие материальных объектов, поэтому его нельзя полностью свести к системе взаимосвязей между объектами. В большинстве случаев вы можете мыслить категориями пространственного расположения. Можно выбрать доступную массу материи в качестве базовой точки и использовать ее для привязки координатной сетки. Можно, например, к разочарованию жителей Санта-Барбары, сделать Лос-Анджелес центром Вселенной и отсчитывать координаты всех остальных мест относительно него. В такой системе вы можете заниматься своими делами, совершенно не задумываясь о фундаментальной невозможности разграничения мест. «После этого физика выглядит локальной, — говорит Дон Маролф. — Динамика гравитации совершенно локальна. Все непрерывно движется со скоростью, ограниченной скоростью света». Однако свойства гравитации остаются лишь «псевдолокальными». Нелокальность всегда здесь, она таится под поверхностью, выжидая подходящий момент для проявления.

Короче говоря, теория Эйнштейна нелокальна более утонченным и незаметным образом, чем теория гравитации Ньютона. Ньютоновская гравитация действует на расстоянии, однако, по крайней мере, в структуре абсолютного пространства. У эйнштейновской гравитации нет такого элемента волшебства — ее эффекты распространяются во Вселенной со скоростью света. Но при этом она уничтожает структуру, разрушая

наше интуитивное представление о пространстве как о некоем контейнере, в котором находятся материальные объекты. Общая теория относительности заставляет нас искать совершенно новую концепцию пространства.

•

Черные дыры — яркий пример места, где нелокальность гравитации выходит наружу. Я говорю «место», однако, когда речь идет о черных дырах, это слово становится не слишком подходящим. Черная дыра — это не твердый объект; ее периметр, или «горизонт», всего лишь гипотетическая линия в пространстве, которая обозначает точки невозврата для падающих в дыру объектов. Где проходит эта линия, очень трудно сказать. Допустим, не дай бог, наше Солнце коллапсирует и образует черную дыру, и группа космических туристов отправляется, чтобы посмотреть на нее поближе. Туроператор уверяет, что это безопасно, если они не будут подходить ближе трех километров к центру дыры — именно столько составляет расчетный радиус черной дыры с массой Солнца. Однако это ложное утверждение. Черная дыра по мере засасывания материи расширяется, и туристы могут оказаться внутри нее и лишиться возможности возвратиться домой. Положение горизонта зависит не только от того, как сильно притяжение дыры сейчас, но и от того, насколько сильным оно *будет*. Время работает на черную дыру — свободу никто не может гарантировать.

Как-то раз я попал на лекцию Гари Гиббонса, коллеги Стивена Хокинга в Кембриджском университете, где он обсуждал это странное свойство черных дыр. «Чтобы определить этот горизонт, вам нужно знать, что происходит в каждый момент времени», — сказал он. Это, в свою очередь, означает, что вам нужно знать о происходящем во всем *пространстве*. «[Горизонты] сильно нелокальны, — продолжал Гиббонс. — Они очень коварны в этом отношении. Вы не можете дотронуться пальцем до этого горизонта. В один момент можно оказаться внутри и даже не почувствовать этого». Черная дыра может

развернуться у нашей планеты, как провал в шахтерском городе, медленно и невидимо.

Усиливает загадку и то, что все вещество, попадающее в черную дыру, скапливается в самом центре, в ее так называемой сингулярности. Общая теория относительности гласит, что вещество достигает бесконечной плотности и пространство-время разрывается подобно перегруженной сумке. Так где тогда находится сингулярность? Пространство-время, относительно которого должно определяться ее положение, прекращает существование. В нем в буквальном смысле нельзя сказать «там-то, там-то». Как ни странно, сингулярность не существует нигде и в то же время существует везде. Это не локализованный объект, а холистическое свойство пространства-времени.

•

Еще одна яркая демонстрация гравитационной нелокальности происходит, если пространство имеет границу. Сказать, что пространство имеет границу, — значит вернуться к Аристотелю, который считал, что космос заключен в хрустальную сферу и похож на необъятный снежный ком. Эта идея была отвергнута. Насколько современные астрономы могут судить, пространство бесконечно во всех направлениях без каких-либо краевых галактик. Однако это условный факт, а не твердое требование. Нет такого закона физики, который запрещал бы Вселенной иметь границу. Физики не устают забавляться с гипотетическими моделями, в которых одно или несколько измерений пространства имеют конечный размер.

Даже бесконечная Вселенная может иметь границу — такую, которая расположена в бесконечности, что для физиков-теоретиков является вполне реальным местом. Чтобы понять почему, задумаемся над тем, что означает *не иметь* границы. Поверхность Земли — хороший пример: вы можете купить билет на кругосветный перелет, отправиться на запад и возвратиться к начальной точке, не повторяя маршрут. Все-

ленная может, в принципе, иметь сферическую форму, позволяющую выйти в пространство и обойти ее целиком. По общему правилу, если вы не можете сделать полный виток, значит, Вселенная имеет границу. Даже в отсутствие сплошной стены или пропасти, кишасей драконами, бесконечные пустыни представляют непреодолимое препятствие. Бесконечность может иметь ту же самую структуру, что и любая другая область пространства. Объекты могут располагаться в бесконечности. События могут происходить там. Бесконечно удаленная граница явно создает практические сложности для космических путешественников — только воображаемый звездолет способен достичь ее. Впрочем, концептуально она в точности напоминает снежный ком.

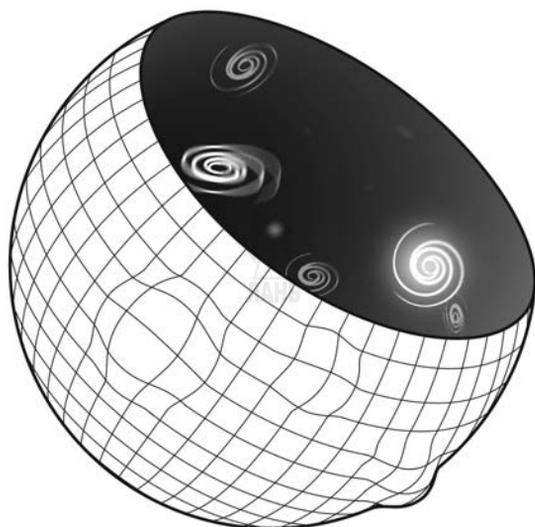
Независимо от того, где она находится, на определенном расстоянии или в бесконечности, граница является последним рубежом фронта и, как любая граница, находится в отдаленном месте. Гравитация может править в большей части Вселенной, но ее действие не доходит до края пространства. Там гравитационное поле исчезает, поскольку граница фиксирует форму пространства, подобно тому как пресс-форма фиксирует очертания глиняного горшка. «Пространство-время на границе не меняется, — говорит Маролф. — Оно фактически прибито к границе, так что динамическая гравитация там отсутствует». В силу отсутствия гравитации на границе там нет и нелокальности (по крайней мере, гравитационного характера). Граница служит абсолютной точкой отсчета, поэтому все существующие кафе и студенческие центры имеют объективно определенное местоположение. Количественные показатели, такие как энергия, являются совершенно однозначными. Вы можете разместить измерительную аппаратуру на границе и получить надежные показания.

Хотя пространство-время и прибито к границе, в остальных местах оно всегда неустойчиво. Поэтому Вселенная имеет своеобразный двойственный характер: одна ее часть ведет себя локально (граница), а другая (подавляющая) — нелокально.

Как следствие, холизм Вселенной, понятие, которое звучит почти мистически, становится очень осязаемым. Локальность на границе позволяет проводить там измерения, а нелокальность подавляющей части Вселенной связывает эти измерения с остальным пространством. «Количественные показатели, которые кто-то может считать априорно независимыми, на деле связаны вместе, — объясняет Маролф. — Таким образом, можно считать граничные наблюдения идентичными основной массе наблюдений». Поскольку граница отслеживает все происходящее в космосе, она является образом Вселенной в целом — идеальным образом, без потери точности воспроизведения. Наблюдатель, созерцающий ее, должен знать все, что вы делаете.

Это открытие подкрепляет предыдущий вывод о том, что вещи никогда не бывают реально локализованными. Наложение границы на пространство сделало эту неопределенность очевидной. У вас могут быть две одинаковые вещи, одна в основной части пространства, а другая на границе, а результаты измерений будут говорить, что это одна вещь, проявляющаяся в двух местах, словно вы видите спинной плавник и фонтан над поверхностью моря и понимаете, что это атрибуты одного кита. Граница отражает основную часть пространства, даже если у нее меньше пространственных измерений. Если же число измерений настолько непринципиально — если пространственные измерения способны появляться и исчезать без последствий, — значит, пространство не может быть таким фундаментальным элементом, как люди привыкли считать.

Эти необычные свойства становятся еще более удивительными, стоит посмотреть на их банальное происхождение. Физики просто видят, что птицы спокойно сидят на проводах, распространяют это наблюдение на гравитацию и следуют логике. Калибровочная инвариантность, связанная как с электромагнетизмом, так и с гравитацией, указывает на избыточность нашего описания природы: многочисленные значения электрического потенциала одинаково описывают одну и ту же



5.1. Граница и основная часть пространства. Вселенная может иметь границу, и, если она существует, физические процессы на ней могут воспроизводить все, что происходит во всем пространстве (Иллюстрация Джен Кристенсен)

ситуацию; многочисленные значения гравитационного поля соответствуют одному и тому же относительному размещению объектов. Теперь мы обнаруживаем, что одна размерность пространства (внутреннее измерение) может стать избыточной. Когда у пространства есть граница, вся Вселенная может быть сосредоточена на этой границе, словно остальной ее объем излишен. Пространство разваливается у нас на глазах.

Квантовая гравитация

Подведем итог. Физики создали и квантовую теорию поля, и общую теорию относительности с тем, чтобы объяснить силы природы как процессы, протекающие в пространстве, однако силы оказались слишком пагубными для такого представления. Доказательство можно представить в виде того, что логики называют доведением до абсурда: сделайте допуще-

ние, выясните последствия, покажите, что они неправильны, и сделайте вывод об ошибочности исходного допущения. Когда физики пытаются представлять силы пространственно — т. е. когда допускают, что Вселенная удовлетворяет эйнштейновскому принципу делимости и отдельные места в пространстве существуют автономно, — они приписывают миру структуру, которую тот на самом деле не имеет. Частицы, пиксели, абсолютный потенциал, объективное положение — все то, что подразумевается делимостью, на самом деле не существует. Несовпадение теории и реальности предполагает, что допущение делимости некорректно и что физикам нужно представление, выходящее за пределы пространства.

Эти признаки нелокальности незаметны в большинстве имеющих практическую значимость ситуаций, однако их нельзя игнорировать, когда дело доходит до создания единой теории — квантовой теории гравитации. Еще в начале XX в. физики поняли, что такая теория почти неизбежно должна привести к уничтожению пространства. Грубо говоря, смешивая теорию атомов (квантовую механику) с теорией пространства (общей теорией относительности), вы ожидаете получить атомную теорию пространства. «Атом» в этом контексте означает наименьший возможный кусочек пространства, который теоретики изначально представляли в виде клетки на шахматной доске. Эти пространственные клетки в большей мере соответствуют первоначальному смыслу слова «атом», чем обычные атомы материи. Они в подлинном смысле неделимы. Не существует ничего более мелкого, чем такой атом, и внутри него нельзя определить положение, подобно тому как не имеет значения, где в точности на шахматной доске находится фигура — она может занимать клетку 9 или клетку 10, но не может быть на клетке $9\frac{3}{4}$. Пространственные атомы являются логическим пределом программы уменьшения, которая направляет физику со времен Древней Греции.

Первая идея о таких атомах не имела ничего общего с гравитацией как таковой и возникла из тысячелетнего противо-

речия между дискретным и непрерывным. Как давным-давно понял Зенон, в непрерывном очень много — *очень много* — места. Если попытаться заполнить его точечными частицами, отсчитывая их по одной, можно заниматься этим вечно, добавить бесконечное число частиц, а континуум все равно будет пустым. Такая структура кажется чрезмерной. Она допускает больше возможных размещений материи, чем может быть реализовано. «Континуум более богат, чем вещи, которые можно описать», — заметил Эйнштейн в письме другу в 1916 г. Это несоответствие, имевшее плохие последствия для классической теории поля, как я уже говорил в главе 2, было одной из причин, по которым физики обратились к квантовой механике. По иронии судьбы квантовая теория поля ухудшила ситуацию еще сильнее. Эта теория предполагала, что поля колеблются спонтанно во всех масштабах, заполняют континуум бесконечным множеством волн и порождают силы, которые совершенно не поддаются контролю.

Чтобы восстановить порядок, многие физики высказывали в 1930-х гг. идею о том, что поля не могут колебаться ниже определенного порогового масштаба. Вернер Гейзенберг, в частности, подозревал практически с момента возникновения квантовой механики, что континуум должен распадаться в субатомных масштабах. Он предложил похожее на шахматную доску пространство, названное им *Gitterwelt*, или «решетчатый мир». Однако эта идея самоуничтожилась. Линии решетки давали преимущества одним направлениям перед другими, поэтому пространство должно было казаться разным для движущегося и неподвижного наблюдателя, нарушая симметрию теории относительности. В конце 1940-х гг. физики вернули континуум. Бесконечные количества, рассудили они, указывают просто на то, что пока еще неизвестные поля действуют в малых масштабах. Дополняя набор полей, можно создать внутренне непротиворечивую картину электрических, магнитных и ядерных сил.

Другое дело — гравитация. Она ведет себя ненормально в крошечных масштабах, и в начале 1970-х гг. теоретики поня-

ли, что никакое дополнение не поможет взять ее под контроль. Иначе говоря, континуум в конце концов рассыпается. Обычно за уровень, где это происходит, называемый масштабом Планка, принимают не просто крошечный масштаб, а такой, который по отношению к обычному атому вещества равен отношению размера вашего тела к размеру изученной Вселенной. Никакой микроскоп или ускоритель частиц, созданный руками человека, не позволяет увидеть этот планковский неуловимый процесс. Тем не менее косвенно он проявляется в том смысле, что эмпирически подтвержденные теории перестают работать не иначе как из-за разрушения пространства на этом уровне.

Что в точности происходит, остается довольно загадочным. Пространство может быть больше похожим не на шахматную доску, а на акварель, где мазки накладываются друг на друга, размывая объект без создания четкого решетчатого образа. Такая структура нарушает локальность в буквальном смысле, поскольку пропадает возможность четкой локализации объектов. Еще важнее то, что одно тянет за собой другое. Нельзя изменить какой-то один аспект пространства — поделить на крошечные кусочки, не меняя многое другое для сохранения непротиворечивости поведения. Потенциальные объединители физики рисуют субатомную страну чудес, которую человеку едва ли под силу понять.

В предлагаемых квантовых теориях гравитации все фантастические свойства, которыми наделяют квантовые частицы, относятся и к пространству. Если частицы могут одновременно существовать в нескольких местах, подобно коту Шрёдингера, который одновременно и жив, и мертв, то пространство способно иметь множество форм. Теперь пространство вообще не имеет формы — это просто размытая возможность, а положение становится неопределимым. Причинно-следственная ткань вот-вот распадется. Сторонники теории струн, которые выводят свойства субмикроскопического пространства из поведения населяющих его петель энергии, пола-

гают, что такие понятия, как «размер» и «измерение», становятся зыбкими. При сжатии струны она достигает определенного минимального размера и начинает опять расширяться, как шар, который при сдавливании в одном месте расширяется в другом, за исключением того, что это другое — совершенно новое измерение пространства. «Обычные представления о пространстве-времени просто несправедливы для теории струн», — говорит Джо Полчински.

Короче говоря, локальность перестает работать во всех смыслах. Вместе с тем эти штучки происходят на уровне масштаба Планка или близко к нему. Если взять общую картину, то с пространством все в порядке. Триллионы триллионов пространственных атомов складываются в единое цельное пространство. Эти атомы взаимно независимы, поэтому правило локальности выполняется — каждая часть пространства существует независимо. По крайней мере таково традиционное представление.

Теоретики, которые достигли зрелости в 1990-х гг., вроде Фотини Маркопоулоу, сочли такую аргументацию неубедительной. Разве может самое грандиозное предприятие всей теоретической науки — объединение физики — иметь такие мизерные последствия для мира в целом? Маркопоулоу и другие теоретики пришли к мысли о том, что наши традиционные представления о пространстве разрушаются не только в глубине частиц, но и в макром мире на миллионах километров открытого космоса, а также, не исключено, даже в масштабе наблюдаемой Вселенной. «Если квантовая гравитация является таким фундаментальным явлением, как мы думаем, если она связана с самой структурой пространства-времени, то, на мой взгляд, ее проявление не должно быть слишком маленьким», — говорит Маркопоулоу.

В ее словах есть доля истины. Атомы вещества тоже довольно малы, но мы постоянно видим факты, указывающие на их существование. Например, материалы, состоящие из атомов, могут трансформироваться: графит может превращаться

в алмаз, не говоря уже о соединении с другими атомами и образовании различных химических веществ. По аналогии, если пространство состоит из атомов, то, само собой разумеется, эти атомы могут перестраиваться и образовывать нечто иное, чем пространство. Такая трансформация ни в коей мере не должна быть ничтожной.

Хотя физики нередко называют квантовую механику теорией микромира, они допускают, что это ложь во спасение. Именно из этого, возможно, исходили их предшественники, создававшие теорию, однако такой подход не отражает нынешние представления. Насколько люди могут сегодня судить, квантовая механика — это теория *мира*, точка. Экспериментаторы пока что не определили диапазон размеров, где природа перестает вести себя квантово-механически. Тело человека такое же квантовое, как и электрон. Вы не увидите рядом с собой людей, выделяющих такие квантовые трюки вроде одновременного существования и несуществования. Но это связано не с тем, что они большие как таковые, а с тем, что тело человека — незамкнутая система, интенсивно взаимодействующая с окружающей средой, которая рассеивает явные квантовые эффекты, как ветер рассеивает парашютики одуванчиков. При определенных условиях такие эффекты можно увидеть невооруженным глазом. (Экспериментаторы пока не могут увидеть это в случае с человеком, однако наблюдают, например, миниатюрные камертоны, одновременно вибрирующие и невибрирующие.) Все это должно быть справедливым и для пространства-времени.

Назад к черному

Поскольку черные дыры являются местом средоточия и квантовых эффектов, и гравитации, они служат олицетворением квантовой гравитации. Речь больше не идет о крошечных атомах. Это монстры, которые могут проглотить Солнечную систему. Самое очевидное место проявления кванто-

вых гравитационных эффектов — центр этих объектов, где материя настолько плотно упакована, что наталкивается на предел плотности, налагаемый атомарной структурой пространства. Однако периметр дыры создает свои проблемы, вроде открытого Хокингом парадоксального поведения, которое сигнализирует о нарушении локальности в больших масштабах, как и в малых. «Когда-то в области гравитации считали, что реальным объектом для беспокойства является сингулярность, — говорит Гиддингс. — Однако сейчас, с информационным парадоксом, любопытные вещи должны происходить на горизонте. Фокусирование внимания на сингулярности и происходящем на коротких расстояниях оказалось неоправданным. Интересно и происходящее на больших расстояниях».

Различные типы нелокальности, о которых я говорю, сходятся в черных дырах. Например, парадокс Хокинга связан с квантовой запутанностью, которую физики начали исследовать лишь недавно. Общая теория относительности говорит, что черная дыра — не материальный объект вроде звезды или планеты. Это в основном вакуум — пустота. Горемыка, попавший в нее, увидит только пустое пространство. Тем не менее за невзрачным фасадом кроется бешеная активность. В соответствии с квантовой теорией поля вакуум может быть лишен частиц, но не *всего* остального — в нем присутствуют поля, успокоенные, правда. Суперзапутанность всех областей пространства приводит к тому, что колебания полей полностью взаимно подавляются, оставляя лишь тревожную тишину вроде той, что слышна в наушниках с шумоподавлением — не столько отсутствие звука, сколько активное представление его.

Если что-то нарушает баланс, то скрытая активность вакуума вырывается наружу. И это происходит на глазах у мудрого наблюдателя, который удерживается от падения в черную дыру. По отношению к человеку, который падает в нее, внешний наблюдатель должен поддерживать ускорение в наруж-

ном направлении, например усиливая тягу реактивного двигателя, которая преодолевает гравитационное засасывание. По логике теории относительности для человека в ракете время будет течь иначе, чем для падающей внутрь жертвы, иначе будут колебаться и поля, поскольку колебание — процесс, происходящий во времени. В действительности он не будет думать, что поля исчезают. Поля не успокаиваются; частицы летят во всех направлениях. Некоторые вылетают в открытое пространство, унося энергию из дыры до тех пор, пока она не прекратит существование. Этот наблюдатель снимает наушники с шумоподавлением и слышит рев, который является оборотной стороной безмолвия.

Это еще не парадокс, а просто новое воплощение идеи Хокинга о разрушении черных дыр. Реальный вопрос таков: что происходит с объектами, которые проваливаются в черную дыру? Гибель дыры должна приводить к их освобождению, но как? Возможно, они вырываются в виде тех вылетающих частиц. Если собрать такие частицы и сложить их вместе, то, может быть, удастся восстановить все объекты, поглощенные дырой. Для этого частицы должны быть запутанными друг с другом так, чтобы коллективно они сохраняли все свойства всего попавшего в дыру. В этом-то и загвоздка. Мы хотим, чтобы запутанность выполняла двойную обязанность: сохраняла пустоту вакуума, воспринимаемую падающим внутрь наблюдателем, и одновременно хранила память о жертвах дыры. Возможно, это чересчур. Запутанность — ограниченный ресурс, во многом такой, как энергия, и ее, по всей видимости, недостаточно для выполнения обеих задач. Либо дыра — это не вакуум (в этом случае общая теория относительности несправедлива), либо падение в дыру необратимо (в этом случае квантовой теории поля конец). Теоретики ищут выходы из этой ситуации, например, предполагают, что запутанность можно структурировать и таким образом сбалансировать обе потребности. Если это не удастся, для выхода из тупика потребуются новая физика — нелокальные эффекты, которые превратят дыру в улицу с дву-

сторонним движением или уничтожат разницу между внутренним и внешним пространством. «Это означает жесткое крушение локальности», — говорит Полчински.

Еще одна головоломка возникает, когда вы спрашиваете, как дыра хранит попавшие в нее объекты (или части, на которые она разрывает их) до момента высвобождения. Дыра должна расти, чтобы вместить эти объекты, а она не растет в той мере, какую предполагает локальность. Черные дыры должны быть похожи на чемоданы. Представьте, что у вас есть старый чемодан с 10 отделениями, каждое из которых вмещает пару носков, а потом вы покупаете новый чемодан в два раза больше по размерам и в восемь раз больше по объему. Вы ожидаете, что в новом чемодане будет 80 отделений и что он вместит 80 пар носков. В этом контексте локальность означает, что индивидуальные отделения будут иметь тот же размер, а в новом чемодане их просто будет больше. Преимущество заключается не просто в том, что вы можете уложить в него больше одежды, а в том, что эта одежда будет более разнообразной. Физики говорят, что более внушительный чемодан имеет более высокую энтропию. Энтропию обычно описывают как неупорядоченность, однако ее можно представить и как потенциал разнообразия, т. е. разнообразие путей, которыми можно упаковать чемодан без перегруза, без разбухания и других изменений внешнего вида.

При такой логике удвоение радиуса черной дыры должно увеличивать ее объем в восемь раз, пропорционально должна возрастать и вместимость. Этого, однако, не происходит. Когда черная дыра удваивается в радиусе, ее масса возрастает лишь в два раза, а энтропия — в четыре раза. Вместимость дыры меньше, чем предсказывают теории, основанные на локальности. Это все равно что открыть новый чемодан и обнаружить в нем всего 40 отделений вместо 80 обещанных в магазине. Вы наверняка почувствуете себя обманутым.

Четырехкратное увеличение энтропии означает, что внутренняя сложность дыры возрастает в зависимости не от объема, как предсказывает локальность, а от площади ее горизонта.

Фактически увеличение ширины и длины дыры повышает ее вместимость, но дополнительная высота не дает ничего, словно это измерение иллюзорно. Объект выглядит трехмерным, однако ведет себя как двумерный. И то, что справедливо для черных дыр, справедливо и для других мест, поскольку все может превратиться в черную дыру при достаточно сильном сжатии. Пространство словно насмехается над нами. Оно предлагает так много места для вещества, но на деле не содержит его столько, сколько способно вместить. А когда вы пытаетесь наполнить его, то странным образом не можете сделать этого. Возникает вопрос, есть ли здесь пространство на самом деле или это обман вроде зеркальных стен, заставляющих маленькую квартирку на Манхэттене казаться просторным пентхаусом.

•

Обманчивость черных дыр — это уменьшенная версия того, что происходит во вселенных с границей. Опять же, объем пространства может коллапсировать на ее внешней поверхности. Эта догадка не просто уничтожает нашу концепцию пространства, а говорит о том, чем можно заменить ее.

Технически граница и объем эквивалентны и не имеют преимуществ друг перед другом. Однако многие физики считают, что они не совсем идентичны, что граница — это фундаментальная реальность, а объем — ее производное. Это предположение известно как «голографический принцип», поскольку граница действует подобно листу пленки, способному создавать трехмерную сцену, аналогичную маленькой серебристой картинке на обратной стороне вашей кредитной карты. Голограмма создает объем потому, что она представляет собой искусно выполненную фотографию, передающую глубину сцены. Аналогичным образом поля на границе пространства размещены так искусно, что могут воспроизвести всю вселенную.

Если бы существовал приз за самую несуразную метафору в физике, то голографический принцип мог бы серьезно претендовать на него. Справедливости ради стоит отметить,

что он отражает, как измерение пространства вроде бы испаряется. Кроме того, голограммы таинственны. Они заставляют вас воскликнуть: «Ничего себе!» — именно такую реакцию на исчезновение измерения хотели бы видеть физики. Однако непонятно, что фактически означает голографический принцип. Как Вселенная вокруг нас может быть голографической проекцией? Что представляет собой проектор? Главное, думаю, не заикливаться на мелочах метафоры. Суть в том, что пространство, которое мы наблюдаем, может быть продуктом некоей глубинной структуры. Проходя по комнате, мы не скользим пассивно в уже существующем пространстве. Что-то все время *происходит*. Работает некий механизм, эдакие вращающиеся колеса в таинственных глубинах природы, который создает впечатление пребывания «здесь» и пребывания «там». Когда вы протягиваете руку за карандашом, а дотянуться до него не можете, что-то мешает вам, создавая нечто, воспринимаемое как расстояние. А стоит задать вопрос, что это за механизм, как мы попадаем на передний край современной физики. «На первый взгляд совершенно непонятно, как это происходит, — говорит Дэниел Кабат, теоретик из колледжа Лемана в Нью-Йорке. — Даже на второй взгляд это непонятно... Физика локальна. Иными словами, мы можем сказать, что разговариваем в этой комнате или что объекты занимают разные, совершенно определенные положения. Понять, как это появляется из подобной концептуальной модели, довольно сложно».

Физики, как и все остальные люди, воспринимают абстрактные понятия через конкретные примеры, а голографический принцип приподнялся над уровнем простого любопытства только тогда, когда Хуан Малдасена представил свою идею AdS/CFT-соответствия. AdS обозначает внутренность более многомерного шара, упрощенного типа ограниченной вселенной. CFT обозначает поверхность этого шара. «Соответствие» означает, что эти две области эквивалентны. Проводя измерения на границе, вы можете понять, что происходит внутри.

Попробуем разобраться, что это означает. Область, где господствует гравитация (описанная эйнштейновской общей теорией относительности и ее квантовой разновидностью), эквивалентна области, где господствуют только негравитационные силы (описанные квантовой теорией поля с калибровочной инвариантностью). Анализ, сделанный Малдасеной, таким образом, приводит к долгожданному объединению этих двух направлений физики, по крайней мере в такой идеализированной шарообразной вселенной. Исторически физики пытались обнаружить единство в результате поиска все более мелких строительных блоков, таких как атомы и частицы. Применяя подход Малдасены, они ищут уже не сущности, которые меньше, а сущности, которые не существуют в одном и том же пространстве.

Я знаю нескольких теоретиков, которых не смущает Малдасена и то, что он сделал (хотя они могут и не соглашаться с тем, что предложенная теоретическая структура имеет отношение к реальному миру). Один из них говорит, что однажды подвозил Малдасену на своем автомобиле и ужасно боялся. Если бы они разбились, то его вспоминали бы только в связи с этим событием. Он вошел бы в историю как человек, убивший Хуана Малдасену.

Используя голографический принцип, теоретики могут понять, какие неизвестные пока виды процессов способны давать начало пространству. Несмотря на обычные научные оговорки насчет того, что требуются дальнейшие исследования и т. п., решение загадок нелокальности уже намечается. Сквозь туман начинают проглядывать очертания горы.





Конец пространства-времени

Когда философу Дженанн Исмаэль было 10 лет, ее отец, преподаватель Университета Калгари, купил на аукционе большой деревянный комод. В одном из ящиков Дженанн обнаружила старый калейдоскоп, который привел ее в восторг. Она часами экспериментировала с ним и пыталась понять, как он работает. «Я не сказала сестре о своей находке из опасения, что она ей не понравится», — вспоминает Исмаэль. Стоит повернуть калейдоскоп, и многоцветные узоры начинают расцветать, поворачиваться и сливаться совершенно непредсказуемо вопреки рациональному объяснению, словно они оказывают призрачное воздействие друг на друга. Однако чем больше вы смотрите на них, тем больше регулярности в движении замечаете. Узоры на противоположных концах поля зрения меняются согласованно, а их симметрия подсказывает, что происходит на самом деле: узоры — это не физические объекты, а изображения объектов, кусочков стекла, которые пересыпаются внутри зеркальной трубки. «Это один осколочек стекла, который многократно представлен в различных частях пространства, — говорит Исмаэль. — Если сфокусироваться на более крупном вмещающем частицы пространстве, на физическом описании трехмерного калейдоскопа, то вы получите простую причинно-следственную связь. Есть кусочек стекла, кусочек стекла отражается в зеркалах и т. д.» Если понять, что это реально такое,

то калейдоскоп потеряет свою загадочность, хотя и останется восхитительным.

Десятилетия спустя, во время подготовки к докладу по квантовой физике, Исмаэль вспомнила о калейдоскопе и купила себе новый — блестящую медную трубочку в бархатном футляре. Она вдруг поняла, что это готовая аналогия нелокальности в физике. Возможно, частицы в экспериментах со спутанностью или галактики в дальних концах наблюдаемого пространства ведут себя странно потому, что они в реальности являются проекциями — или, иначе, вторичными образованиями — объектов, существующих совсем в другой области. «В случае калейдоскопа мы знаем, что делать: нам нужно увидеть систему в целом; нам нужно увидеть, как создается пространство изображений, — говорит Исмаэль. — Но как построить аналог для квантовых эффектов? Это означает, что нужно смотреть на пространство в том виде, в каком мы его знаем, — повседневное пространство, в котором мы судим об измерениях в различных его частях, — как на эмерджентную структуру. Возможно, когда мы смотрим на две части, мы видим одно и то же событие. Мы взаимодействуем с одной и той же частичкой реальности из различных частей пространства».

Исмаэль и другие ставят под вопрос допущение, которое делает практически каждый физик и философ со времен Демокрита, допущение о том, что пространство — это самый глубокий уровень физической реальности. Подобно тому как сценарий пьесы описывает действия актеров на сцене, заранее предполагая существование этой сцены, законы физики традиционно принимают существование пространства как данность. Сегодня мы знаем, что Вселенная глубже, чем объекты, расположенные в пространстве. Проявления нелокальности выпадают из пространства — им нет места в его границах. Они предполагают существование более глубокого, чем пространство, уровня реальности, где концепция расстояния становится неприменимой, где объекты, вроде бы расположенные далеко друг от друга, фактически находятся рядом или вообще явля-

ются одним и тем же объектом, проявляющимся в нескольких местах подобно образам одного кусочка стекла в калейдоскопе. Если мыслить с точки зрения такого уровня, то связи между элементарными частицами на лабораторном столе, между внутренней и внешней областями черной дыры и между удаленными частями Вселенной перестают казаться призрачными. Майкл Хеллер, физик, философ и пастор Папской академии теологии в Кракове, Польша, говорит: «Если вы соглашаетесь с тем, что фундаментальный уровень физики нелокален, все становится естественным, поскольку эти две частицы, находящиеся далеко друг от друга, находятся на одном и том же фундаментальном нелокальном уровне. Для них время и пространство не имеют значения». Только когда вы пытаетесь связать эти явления с пространством — что простительно, поскольку нам трудно мыслить иначе, — они не поддаются пониманию.

Идея существования более глубокого уровня кажется естественной — в конце концов, физики всегда стремились найти именно это. Когда им не удавалось понять какой-нибудь аспект мира, они считали, что нужно копнуть поглубже. Они углублялись и искали строительные блоки. Насколько загадочно, скажем, превращение воды в пар или лед. Тем не менее эти превращения становятся совершенно логичными, если жидкость, пар и твердое вещество являются не элементарными субстанциями, а просто формами одной фундаментальной субстанции. Аристотель считал состояния воды различными воплощениями так называемой первичной материи, а атомисты дальновидно полагали, что это переход атомов в более плотное или свободное состояние. В целом строительные блоки материи приобретают свойства, которых у индивидуальных блоков нет. Молекула воды не является мокрой, а атом углерода — живым, однако их множество, объединенное определенным образом, может приобретать такие качества. Аналогичным образом пространство может складываться из частиц, которые по отдельности не являются трехмерными. Эти частицы могут разъединяться и соединяться в непространственные структуры вроде тех,

на которые указывают черные дыры и Большой взрыв. «Пространство-время не обязательно фундаментально, — говорит теоретик Нима Аркани-Хамед. — Оно должно состоять из чего-то более элементарного».

Такое представление полностью переворачивает физику. Нелокальность перестает быть загадочной — это реальное состояние всего, а вот *локальность* становится загадкой. Если мы больше не можем принимать пространство как данность, то нужно объяснить, как оно возникает — само по себе или в единстве с временем. Понятно, что создание пространства не такой простой процесс, как объединение молекул и образование жидкости. Что могут представлять собой его строительные блоки? Обычно мы исходим из того, что строительные блоки должны быть меньше, чем сущности, состоящие из них. Один мой друг со своей дочерью как-то построили детальную модель Эйфелевой башни из палочек от фруктового мороженого — вряд ли нужно объяснять, что палочки были меньше башни. Когда дело доходит до пространства, характеристика «меньше» пропадает, поскольку размер сам по себе — понятие, связанное с пространством. У строительных блоков не может быть такого аспекта, как пространство, если они должны объяснять его. У них не должно быть ни размера, ни положения, они везде, простираются на всю Вселенную и нигде — в силу того что невозможно указать на место. Что означает для сущностей отсутствие положения? Где они должны находиться? «Когда мы рассуждаем об эмерджентном пространстве-времени, оно должно возникать из некоей базовой структуры, которая очень далека от того, с чем мы знакомы», — говорит Аркани-Хамед.

В западной философии сфера за пределами пространства традиционно считается чем-то выходящим за пределы физики — это епархия Бога в христианской теологии. В начале XVIII в. «монады» Готфрида Лейбница — простейшие элементы Вселенной, по его разумению, — существовали, подобно Богу, вне пространства и времени. Его теория была шагом в сторо-

ну эмерджентного пространства-времени, однако оставалась метафизической, имея лишь туманную связь с миром конкретных объектов. Чтобы физики могли объяснить пространство как нечто эмерджентное, им необходимо взять концепцию отсутствия пространства под свое крыло.

Эйнштейн предвидел эти сложности. «Возможно... мы должны также отказаться, в принципе, от пространственно-временного континуума, — писал он. — Не так уж невероятно, что человеческий гений однажды найдет методы, позволяющие идти таким путем. В настоящее время, однако, такая программа похожа на попытку дышать в пустом пространстве». Джон Уилер, признанный теоретик гравитации, выдвигал предположения о том, что пространство-время выстроено из «предгеометрии», но допускал, что это не более чем «идея ради идеи». Даже такой неуемный человек, как Аркани-Хамед, высказывает сомнения: «Эти проблемы очень сложны. Нашего языка не хватает, чтобы говорить о них».

Почему Аркани-Хамед не останавливается, так это потому, что он с коллегами нащупал именно ту разновидность методов, о которой говорил Эйнштейн, — методы описания физики в отсутствие пространства, возможность дышать в вакууме. Аркани-Хамед рассматривает эти достижения в исторической перспективе: «Более 2000 лет люди пытались постичь глубинную природу пространства и времени, но их усилия были преждевременными. Наконец мы дождались эпохи, когда можно ставить такие вопросы и надеяться на имеющий смысл ответ».

Клей для реальности

Вместо принятия пространства как данности давайте переосмыслим, что мы на самом деле подразумеваем под ним и как обойтись без него. В соответствии с классическими законами физики, открытыми Ньютоном и изучаемыми сегодня в средней школе, положение и скорость объектов в полной мере характеризуют мир. Эти количественные харак-

теристики, взятые в некоторый момент, отражают, как все происходит, где это происходит и что произойдет в будущем. Мир можно представить как одно из гигантских хитроумных устройств Руба Голдберга, которое построили в заброшенном ангаре и выложили на YouTube: как только все будет на месте, вы приведете ее в движение, и все остальное не заставит себя ждать. Если разместить атомы в форме лягушки и придать им правильную скорость, лягушка оживет — ей не понадобится дополнительный электрический разряд.

Классическая физика говорит, что объекты замедляются, ускоряются или отклоняются от первоначального курса по той причине, что они воздействуют друг на друга с определенной силой, например электрической или гравитационной. Величина силы зависит от относительного положения объектов, в частности от того, как далеко они разнесены. Что происходило или могло произойти между этими объектами в прошлом, не имеет значения. Когда-то они могли столкнуться друг с другом, но после разлета их притяжение или отталкивание было не больше и не меньше, чем притяжение и отталкивание всего остального на таком же расстоянии. Пространство одинаково для всех. Когда вы далеко от любимого человека, физическая связь между вами ничуть не сильнее, чем связь между двумя кусками угля.

Таким образом, пространство выполняет роль организующего принципа естественного мира — клея, который соединяет Вселенную, как выразился английский физик Джулиан Барбур. Физические объекты не взаимодействуют как попало — их поведение определяется тем, как они связаны друг с другом, а это зависит от того, где они находятся в пространстве в данный момент. Эту структурную роль легче всего заметить в классических законах механического движения, однако она просматривается и в теориях поля. Величина и скорость изменения поля в разных точках пространства полностью определяют поведение поля, а точки самого поля взаимодействуют только с ближайшими соседями.

Я не хочу создавать впечатление, что теории, построенные на основе пространства, всегда способны отражать реальный мир, на деле это не так. Я уже упоминал некоторые их ограничения в предыдущих главах. Так, противоречия возникают при попытках объединения дискретных объектов и непрерывных полей. И ньютоновские, и эйнштейновские законы движения не действуют в так называемых сингулярностях, где физические количественные показатели, такие как скорость или плотность, становятся бесконечными. Впрочем, несмотря на эти исключения, физики всегда располагают элементы своих теорий в пространстве. Даже в квантовой механике, если отбросить загадки запутанности, взаимодействия в пределах системы ограничены расположением в пространстве.

Можно, однако, подойти к этой логике с противоположной стороны. Физики и философы могут *определять* пространство через наличие у мира в нем совершенно определенной структуры. Иными словами, не утверждать, что пространство придает миру упорядоченность, а сказать, что мир упорядочен и пространство является подходящим понятием для описания этого порядка. Мы видим, что объекты влияют друг на друга определенным образом, и на этом основании говорим, что они расположены в пространстве. Такая структура имеет два важных аспекта. Во-первых, влияния, оказываемые на нас, являются иерархическими. Одни объекты влияют на нас сильнее, чем другие, и по этому различию мы судим о расстоянии до них. Слабое воздействие указывает на большое удаление, а сильное — на близость. Философ Дэвид Альберт называет расстояние, определенное таким образом, «интерактивным». «То, что лев близко, означает, что он может напасть на меня», — говорит он. Это совершенно иной образ мышления, чем тот, к которому мы привыкли. Вместо того чтобы кричать: «Осторожно, лев близко, он может напасть!», мы говорим: «О! Лев может напасть, должно быть, он близко».

Во-вторых, различные влияния взаимно сообразны. Если носорог тоже может напасть на меня, значит он также нахо-

дится близко. А если и лев, и носорог могут напасть на меня, то у них должна быть возможность напасть и друг на друга. (И в самом деле, от этого зависит моя жизнь.) Из такого распределения влияний мы выводим пространство. Если угрозу, создаваемую хищниками, будет невозможно выразить через расстояние в пространстве, то пространство потеряет смысл. Менее мрачен пример с триангуляцией. Столбики индикатора сигнала в вашем мобильном телефоне показывают силу связи телефона с вышкой сотовой связи и, таким образом, ваше расстояние от этой вышки. В экстренной ситуации телефонная компания может определить положение вашего телефона путем измерения силы связи с несколькими вышками и использования триангуляции или другого метода пространственных измерений. Тот факт, что измерения указывают на одну точку, говорит о наличии у вас *местоположения*.

•

Сильной стороной определения пространства с точки зрения структуры является то, что оно позволяет обойти некоторые давние споры о природе пространства. Античные атомисты воспринимали пространство как само собой разумеющуюся сущность, а Аристотель считал его абстракцией, которая давала возможность описывать устройство Вселенной. Как бы то ни было, в любом случае пространство отражает структуру естественного мира. Если правы атомисты и пространство существует независимо, то оно должно быть высокоупорядоченным, вроде тщательно сотканной ткани, с тем чтобы выполнять функции, необходимые физикам. Если же пространство — простая абстракция, то содержимое Вселенной должно быть связано воедино правильным образом, чтобы наполнять смыслом абстракцию.

На первый взгляд мы ничего не получаем от присвоения порядку атрибута первичности. Мы просто меняем одну загадку на другую — ведь теперь нам нужно объяснить порядок. Физик-теоретик Ли Смолин из Института теоретиче-

ской физики «Периметр» называет это «обратной проблемой». Однако проблема — это одновременно и возможность, поскольку теперь можно предположить, что представляла бы собой Вселенная без определенной упорядоченности. Она могла бы не быть пространственной. Пространство можно не считать абсолютной необходимостью, а рассматривать как одно из возможных состояний Вселенной, подобно тому как мы считаем лед одним из состояний воды. Аналогия со льдом и в самом деле неплоха. Вода находится в твердом состоянии в более узком диапазоне условий, чем тот, в котором она пребывает в газообразном состоянии. Точно так же пространство может быть исключением, а не правилом — большинство предлагаемых теорий объединенной физики предполагает, что в основном возможные состояния Вселенной непространственны. «Существование пространства-времени — совершенно нехарактерное состояние, — говорит Моше Розали, приверженец теории струн из Университета Британской Колумбии. — Для него необходимо наличие особых условий». Возможно, именно в промежуточном состоянии между порядком и беспорядком, пространством и отсутствием пространства мы найдем всеобъемлющее объяснение явлений нелокальности, которые так озадачивают физиков.

Сказанное во многом относится и ко времени. Я сфокусировал внимание на пространстве по той причине, что так делают большинство исследователей, — примеры нелокальности для времени намного менее ясны. Смолин и философ Тим Модлин в своих книгах настаивают на том, что время не эмерджентно, о чем мы поговорим позднее. Так или иначе, каким бы ни был его статус, время играет активную организующую роль во Вселенной и, как и пространство, имеет два аспекта. Во-первых, оно иерархично. События могут быть тесно связанными, отдаленно связанными и несвязанными. Они происходят в логичной последовательности, одно событие влечет за собой другое в соответствии с законами физики. Например, в классическом психологическом тесте вам показывают

ряд рисунков и предлагают расположить так, чтобы они представляли связанную историю. Собака отряхивается; собака залезает в воду; собака выскальзывает из ошейника. Без определенного порядка эти рисунки не связаны, при правильном размещении они складываются в сцену, знакомую любому владельцу собаки. Даже нелинейная проза вроде «Бойни номер пять» (Slaughterhouse-Five) или «Облачного атласа» (Cloud Atlas) имеет хронологическую логику.

В одном из своих последних эссе Лейбниц перевернул это представление с ног на голову. Он утверждал, что время не является причиной, по которой структурируются события. Это *следствие* того, что они структурированы. Вы можете вывести время из причинно-следственной связи. Событие, которое вызывает другое событие, должно предшествовать последнему во времени, а количество промежуточных этапов определяет, сколько времени проходит между событиями. Эйнштейновская теория относительности свидетельствует о том, что Лейбниц подметил нечто ценное, поскольку это придает причинно-следственной связи центральную роль в физике. Одно событие может инициировать другое только в том случае, если у света достаточно времени, чтобы преодолеть расстояние между ними. В соответствии с обратной логикой если одно событие может инициировать другое, то эти события должны происходить на определенном расстоянии друг от друга. Фактически вы можете воссоздать карту всего мира на основе его паутины причинно-следственных связей — все можно поставить на свои места, зная, что для чего является началом.

Ряд физиков включили эту идею в модель пространства-времени в качестве «причинностного множества». Технически паутина взаимосвязей оставляет некоторую неопределенность: она говорит, что одно событие происходит раньше другого, но не показывает, *насколько* раньше, — она не дает масштаба. Приверженцы причинностного множества, однако, утверждают, что пространство и время уже имеют естественный масштаб, если они состоят из дискретных единиц —

«атомов» пространства, о которых я упоминал в предыдущей главе. Расстояние тогда определяется подсчетом количества таких атомов.

Для наших целей важно то, что паутина причинно-следственных связей должна быть высокоупорядоченной, иначе она не сможет воссоздавать пространство и время. «Практически все причинностное множество совершенно непохоже на пространство-время», — говорит Фэй Доукер, пионер идеи причинностного множества. По аналогии изобретатели упомянутого психологического теста не могут просто бросить вам любые сцены и надеяться на то, что вы свяжете их, — это должны быть подходящие друг другу сцены. Когда сцены упорядочены, время становится знаком, показывающим, где находится каждая из сцен в последовательности.

В дополнение к созданию последовательности или иерархии событий временная структура обеспечивает взаимную непротиворечивость различных процессов. Точнее говоря, забудьте о том, что вы когда-либо слышали о времени, и думайте о часах. Посмотрите вокруг, и вы наверняка увидите эти очень полезные штучки, называемые часами. Мы определяем по ним, когда вынимать пирог из духовки и когда переходить к следующему упражнению на тренировке. Если синхронизировать часы в доме, можно рассчитывать на то, что они будут идти синхронно, хотя бы примерно. Поскольку все часы имеют одни и те же показания, отображаемые цифры называют «временем». Мы редко задумываемся о том, насколько удивительна эта регулярность. Почему кухонные часы говорят, когда хлеб подошел? Почему стрелки Биг-Бена вращаются синхронно с Землей? Это ведь совершенно разные системы: электронный генератор колебаний, бродящие дрожжи, качающийся маятник и гигантский вращающийся шар. И тем не менее они маршируют под один и тот же барабан.

Джулиан Барбур утверждает, что эти системы следят за движением друг друга, поскольку они взаимосвязаны подобно шестеренкам большого часового механизма. По такой логи-

ке время не возникает раньше Вселенной, обеспечивая ее внутреннюю непротиворечивость, а появляется из нее. Эрнст Мах, который был сторонником взглядов Лейбница, писал: «Все в мире взаимосвязано друг с другом и зависит друг от друга... Время — это абстракция, к которой мы приходим через изменения объектов; мы приходим к ней, поскольку не ограничены ни одной *определенной* мерой, а все взаимосвязано... Мы приходим к нашим идеям времени через взаимосвязь объектов друг с другом. В этих идеях выражается глубочайшая и наиболее универсальная связь всего». Время, как и пространство, черпает свой смысл из особого типа гармонии в природе.

Когда пространство не является местом

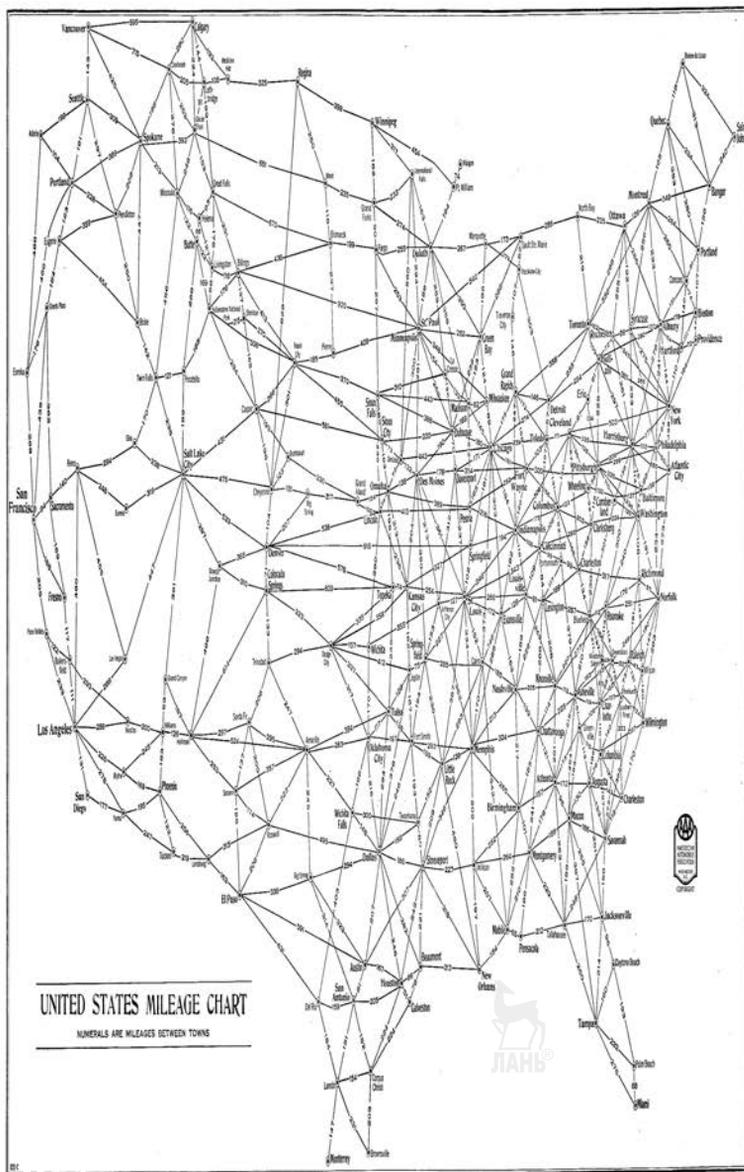
Чтобы оценить организующую силу пространства, не нужна сложная система движущихся, взаимодействующих элементов. Посмотрим на географию какой-нибудь страны. Можно представить города так, словно они расположены на карте, а можно выразить их взаимную пространственную связь в виде схемы расстояний в милях, которая нередко встречается в картах дорог и атласах, — прямоугольной или треугольной сетки с расстояниями между городами. Любопытно то, что эти схемы несут в себе скрытые рисунки подобно разрозненным элементам пазла, которые обнаруживают взаимосвязь по мере составления картины.

Допустим, у вас есть 20 городов. Схема содержит четыре сотни чисел. Для сбора данных картографическая служба, например Американской автомобильной ассоциации, нанимает водителей, которые едут из одного города в другой и записывают показания одометра или GPS-системы. С точки зрения реального информационного содержания схема крайне избыточна. Расстояния подчиняются очень конкретным правилам, называемым математиками «аксиомами расстояния». Прежде всего, 20 чисел, расположенные на диагонали, равны нулю — это расстояние от каждого города до самого себя. Из оставших-

радиус планеты стал значимым фактором. Наконец, вы можете опустить еще несколько чисел, поскольку условности, принятые при определении координат (например, принятие начального меридиана за нулевой), не имеют значения для определения расстояний. В результате количество чисел уменьшается до 55. Четыре сотни чисел, с которых мы начали, являются всего лишь арифметическими комбинациями 55 чисел. Это может быть неочевидно при взгляде на схему, но это так, поскольку процесс можно выполнить в обратном порядке. Можно начать с координат городов, нанести их местоположение на карту и с помощью тригонометрических вычислений определить расстояния между городами.

Таким образом, схема высокоупорядочена. Именно это предполагает расположение городов в пространстве. Пространственные координаты — очень экономичный способ отражения возможного взаимного расположения объектов. В приведенном выше примере у нас было 20 городов и четыре сотни расстояний, которые мы свели к 55 уникальным числам. Чем больше объектов, тем внушительнее сокращение. Для сотни городов с 10 000 расстояний на схеме все сводится к 295 числам. Для всех крупных городов мира, или всех небольших городов, или всех географических особенностей любых типов исходные данные по расстояниям должны переполнить любой жесткий диск даже несмотря на то, что все эти особенности умещаются на одной карте. «Это и есть пространство, — говорит Барбур. — Это массивованное сжатие данных».

Причина такого сильного сжатия — локальность. Она означает, что все есть сумма его пространственных частей. В этом контексте любое перемещение представляет собой ряд небольших шажков. Большие расстояния можно составить из промежуточных, поэтому нет нужды определять все до единого расстояния. Например, схема может показывать, что между Далласом и Денвером 900 миль, а от Денвера до Солт-Лейк-Сити 500 миль, следовательно, излишне говорить, что от Далласа до Солт-Лейк-Сити не больше 1400 миль.



6.2. Схема расстояний между американскими городами, составленная в 1939 г. (© AAA, использовано с разрешения)



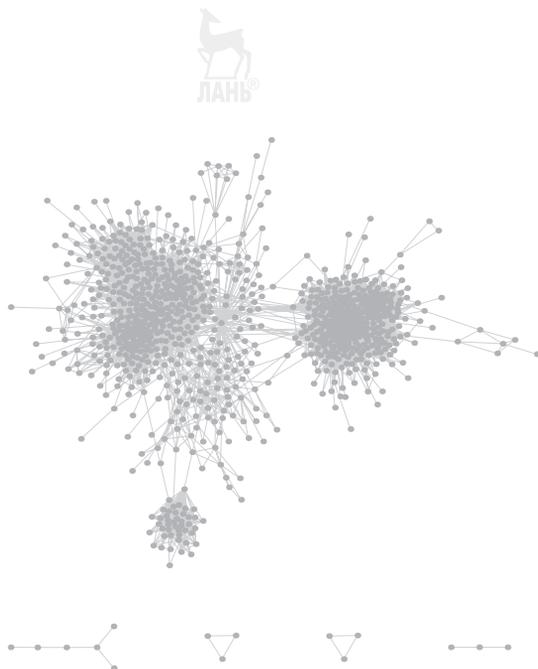
Допустим, это не так: предположим, что данные на схеме не являются высокоупорядоченными. Если я нанесу на схему четыре сотни случайных чисел и попрошу нанести расположение городов на карту, то у вас практически наверняка ничего не получится. Например, схема может говорить вам, что от Далласа до Денвера 900 миль, от Денвера до Солт-Лейк-Сити 500 миль, а от Далласа до Солт-Лейк-Сити 8000 миль. Это лишено всякого смысла, не так ли? В соответствии с такими данными Солт-Лейк-Сити находится в двух местах в зависимости от того, как вы едете: напрямую из Далласа или с остановкой в Денвере. Ситуация похожа на шутку в День дурака, когда ваш друг перемешивает элементы разных пазлов и предлагает вам собрать картину. Вы безуспешно пытаетесь сложить элементы до тех пор, пока не начинаете подозревать, что над вами подшутили.

В таких обстоятельствах положение становится бессмысленным. *Пространство* становится бессмысленным. Оно больше ничего не дает для описания связи между местами. Однако это не означает, что относительное расположение городов находится за пределами понимания. Даже когда вы не можете нанести города на карту, остается возможность вернуться к полной схеме расстояний. Другими словами, вы можете использовать то, что философы называют «непосредственными» расстояниями, т. е. непосредственные расстояния между парами городов, которые нельзя свести к ряду более коротких отрезков. Это не вполне гипотетическая ситуация. Впервые попав в Бостон на автомобиле, я совершенно потерял ориентацию и стабильно попадал не в те места. В этом лабиринте улиц с односторонним движением и бесформенных «площадей» приходится постоянно ехать на запад, чтобы попасть на восток, или перестраиваться в левый ряд, чтобы повернуть направо. В такой ситуации бесполезно знать, где расположено нужное место при взгляде с птичьего полета, необходимо тупо следовать указаниям, где и как повернуть. Для водителя Бостон — непространственный город.

•

На самом деле нет ничего особо странного в том, что сети взаимосвязей могут вырываться из пространства. Взять хотя бы взаимосвязи между людьми. Наша социальная жизнь слишком сложна, чтобы уложить ее в пространственную карту. Нельзя сказать, что люди не пытаются сделать это. Генеалогические деревья транслируют генетические и брачные связи в близость в пространстве, а социальные сети делают аналогичные попытки. Веб-сайт Wolfram Alpha, например, представляет сеть друзей в Facebook с помощью точек, обозначающих друзей, и линий, соединяющих тех, кто связан друг с другом. Расстояние в пространстве на карте отражает социальную близость, оцениваемую по количеству общих друзей. Обычно наши друзья образуют отчетливые круги общения: семья, одноклассники, коллеги по работе, друзья по спортивной команде, поклонники группы Radiohead и т. д. Если эти люди приходят на общую вечеринку, то они могут скапливаться в разных углах, а фигуральное расстояние между ними — превращаться в реальное.

Сгенерировав граф Facebook впервые, я заметил одинокую связь между моими коллегами-физиками и музыкальными друзьями. Как оказалось, один из теоретиков, с которым я работал, разделял мою страсть к кубинской танцевальной музыке. Выявление неожиданных связей — это лишь одна из прелестей изучения таких графов, другая заключается в том, что они высвечивают ограничения аналогии с пространством. Присвоить определенное место этому теоретику в моем графе было невозможно. Как и Солт-Лейк-Сити в приведенном выше примере, он занимает два места, соответствующие двум кругам общения. И ситуация осложняется еще больше, когда вы начинаете учитывать все, о чем эти графы умалчивают. Два «друга» в Facebook могут никогда не встречаться и даже не обмолвиться словом, а граф тем не менее связывает их, словно они лучшие друзья на веки вечные. Один из них может всего лишь



6.3. Сеть друзей в Facebook (Wolfram Alpha LLC, 2014, использовано с разрешения)

в одностороннем порядке заинтересоваться другим, но линия все равно связывает их. Чтобы отразить эти дополнительные измерения взаимоотношений людей, можно украсить генеалогическое дерево определенными символами: толстая линия — близкая связь, зигзагообразная — недружественные отношения и т. п. Подобные диаграммы, называемые генограммами, популярны у психологов, социальных работников и людей, помешанных на сериале «Игра престолов». Символы компенсируют недостатки аналогии с пространством.

В некоторых случаях люди организуются так, что их социальная сеть становится совершенно простой, и это позволяет увидеть, как пространство возникает из его отсутствия. Структура может сформироваться там, где ранее ничего не было. Это происходит двумя путями: в результате накопления или уре-

зания. Все может начинаться с разрозненных индивидуумов, которые вступают во взаимодействия, вроде вашей бабушки, которая наконец зарегистрировалась в Facebook и затащила туда всех своих друзей. Другим началом может быть мешанина существующих взаимосвязей, которые урезаются, когда, например, гипербобщительный член сети, добавлявший в друзья всех подряд, вдруг спохватывается и вычищает свои связи.

В армии, например, ограничиваются социальные контакты между чинами во избежание фамильярности и неуважения. В результате разница в звании становится аналогом пространственного разъединения: рядовой удален от полковника точно так же, как Даллас от Солт-Лейк-Сити. Информация течет вверх и вниз по вертикали управления точно так же, как человек, едущий из Далласа в Солт-Лейк-Сити, проезжает через промежуточные точки. Из-за такой структуры иерархическая схема вооруженных сил довольно хорошо отражает социальные взаимосвязи в армии.

Армейская структура предопределяется военной дисциплиной, однако во всех остальных случаях порядок формируется самопроизвольно изнутри. Классический пример — рыночная экономика. Мы привычно говорим «экономика», словно это самостоятельная сущность, а не миллионы людей, принимающих спонтанные решения в отношении своих денег. В определенном смысле это так, поскольку коллективные договоренности находятся за пределами власти людей, которые принимают их. В изоляции отдельная личность не может установить цену на товар, поскольку нет того, кто его покупает или продает. Цены становятся важными, когда люди собираются вместе и торгуют. В зависимости от умения торговаться цена варьирует от человека к человеку и от места к месту. Какой-нибудь ловкий предприниматель пользуется этими колебаниями и покупает дешево, а продает дорого. Этим он помогает выровнять предложение и, следовательно, гармонизировать цены.

Такой вид самоорганизации постоянно наблюдается в физике. Так, у отдельной молекулы воды нет температуры. Температу-

ра приобретает смысл, когда молекулы сталкиваются и обмениваются энергией. Если смешать холодную и горячую воду, то холодная вода будет нагреваться, а горячая остывать до тех пор, пока температуры не сравняются. До наступления равновесия вода характеризуется двумя температурами, а после — одной. Из сложности возникает простота. Сложность, впрочем, не исчезает, а остается скрытой. Это можно заметить при изменении температуры или при фазовых переходах, например при кипении воды в чайнике. Физики обычно используют эти отклонения от стандартного поведения как окно для изучения микроскопического состава материалов.

То же самое может происходить и с пространством. Базовые строительные блоки природы могут обладать способностью к запутанным взаимосвязям вроде тех, что заполняют газету со светскими сплетнями. В результате действия некоторых механизмов организации или простого усреднения эти взаимосвязи становятся упорядоченными, так что их можно разбить на пространственную решетку, и действуют строго определенным образом. Умопомрачительно сложная сеть взаимодействий сокращается до нескольких чисел, которые мы называем «положением» и «временем». При этом базисная сложность никуда не уходит. В черных дырах, например, система может терять упорядоченность, а события — лишаться положения и времени. Даже когда система пространственна, в ней остается масса скрытой сложности. Вселенная, которую мы видим как разворачивающуюся в пространстве, может быть всего лишь поверхностью, где мы плаваем вроде маленьких лодочек, в то время как чудовища ворочаются в глубинах.

Сетевое пространство

Представление о пространстве как о сети восходит к 1960-м гг. и мозговым штурмам, устраиваемым такими теоретиками-новаторами (и иконоборцами), как Джон Уилер, Дэвид Бом, Роджер Пенроуз и Дэвид Финкельштейн. Уилер, например,

предложил образ корзины с «пылью» или «колечками» — существующими не в пространстве, а *просто существующими* примитивными крупинками материи, — которые взаимно связываются и образуют пространство. Физики уже не одно десятилетие пытаются заставить эту идею работать. Сегодня одним из самых активных энтузиастов в этом деле является Фотини Маркопоулоу, которая представляет процесс взаимосвязывания в виде графа, похожего на те, что отражают связи в Facebook. Она вместе с коллегами называет такой подход «квантовым граффити» с претензией на остроумие, впрочем, любые попытки добавить толику юмора в жаргон, используемый физиками, не вредят делу.

Квантовое граффити не определяет, что именно представляют собой уилеровы крупинки, — это дело полномасштабной квантовой теории гравитации, такой как теория петлевой квантовой гравитации или теория струн. Квантовое граффити — это теория в миниатюре, которая узко сфокусирована на том, что можно построить из этих крупинок. Философия Маркопоулоу и ее коллег исходит из того, что детальная картина не имеет значения, поскольку принципы организации должны быть универсальными. В конце концов, физики ведь обнаружили, что одни и те же правила определяют поведение огромной массы разнообразных сложных систем, от землетрясений и экосистем до экономики. Отрицательным моментом является то, что предельный минимализм квантового граффити создает проблему связи с общепринятой физикой. «Фотини пытается прыгнуть напрямую, однако это очень амбициозно и опасно из-за отсутствия связей с существующими теориями», — говорит Клаус Кифер из Кёльнского университета.

Связи между элементарными крупинками просты настолько, насколько возможно. Две крупинки либо соединены друг с другом, либо нет, как пользователи Facebook, которые могут иметь друзей или не иметь, — просто связь типа «включено-выключено». Полученная в результате сеть похожа на нитяную графику, когда вы забиваете гвозди (представляющие крупин-

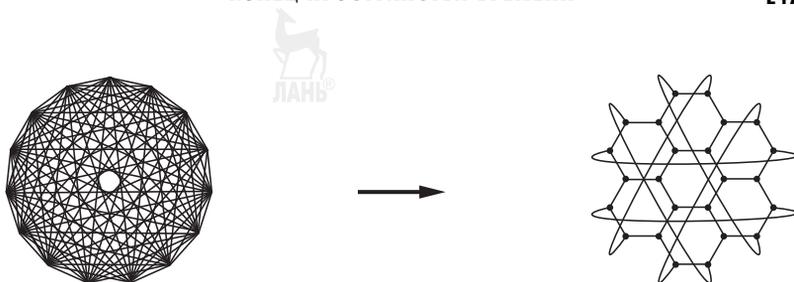


ки) в доску и соединяете нитками (связи) некоторые из них. Несмотря на простоту конструкции, такая сеть может иметь огромное разнообразие форм, от скелетных контуров до сложнейших мандал.

Чтобы вдохнуть в сеть жизнь — наделить ее способностью эволюционировать, — Маркопоулоу с коллегами предусматривает возможность включения и выключения связей в зависимости от количества доступной энергии. Этот процесс ситуативен, однако не нужно забывать, что цель заключается не в создании пуленепробиваемой теории, а в поиске возможных механизмов создания пространства. Каждая связь представляет определенное количество энергии. Цепочки связей содержат меньше энергии, чем эквивалентное количество изолированных связей, поэтому суммарная энергия сети зависит не только от количества связей, но и от их организации. Чем сложнее система, тем больше энергии она содержит.

Энергия достигает максимума в полностью взаимосвязанной сети, где каждая крупинка соединена со всеми остальными. В такой сети принцип локальности не соблюдается — вы можете перейти от отдельно взятой крупинки к любой другой крупинке одним скачком без прохождения через промежуточные точки. В сети отсутствует иерархия связей — близкое-далекое, маленькое-большое, — которая характерна для пространства. Вы не можете разделить ее на отдельные части — это неделимое целое. «В этой сущности нет понятия локальности... — объясняет Маркопоулоу. — Если вы просто протянете руку, то сможете дотянуться до всего в целой Вселенной».

Чтобы понять, почему высокоэнергетическая сеть непространственна, попытайтесь присвоить местоположение крупинкам. Каждая из них должна быть равноудаленной (один прыжок) от любой другой. Для первых трех крупинок это не проблема — расположите их в вершинах равностороннего треугольника. Четыре крупинки можно расположить в виде пирамиды. Но что делать с пятой? Местоположения, равноудаленного от первых четырех крупинок, не существует, по край-



6.4. Квантовое граффити как модель пространства. В высокоэнергетической сети (слева) каждая точка связана со всеми другими точками. В низкоэнергетической сети (справа) каждая точка связана только с несколькими другими, которые становятся ее ближайшими соседями в структуре пространства (Публикуется с разрешения Фотини Маркопулоу)

ней мере в обычном трехмерном пространстве. Вам необходима *четырёхмерная* пирамида. На деле каждая следующая крупинка требует нового измерения пространства. Очень быстро вы получите ультрамногомерный мир, который невозможно визуализировать. И по большей части это гигантское нагромождение не нужно — сеть имеет ширину всего в один прыжок в любом направлении и очень сильно похожа на скатанную в шар паутину. Поэтому, хотя можно по-прежнему рассуждать о сети как о существующей в пространстве, это не то пространство, которое нам нужно: три измерения, тянущиеся настолько, насколько мы можем видеть, в каждом направлении и позволяющие удобно описывать взаимосвязи между объектами.

Низкоэнергетические модели — это отдельная история. Это то, что нам нужно. Каждая крупинка соединяется всего лишь с несколькими другими, образуя правильную решетку вроде сот или ткани. Понятие расстояния обретает смысл: одни крупинки находятся ближе друг к другу, другие дальше. Сеть прекрасна и просторна. Принцип локальности соблюдается: чтобы воздействие передалось из одного места в другое, оно должно не перепрыгнуть, а проделать определенный путь по сети. На прохождение сигнала требуется время, которое объясняет, почему скорость объектов в пространстве ограничена (скоростью света).

Короче говоря, отсутствие и наличие пространства — это просто два разных фазовых состояния одной и той же сети крупинок. Одно может переходить в другое — скомканная масса может распрямляться и становиться плоской. Теоретики уже предложили парочку путей, которыми может идти этот процесс. Изменение формы может происходить во времени. Сеть возникает как нечто раскаленное — высоко взаимосвязанная модель содержит огромное количество энергии. Затем она остывает и кристаллизуется, подобно превращению воды в тарелке в лед, по мере разрушения связей и приобретения формы аккуратной структуры. Хитрость заключается в объяснении остывания. Объекты не остывают сами по себе, что-то должно уносить из них тепло. «Куда уходит энергия? — спрашивает себя Маркопоулоу. — Нужен какой-то холодильник. Вселенную нужно охлаждать». Она с коллегами предполагает, что энергия может уходить на создание материи. Первоначальные крупинки могут агрегироваться и образовывать элементарные частицы, поэтому материя появляется одновременно с пространством.

Как вариант переход может не быть процессом, развивающимся во времени, а структурой, которая возникает на квантовом уровне. Сеть способна существовать сразу во многих состояниях, в переходной стадии, известной как суперпозиция. Хотя большинство этих состояний непространственные, они могут сливаться во что-то пространственное. Наиболее проработанное представление о суперпозиции пространства носит довольно громоздкое название «каузальная динамическая триангуляция». Ее изобретатели показали, что непространственные геометрии нейтрализуют друг друга, поскольку события высокоорганизованны и различие между причиной и следствием появляется с самого начала. Этот эффект подобен коллективному разуму, тем замечательным ситуациям, когда вы задаете вопрос группе, в которой ни у кого нет правильного ответа, но объединение всех предположений позволяет найти его. Классический пример — эксперимент с конфетами: если

спросить группу людей, сколько конфет в вазе, то усредненный ответ будет лучше любого отдельно взятого ответа. Коллективный разум группы превосходит разум ее членов.

•

Чтобы понять, как может работать суперпозиция, вернемся к знаменитому коту Шрёдингера и сделаем шаг вперед. В изначальном сценарии экспериментатор вводит пушистого кота в состояние неопределенности, когда он одновременно и жив и мертв. Соединение знакомых условий (жизни и смерти) приводит к возникновению незнакомого (экзистенциальной неопределенности кота). Для большинства людей это звучит странно, однако обратное тоже справедливо. Соединение *незнакомых* условий может приводить к возникновению *знакомого*. Это означает, что несомненно живой кот тоже находится в суперпозиции, создающей экзотические условия вроде тех, в которых можно быть «отчасти живым и отчасти мертвым». «Отчасти мертвые» доли взаимно нейтрализуются, оставляя полностью живое животное, во многом подобно эксперименту с конфетами, где ошибки отдельных людей взаимно компенсируются. Даже обыкновенный кот, иными словами, является сплетением противоречий (хотя это нисколько не удивляет владельцев кошек).

Как бы странно это ни звучало, именно здесь кроется сила квантовой механики. Обычный мир является в значительной мере результатом странных процессов, странности которых нейтрализуют друг друга. Например, почему свет распространяется прямолинейно? Если смотреть на квантовом уровне, то свет на самом деле распространяется по всем возможным направлениям сразу, однако извилистые пути взаимно нейтрализуются, оставляя только прямой. Пространство может быть точно таким же. Обычное пространство, в котором мы существуем, может представлять собой суперпозицию непространственных сетей, где непространственность одной из них нейтрализует непространственность другой.



Внутри матрицы

Сторонники теории струн исследуют идеи, аналогичные квантовому граффити Маркопоулоу. В 1990-х гг. они предложили «матричные модели», названные так потому, что в основе уравнений лежат решетки, или матрицы чисел, во многом похожие на схемы расстояний. Математическая матрица не имеет никакого отношения к «матрице» виртуальной реальности из фильма «Матрица», но замысел пугающе сходен: мир, который мы видим, — это своего рода образ, генерируемый более глубоким уровнем реальности. Наиболее известна матричная модель, разработанная квартетом теоретиков Томом Бэнксом, Вилли Фишлером, Стивом Шенкером и Леонардом Саскиндом. Их модель, как и квантовое граффити, предполагает, что Вселенная — это переплетение взаимосвязей крупинки первичной материи. При определенных условиях излишние связи разрываются и крупинки образуют регулярную пространственную решетку. «Вы начинаете с кучи деталей из детского конструктора “Тинкертой”, не имеющих какой-либо определенной структуры, — говорит Саскинд, профессор физики из Стэнфордского университета. — Вы их хорошенько встряхиваете, и они образуют решетку или структуру того или иного вида».

Теория струн давно переросла свое название. Она допускает существование не только одномерных струн, но и двумерных мембран, а также их многомерных аналогов, называемых теоретиками 1-бранами, 2-бранами, 3-бранами, 4-бранами и т. д. Некоторые браны, обозначаемые символом D , могут действовать, как концы струн. В самом низу этой иерархии находится скромная D_0 -брана — частица своего рода. Как истинная геометрическая точка, не имеющая размера и прочих пространственных атрибутов, D_0 -брана представляет собой идеальный строительный блок для пространства. В подтверждение этой догадки теоретики наделяют D_0 -брану подходящими свойствами, чтобы она выполняла роль гравитона, передающей силу

притяжения частицы, предположения о существовании которой существуют уже не одно десятилетие.

В матричных моделях эта частица является фундаментальной, и вся Вселенная состоит полностью из них. Каждая частица может взаимодействовать со всеми остальными, и их взаимодействия не ограничиваются простым включением и выключением, а варьируют по силе и качеству. Чем больше энергии вы сообщаете паре частиц, тем сильнее становится их связь. Одноименная матрица чисел описывает эту сеть взаимодействий. Например, если перейти вниз до восьмой строки, а затем до 12-го столбца, то число там покажет, насколько сильно частица номер восемь взаимодействует с частицей номер 12. Чтобы отразить не просто силу, а еще и качество связи, требуется несколько таких матриц.

Каждая матрица — это квадрат, и перемещение по диагонали от левого верхнего угла до правого нижнего дает особый ряд чисел, где восьмая строка пересекается с восьмым столбцом, 12-я строка — с 12-м столбцом и т. д. Это показывает, как каждая частица взаимодействует *сама с собой*. Самовзаимодействие — ключевая особенность матричных моделей. Частицы представляют собой самовлюбленные элементарные сущности, физический эквивалент пользователей Facebook, которые всегда раздают «лайки» собственным постам. Их самовзаимодействие характеризуется спокойствием, непринужденностью, когда силу можно увеличивать или уменьшать без накачки энергией.

Если процессы в квантовом граффити в определенной мере произвольны, то законы, управляющие D0-бранами, подчиняются симметрии. Математическая сбалансированность уравнений служит организационным принципом этой модели. Симметрия гарантирует, что внедиагональные значения в матрице привязаны к диагональным — другими словами, взаимодействия между бранами зависят от их самовзаимодействий. Частицы, которые самовзаимодействуют сопоставимо, формируют связь, в то время как частицы с разными уровня-

ми самовзаимодействия остаются разделенными. Проще говоря, подобное притягивает подобное. Как результат браны объединяются в отдельные кластеры, подобные кругам общения в сети Facebook. Из таких кластеров складываются обычные элементарные частицы. Каждый кластер можно кратко описать всего лишь несколькими числами, представляющими силу и качество самовзаимодействия их компонентов.

Именно так появляется пространство в матричных моделях. D0-браны не существуют и не движутся в пространстве. Математически они посажены друг на друга в одной точке. Однако из-за избирательности по отношению к взаимодействиям они создают у нас впечатление жизни в пространстве. То, что мы называем «положением», — это просто набор чисел, которые идентифицируют определенный кластер. Это похоже на классификацию друзей как «любителей физики», «поклонников группы Radiohead» и «любителей кубинских танцев».

Это лишь начало. Можно взять все привычные нам пространственные понятия — движение, размер, локальность — и объяснить их через динамику бран. Движение: объекты изменяют свое положение в результате варьирования самовзаимодействий D0-бран. Это подобно тому, как если бы любители кубинских танцев разом переключились на доминиканскую музыку. Они «переходят» как группа на новое увлечение. Такое сравнение может выглядеть слишком образным, но в матричных моделях именно такова основа физического движения. Размер: самовзаимодействия бран в объекте не совсем одинаковы, немного размыты, так что объект занимает диапазон позиций. Локальность: кластеры в разных местах независимы, поскольку их самовзаимодействия неодинаковы, а это подавляет взаимодействия между ними в соответствии с логикой симметрии. Это подобно утверждению, что любителям кубинских танцев и поклонникам группы Radiohead не о чем говорить друг с другом. «Объекты, которые “разделены”, на самом деле не разделены, — объясняет Сасскинд. — Это просто аннулирование связей, которые соединяют их».

Если бы все браны воспроизводили пространство, это было бы приятно, но скучно. Наша цель — выйти за пределы пространства. Браны позволяют сделать это. Их поведение может быть слишком сложным, чтобы описать его с помощью нескольких пространственных координат. Например, взаимодействие между кластерами никогда полностью не подавляется, поскольку квантовые эффекты постоянно возвращают их к жизни. Таким образом, разделенные пространством кластеры не полностью независимы — они ощущают мягкое воздействие других кластеров. Именно таким образом матричные модели объясняют силу притяжения. В определенном смысле эти модели напоминают ньютоновское представление о гравитации как о нелокальной силе, перепрыгивающей от одного объекта к другому. Взаимодействия, которые порождают ее, не передаются через пространство — это прямые, непосредственные, нелокальные связи.

Еще одно отступление от пространственности происходит внутри кластеров. Внутренняя групповая динамика интенсивна, и каждая брана взаимодействует со всеми остальными бранами. Браны взаимно гасят самовзаимодействие, и матричные значения, представляющие такие взаимодействия, теряют качества пространственных координат. Обычно координаты — это независимые величины: вы можете определить широту города отдельно от его долготы. С бранами в кластере этого сделать невозможно. Если вы сначала определяете широту браны, а затем ее долготу, то можете получить иные результаты, чем в том случае, когда вначале определяется долгота, а потом широта. Такую зависимость от порядка в математике называют «некоммутативностью». Фактически кажется, что частица находится в двух разных местах, как Солт-Лейк-Сити в моем примере с городами. «Положение, скажем, в направлении “х” и положение в направлении “у” одновременно измерить невозможно, — говорит Эмиль Мартинек, сторонник теории струн из Чикагского университета. — Это определенно не то поведение, которое мы ожидаем от группы

разрозненных частиц. Мы рассчитываем на их точную локализацию во всех пространственных измерениях». Степень неопределенности является мерой того, насколько нелокальна и непространственна система.

Действительно, у кластера фактически нет «внутренней» области — пространство не имеет объема там, где скапливаются D0-браны. Вполне возможно, что больше нет даже D0-бран, поскольку они лишаются своей индивидуальности и ассимилируются в группе. Если взглянуть на кластер снаружи, то вы увидите не внешнюю поверхность материальной сущности, а конец пространства, а если пошуровать рукой в кластере, то вы не нащупаете внутренности потому, что у него нет внутренней области. Зато ваша рука тоже ассимилируется (что ничего хорошего ей не сулит). Если вы благоразумно не будете касаться кластера, а бросите в него частицы, то заметите, что вместимость кластера зависит от его площади, а не от внутреннего объема по той простой причине, что у него фактически нет внутреннего объема. Пространство не имеет смысла на этом уровне.

Голографическая реальность

Матричные модели имеют, конечно, свои странности, но они устанавливают знаменательный принцип: группа частиц, подчиняющихся законам квантовой физики, может самоорганизовываться так, что вы будете клясться, что они существуют и движутся в пространстве, даже если пространство не входило в число первоначальных характеристик системы. К тому же этот принцип является очень общим. Не только масса D0-бран, но и практически любая квантовая система несет в себе пространственные измерения, сложенные внутри, как фигурки в книге-раскладушке. Большинство таких систем не воссоздают пространство ниоткуда, как в матричных моделях, а используют пространство низкой размерности для генерирования пространства высокой размерности.

AdS/CFT-соответствие, которое я упоминал в предыдущей главе, представляет собой именно такую систему. Она начинается с трехмерного пространства и генерирует девятимерное. Одной из причин, по которым теоретикам так сильно нравится этот сценарий, является четкое объяснение голографического принципа, идеи о том, что Вселенная может иметь значительно меньшую сложность, чем предполагает принцип локальности. Сложность уменьшается настолько, насколько она могла бы уменьшиться, если бы одно из измерений пространства было иллюзорным. В AdS/CFT-сценарии это происходит потому, что рассматриваемое измерение *является* иллюзорным. Оно может сжаться как гармошка, поскольку его там никогда реально не было. («Иллюзорное», пожалуй, не самое подходящее слово. «Производное» или «построенное» было бы правильнее, но менее поэтично. Измерение может не существовать на низшем уровне, но быть вполне реальным для всего, что крупнее браны.)

Лишнее измерение отражает определенный аспект порядка в базовой квантовой системе. В сущности, необходимый порядок известен нам из обыденной жизни — конкретно тот факт, что большие сущности и маленькие сущности живут словно в разных мирах. Наша планета движется по своей орбите, совершенно не обращая внимания на живущих на ней людей, точно так же как мы не задумываемся о бактериях, существующих на нашей коже. Верно и обратное: мы практически не думаем о том, что несемся куда-то на гигантском каменном шаре, а бактерии даже не подозревают о наших повседневных заботах. Природа разделена по масштабам.

Звуковые волны — очень простой пример такого разделения. Звуки с большой и малой длиной волны никак не связаны друг с другом — если вы возьмете басовую и очень высокую ноту одновременно, то каждая волна будет распространяться в комнате, словно в мире существует только этот звук. Их взаимная независимость сродни автономии пространственно разделенных объектов. Допустим, вы ударяете по двум клавишам

рояля — среднее до и до-диез. Клавиша среднего до создает волну с длиной 1 м 32 см, а клавиша до-диез — волну с длиной на 14 см короче. Эти волны накладываются друг на друга в трех измерениях пространства, в котором они распространяются, однако остаются независимыми друг от друга, словно расположенные в разных местах. В определенном смысле вы можете представить, что эти волны разнесены на 14 см в четвертом измерении пространства.

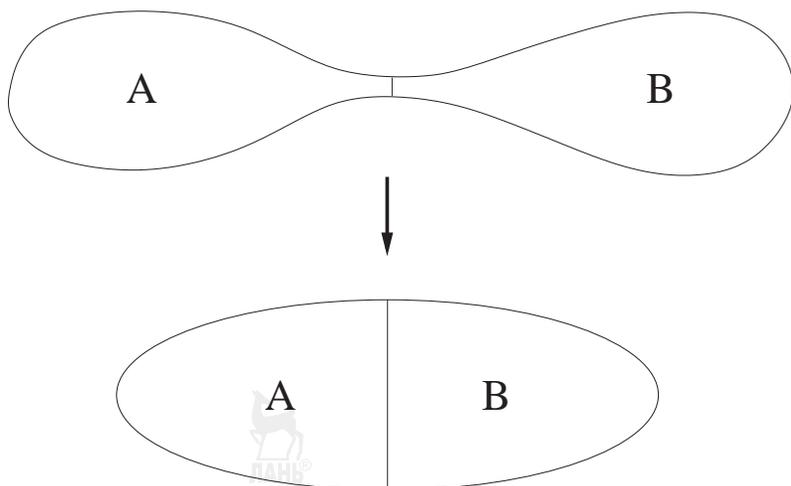
Чем дальше друг от друга расположены клавиши рояля, тем дальше друг от друга извлекаемые ими звуки в этом воображаемом измерении — определенное расстояние на клавиатуре превращается в определенное расстояние в этом измерении. Вы не видите этого измерения — для вас оно является абстракцией, отражающей акустическую независимость звуковых волн. Однако это удивительно логичная абстракция. Музыканты называют разницу между звуками музыкальным «интервалом», т. е. подразумевают расстояние, словно наш мозг реально воспринимает эту разницу как пространственное разделение. AdS/CFT-соответствие трактует такую абстракцию буквально и предполагает, что одно из измерений пространства, которое мы занимаем, представляет энергию или, что эквивалентно, размер волн в базовой системе.

Раман Сандрам, сторонник теории струн из Мэрилендского университета, очень эффектно рассказывает об этом. Допустим, вы художник, рисующий Эспланаду в центре Вашингтона с палаткой с мороженым на переднем плане и Мемориалом Джорджа Вашингтона на втором. Чтобы создать ощущение пространства на плоском холсте, вы изображаете эти два объекта в разных масштабах. Нечто похожее происходит в AdS/CFT-сценарии. Вселенная выглядит трехмерной, однако в реальности может быть двухмерным холстом, а то, что мы воспринимаем как расстояние вдоль третьего измерения, — это в конечном счете разница в масштабах. «Глубину измерения можно передать точно так же, как это делают художники: просто изобразить Мемориал маленьким, а то, что находится

на переднем плане, большим», — говорит Сандрам. Далекий объект фактически находится рядом с вами — он выглядит маленьким, поскольку он реально маленький. Вы не можете дотронуться до него не потому, что он далек, а потому, что он слишком мал, чтобы почувствовать его. Когда объекты увеличиваются или уменьшаются, мы воспринимаем это как движение к нам или от нас.

Объекты разного размера не являются строго независимыми — они взаимодействуют с объектами сопоставимого размера, и результаты этого могут передаваться от одного масштаба к другому. Вспомните поговорку про гвоздь: из-за отсутствия гвоздя теряется подкова; из-за отсутствия подковы пропадает лошадь; а вслед за ней гибнет рыцарь, проигрывается сражение и теряется королевство. Отсутствие гвоздей в одной кузнице не приводит сразу же к падению монарха — оно оказывает косвенное влияние через систему промежуточных масштабов. Звуковые волны разной высоты могут вести себя похожим образом. Китайский гонг начинает звучать с низкой частотой и постепенно переходит к более высоким тонам. Необходимость распространения через масштаб объясняет, почему пространственная локальность соблюдается в эмерджентном измерении. То, что происходит в одном месте, не перепрыгивает в другое без прохождения через промежуточные точки.

Базовая квантовая система не автоматически обретает такой иерархический порядок. Подобно картине, которая должна иметь определенную композицию, чтобы создавать ощущение глубины, система должна обладать определенной согласованностью, чтобы дать начало пространству. Такая согласованность обеспечивается запутанностью частиц или полей системы. Чтобы породить пространство в том виде, в каком оно нам известно, эти частицы или поля должны быть запутанными по масштабу: каждая частица с соседней частицей, каждая пара частиц с другой парой, каждая группа с другой группой. Другие структуры приводят к появлению других геометрий или систем, которые совершенно нельзя считать



6.5. Связанность пространства. По мере того как две части Вселенной становятся все более запутанными, они сближаются (публикуется с разрешения Марка Ван Раамсдонка)

пространственными. Если система запутана неполностью, то эмерджентное пространство несвязно, и обитатели вселенной должны быть заперты в одной области и лишены возможности попасть в другие места. «Квантовая запутанность обеспечивает связь пространства-времени в единое целое», — говорит Марк Ван Раамсдонк, теоретик из Университета Британской Колумбии. Когда мы впервые столкнулись с запутанностью, казалось, что она выходит за пределы пространства. Сегодня физики считают, что она может быть тем, что *создает* пространство.

Нарушения в матрице

Итак, мы рассмотрели несколько путей возникновения пространства из его отсутствия, и все они являются вариантами идеи о том, что запутанная сеть первичных строительных бло-

ков может распрямляться и образовывать упорядоченную кристаллическую решетку. Попробуем теперь применить эти предварительные идеи к проявлениям нелокальности, о которых я говорил в главе 1, включая корреляцию запутанных частиц, крупномасштабную однородность космоса и судьбу материи, которая попадает в черные дыры. Эти явления могут быть нарушениями в матрице: нерегулярностями, которые раскрывают глубинный характер реальности.

Эмерджентная пространственная решетка не идеальна, как все остальное в природе. Она имеет небольшие дефекты вроде пропуска стежков, где остаются болтающиеся нитки. Соседство в сети не обязательно подразумевает соседство в пространстве — один небольшой шаг в сети может быть эквивалентным гигантскому скачку в пространстве. Маркополоу и Смолин называют это явление «нарушенной локальностью», а сторонник теории струн Брайан Свингл из Стэнфордского университета использует термин «длинные связи». Эти связи являются фактически крошечными кротовыми норами вроде пространственно-временных туннелей, существование которых допускает общая теория относительности. В научной фантастике вроде «Звездного пути» или фильма «Интерстеллар» кротовые норы изображаются в виде порталов для космических кораблей, однако идея кротовой норы в реальности восходит к попыткам Эйнштейна объяснить природу частиц. Такая связь может объединять запутанные частицы. Если бы две квантовые монеты находились на концах кротовой норы, то не было бы никакой загадки в том, что они падают одной стороной при подбрасывании. «Корреляция является результатом близости в пространстве — близости через кротовую нору», — предполагает Хуан Малдасена.

Несмотря на убедительность, эта идея не лишена потенциальных изъянов. Во-первых, здесь существует опасность появления порочного круга в доказательстве. При создании моделей эмерджентного пространства-времени теоретики исходят из законов квантовой механики, а раз так, то каким образом

они собираются использовать эмерджентное пространство-время для объяснения квантовой механики? Во-вторых, кротовые норы кажутся перебором. Все, что входит в кротовую нору, должно выходить на другой стороне. Вместе с тем запутанные частицы не способны передать сигнал, не говоря уже о космическом корабле. Любой туннель между ними должен представлять собой заваленный ствол шахты, который достаточен для обеспечения одинаковых результатов у двух частиц в лабораторных экспериментах, но мал для создания обыкновенного соединительного канала. Сторонники идеи предлагают несколько путей разрешения противоречия. Малдасена утверждает, что гравитация закрывает кротовую нору прежде, чем через нее может пройти сигнал. Свингл говорит, что экспериментаторы, натолкнувшись на огромную трудность проталкивания сигнала через такую узкую связь и потребность в невероятно мощном компьютере для кодирования и декодирования, просто не могут ничего сделать на практике. А Маркопоулоу воображает, что кротовая нора может проводить сигнал, но сам сигнал ни о чем не говорит, поскольку частицы движутся случайным образом, как кот, который, пройдя по клавиатуре, хотя и может послать электронное письмо, но лишено смысла.

Другие считают, что запутанность требует более радикальных идей. Майкл Хеллер выступает за концепцию, называемую некоммутативной геометрией, с некоторым налетом иронии: фактически цель заключается в отказе от геометрии и в представлении Вселенной в виде большого алгебраического уравнения. Такое уравнение составляется из матриц, вроде матричных моделей, однако интерпретируется по-новому. Матрицы больше не представляют собой ряды чисел, описывающих связи между строительными блоками вроде D0-бран, это индивидуальные сущности, первичные ингредиенты, из которых состоит все остальное.

Точнее говоря, Хеллер и другие сторонники такого подхода принимают взгляд «сверху вниз» на физику, при котором гло-

бальные структуры — те, что охватывают всю Вселенную, — фундаментальны, а локальные геометрические понятия вроде «точек» и «объектов» выводятся из глобальных структур, а не обычный взгляд «снизу вверх», при котором Вселенная строится из огромного количества локализованных сущностей. «Не существует точек, не существует мгновений времени, — говорит Хеллер. — Все глобально. Так что локальность поглощается глобальностью». По аналогии представим, что вместо определения общества как миллионов индивидуумов, которые образуют множество групп, мы определяем его как миллионы *групп* и идентифицируем каждого индивидуума через членство в группах. (Это не так уж притянута за уши: философы и социологи вроде Гегеля давно утверждают, что индивидуальная идентичность вытекает в значительной мере из социальной.) Можно представить группы в виде большой диаграммы Венна, и каждая личность будет обозначаться в ней как пересечение определенного набора окружностей. Чтобы такое определение «сверху вниз» работало, группы должны пересекаться правильным образом. В противном случае индивидуумы теряют отчетливую идентичность — может существовать несколько личностей с одним и тем же набором групповых идентичностей, которые невозможно разделить.

Нечто похожее может произойти с глобальными структурами некоммутативной геометрии. При определенных условиях эти структуры соединяются и образуют пространственную вселенную, подчиняющуюся обычным законам физики. При других условиях этого не происходит, и их неидеальная связь порождает нелокальные явления вроде запутанных частиц. Если два обособленных объекта представляют собой просто разные смеси одних и тех же глобальных сущностей, то очевидно, что они могут сохранять внепространственную связь. То, что происходит в одном месте, воспринимает то, что происходит в других местах, без всякой коммуникации в обычном смысле.



Модели эмерджентного пространства-времени также дают нам новый подход к пониманию Большого взрыва. Происхождение Вселенной всегда представлялось парадоксальным. Предположительно ничто не предшествовало ей, и все же нечто должно было предшествовать, чтобы привести космос в движение. Парадокс, однако, рассеивается, когда мы представляем Большой взрыв не как внезапный момент создания, а как переходный процесс. Если пространство возникает из пространственных строительных блоков, как жизнь появляется из безжизненных атомов, то рождение Вселенной не более таинственно, чем рождение живого существа. Первоначальный мир, бесформенный и пустой, постепенно самоформируется в пространственную структуру. История доносит до нас древние мифы о создании, в которых первоначальный хаос постепенно разделяется: земля отделяется от неба, ночь от дня, море от суши.

Теоретики, играющиеся с этой идеей, предлагают несколько возможных первоначальных состояний. В соответствии с квантовым граффити, с одной стороны, Вселенная была сетью, насыщенной энергией. Фактически кротовые норы связывали каждую точку пространства со всеми остальными. По мере остывания системы кротовые норы закрывались, части Вселенной приобретали некоторую автономность, а пространство принимало форму, которую мы видим. Матричные модели, с другой стороны, предлагают альтернативный сценарий. Все D0-браны, составлявшие Вселенную на самом глубоком уровне, были взаимосвязаны, однако это не приводило напрямую к связи точек в пространстве. Фактически пространство было разбито на бесчисленные несвязанные части, на архипелаг маленьких вселенных. Физики называют это состояние «ультралокальностью». «Ультра» — потому что островки были не просто автономными, а абсолютно изолированными. Затем некоторые D0-браны оказались запутанными и стали



вести себя как цельные единицы — маленькие кусочки пространства. Вновь образованная единица, в свою очередь, становилась запутанной с другими такими же единицами, создавая чуть более крупный кусочек пространства. По мере того как области становились запутанными во все более крупных масштабах, пространство разворачивалось подобно ковру. С точки зрения живущего в таком пространстве это выглядело так, словно возникающие кротовые норы перекрывали пропасть между островами.

Оба сценария должны объяснять, почему Вселенная сейчас выглядит такой однородной. В эпоху до Большого взрыва материя и энергия должны были окружать сеть и распределяться равномерно еще до зарождения и роста пространства. Две галактики на противоположных сторонах неба, разделенные океаном пространства, не могут коммуницировать друг с другом *сейчас*. Однако на заре времен пространство не существовало, и их ничего не разделяло. Поскольку галактики были связаны напрямую в те времена, их сходство не случайно. Лишь с появлением пространства эта связь разорвалась. «Эта идея пришла как нечто совершенно очевидное, когда я впервые посмотрела на полностью связанный граф в качестве возможной модели начальной фазы существования Вселенной, — вспоминает Маркопоулоу. — Просто взглянула и поняла: здесь не должно быть проблемы горизонта».

Процесс возникновения может объяснить и другие общие свойства Вселенной. Например, астрономы замечают, что первоначальная Вселенная была не однородной, а немного пятнистой. Едва уловимые отклонения от идеальной однородности были зародышами, вокруг которых позднее сконденсировались галактики и другие космические структуры. Весьма любопытно, что пятна выглядят одинаково независимо от их размера. Такая независимость от масштаба — общее свойство некоторых видов фазовых переходов, например процесса превращения сжатого пара в воду. При тонком балансе двух состояний материи условия изменяются скоординированно во всех мас-

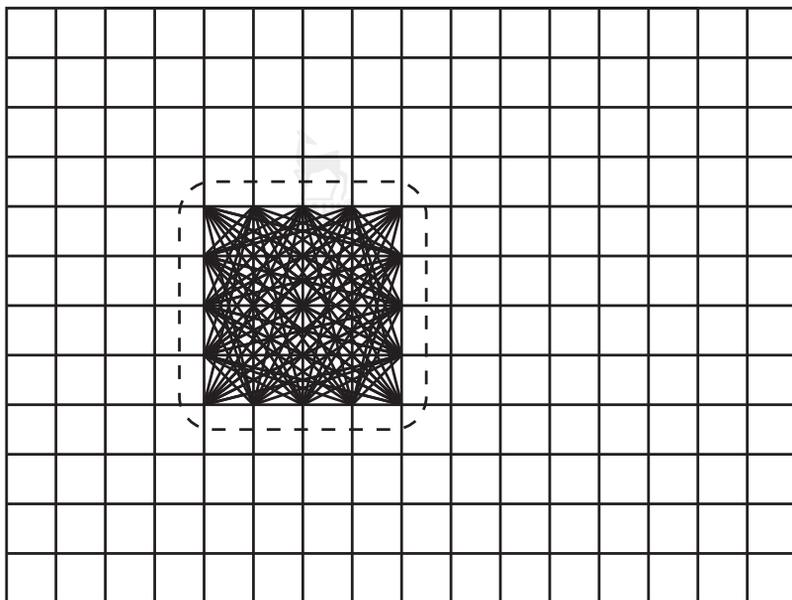
штабах. Фазовый переход от отсутствия пространства к его наличию вполне может иметь такой же характер.

•

Черные дыры — это своего рода Большой взрыв наоборот: превращение пространства в отсутствие пространства. В картине эмерджентного пространства-времени они — скопления талой воды в тундре: изолированные места во Вселенной, где пространство буквально тает, его упорядоченная кристаллическая структура превращается в текучую субстанцию. Нам трудно даже представить, на что в действительности похожа эта жидкость. «Что бы это ни было, оно не имеет геометрической интерпретации, — говорит Мартинек. — Понятие традиционной геометрии пространства-времени здесь прекращает существование».

В той мере, в какой возможно визуализировать эту жидкость, она представляется сильно взаимосвязанной сетью — не столько гравитационным пылесосом, сколько космическим лабиринтом. Она фактически бесконечномерная. Объекты, попавшие в нее, не могут вернуться не потому, что их держит сила гравитации, а потому, что им трудно найти выход. Возможно, когда-нибудь это удастся, но в краткосрочной перспективе их положение безнадежно. Их ждет судьба людей, которые звонят в страховую компанию и проводят всю ночь напролет, бродя по кошмарно-бессмысленному телефонному меню. «Эта высокосвязанная область действует как ловушка», — говорит Маркопоулоу.

В соответствии с квантовым граффити этот лабиринт представляет собой буквально комплекс каналов, а в матричных моделях он более абстрактен — лабиринт сложности. D0-браны, которые составляют дыру, находятся в непрерывном движении, постоянно перегруппировываясь так, словно плутают в лабиринте возможных размещений. Иногда бране везет: ее связи с партнерами на мгновение ослабевают, и она вылетает. Частица за частицей черная дыра рассеивается, как пред-



6.6. Модель черной дыры на основе квантового граффити. Черная дыра — это космический лабиринт: все, что попадает в него, с большим трудом выходит обратно (Публикуется с разрешения Алиосии Хамма)

сказывает Стивен Хокинг. «Длительное пребывание в сильном гравитационном поле, прежде чем вырваться в виде излучения Хокинга, — говорит Мартинек, — очень характерно для частицы, затерявшейся в этом огромном пространстве состояний».

Появление пространства может не только вызывать проявления нелокальности, наблюдаемые или ожидаемые физиками, но и предсказывать явления, которые пока что никто не видел. Одно из них известно под довольно противоречивым названием «пузырь ничего». Как и черная дыра, пузырь ничего — это фазовый переход, однако ближе по духу к кипению, чем к таянию. Когда вода в кастрюле на плите кипит, пузырьки пара зарождаются, расширяются и начинают сливаться до тех пор, пока вся жидкость не испарится. Аналогичным образом может зародиться и расти небольшой карман отсутствия пространства.

«В какой-то момент в пространстве-времени образуется квантово-механическая дыра, — говорит Розали. — Граница этой дыры распространяется со скоростью света. Это своего рода пожирание пространства-времени». К счастью, пузырь не должен засасывать вас подобно черной дыре — по правде говоря, вы не можете увидеть его непосредственно, поскольку он за пределами пространства. Несмотря на свое название, пузырь — это не совсем ничего. Квантовая система никуда не исчезает (как не исчезает вода при кипении), а просто становится слишком беспорядочной, чтобы считаться пространственной.

•

Теории пока что не имеют доказательств, однако концепция эмерджентного пространства-времени показала свою практическую ценность. Некоторые типы систем реального мира ведут себя так, словно им присущи скрытые дополнительные измерения пространства. Например, материалы вблизи абсолютного нуля могут течь или проводить электрический ток непредвиденным образом, указывая на то, что материалы достигли более высокого уровня организации. Составляющие их частицы живут и движутся в трех пространственных измерениях, но самоорганизуются так, будто живут и движутся в *четырёх* измерениях. Если посмотреть на эти материалы, то вы не увидите напрямую более высокого измерения. Оно существует на другом уровне описания, где первичными объектами являются не частицы, а их кластеры. Математика AdS/CFT-соответствия облегчает анализ таких систем.

Аналогичное явление наблюдается на другом конце температурной шкалы. За последнее десятилетие на ускорителях вроде Большого адронного коллайдера удалось разогнать ядра атомов до скоростей, соответствующих сверхгорячему состоянию материи. Полученная кипящая и бурлящая плазма представляет собой невероятную кашу — кварки и глюоны в ней взаимодействуют настолько интенсивно, что даже величайшие математические таланты на планете не могут предсказать, как они себя

поведут. Тем не менее эта плазма отличается внутренней простотой, которая становится очевидной, если сделать мысленный скачок и представить, что она существует в четырех измерениях. Например, трение в плазме можно рассматривать как гравитационные волны, исходящие из черной дыры в более многомерном пространстве. Такая аналогия даже физику не сразу приходит в голову. В каком-то смысле Большой адронный коллайдер создает не новые формы материи, а пространство.

•



Удивительно сознавать, что пространство, которое так долго считали незыблемым фундаментом физической реальности, может покоиться на еще более глубоком слое. Проявления нелокальности — ключи к разгадке этой фундаментальной структуры, если, конечно, удастся понять, как нечто формируется, на основе наблюдения за тем, как оно распадается. По иронии судьбы основной упрек, который предъявляют квантовому граффити, матричным моделям и AdS/CFT, заключается не в том, что они слишком фантастичные, а в том, что они недостаточно фантастичны. Все эти модели по-прежнему строятся на базе квантовой физики и общей теории относительности, и значительная часть структуры, которая вроде бы должна возникать спонтанно, фактически предопределена правилами.

В частности, эти модели исходят из существования времени, они не учитывают предположения Лейбница и Маха о том, что время должно появляться точно так же, как и пространство. Некоторые исследователи видят в этом не недостаток, а глубинную истину природы — время должно быть фундаментальным, даже если пространство таковым не является. В конце концов, должна же у физики быть *некая* фундаментальная структура, нечто такое, на чем строится все остальное, и время ничем не хуже любого другого кандидата на эту роль. В самом деле, разве можно говорить об эмерджентности как о временном процессе, если она не предполагает существования времени? «Стоит только сказать, что время эмерджентно, и вы сходите с рель-

сов, — говорит Мартинек. — Каковы правила? Что я делаю?» Космолог из Калифорнийского технологического института Шон Кэрролл высказывается очень коротко: «Пространство совершенно переоценено, а время недооценено... Я думаю, что время должно остаться... Пространство же — полная фикция. Пространство — это просто приближенное представление, которое полезно в определенных условиях».

Вместе с тем такое разделение времени и пространства противоречит величайшей догадке Эйнштейна о том, что то и другое фундаментально неразделимо. Если одно является эмерджентным, то таким должно быть и другое. Многие физики полагают, что время возникает, и ищут пути представления эмерджентности без обязательного существования времени. Разгадка видится в голографическом принципе. До сих пор я говорил о нем как о способе генерирования пространства, однако он может генерировать и время. Ключевым моментом в обоих случаях является существование границы. Если Вселенная имеет границу, расположенную очень далеко в пространстве, то эмерджентное измерение пространственно, а если граница расположена в прошлом или в будущем, то эмерджентное измерение темпорально. В сущности, насколько могут судить астрономы, наша Вселенная имеет темпоральные, а не пространственные границы. В прошлом есть Большой взрыв; в будущем — бесконечно ускоряющееся расширение, которое тоже служит своего рода границей. Наблюдатель, находящийся на этой границе в отдаленном прошлом или будущем, должен знать все, что можно знать о промежуточных моментах. Вчера, сегодня и завтра должны слиться в одно целое.

По этой логике теории, которые предполагают существование времени, являются неполными, простыми ступенями к полному отчету о том, как пространство и время появляются из более глубоких физических процессов. Теоретикам необходимо еще более радикальный подход к объяснению нелокальности, чем те, которые они использовали до сих пор. И они, без всякого сомнения, приближаются к нему.



Заключение: амплитудр

Незадолго до начала Второй мировой войны Вернер Гейзенберг совершил широко известную и исторически неоднозначную поездку в Копенгаген, во время которой он обсуждал с Нильсом Бором свое участие в создании атомной бомбы для нацистов. Не так известна, но не менее знаменательна его другая поездка в конце войны. В декабре 1944 г. Гейзенберг посетил Швейцарию и выступил с лекцией в Цюрихском университете. В числе слушателей наряду с его старыми друзьями-физиками находился незнакомец, возможно местный любитель физики или, не исключено, агент СС, посланный следить за ним. На самом деле это был Мо Берг — бывший бейсболист, лингвист с принстонским образованием и американский шпион. Перед ним стояла задача узнать, насколько Гейзенберг близок к созданию бомбы, и, если потребуется, убить его. Поскольку Гейзенберг ни слова не проронил о своей работе над бомбой, а лекцию посвятил новой идее в квантовой физике, так называемой S-матрице; Берг оставил его в живых.

S-матрица была революционным подходом к физике без пространства и времени, еще более далеким от обычного понятия пространства, чем графы и матрицы, о которых я говорил в предыдущей главе. Гейзенберг, всегда имевший

зуб на пространство, считал, что проблемы квантовой теории поля с объяснением электрической и магнитной сил, в частности с их предсказанием, доказывают бесконечность величины этих сил. Чтобы обойти вопрос о том, правильна ли теория и что может заменить ее, он создал математическую версию принципа «то, что ты не знаешь, навредить тебе не может».

Гейзенберг предложил рассматривать беспорядочные столкновения частиц как черный ящик. Известно, что входит в него, известно, что выходит, но никто не видит сложных процессов, протекающих внутри. S-матрица представляет вероятности возможных исходов. Чтобы определить входные данные, говорил Гейзенберг, теоретикам не нужно знать, что происходит внутри ящика. Они могут не принимать во внимание, где находятся частицы, как они движутся и даже то, на самом ли деле это частицы, а не пульсации поля или какая-нибудь странная вещь, до которой физики еще не додумались. Короче говоря, теоретики могут отказаться даже от упоминания идеи пространства при описании физических процессов. Вместо этого заключение о том, что они наблюдают, нужно делать на основе широких правил. Это сродни выбрасыванию игральных костей. Можно использовать суперкомпьютер для решения уравнений движения для маленьких кубиков с углублениями, кувыркающихся в беспорядочных воздушных потоках. А можно поступить проще: исходить из того, что в результате симметрии кость имеет равные шансы упасть на любую из шести сторон.

К счастью для всех нас, математическое изобретение Гейзенберга работало намного лучше, чем его бомба. S-матрица стала частью инструментария всех теоретиков, но совсем не по той причине, которую первоначально предполагал Гейзенберг: в ней увидели удобную систему учета, а не способ обходиться без пространства и времени. Незадолго до конца войны физики поняли, как использовать квантовую теорию поля для выполнения полномасштабных расчетов — как открыть ящик и заглянуть внутрь, — и отвлеклись от вопроса о том, распадаются ли пространство и время в конечном счете. Так или иначе черный

ящик снова захлопнулся в 1950–1960-х гг., когда физики погрузились в глубины атомного ядра. Квантовая теория поля, похоже, не подходила для описания ядерных сил, и S -матрица вновь обрела привлекательность. Но на этот раз теоретик Джеффри Чу из Калифорнийского университета в Беркли сделал шаг вперед. Если Гейзенберг предполагал существование определенных базовых законов физики — механизма, действующего внутри ящика, — то Чу исходил из того, что их нет. Возможно, S -матрица — это все, что есть.

Это было нечто радикальное, а радикализм был популярен в Беркли 1960-х гг. Отчасти целью Чу было избавление от пространства и времени, в которых он видел причину неработоспособности квантовой теории поля. «Чтобы заметно продвинуться вперед, нам нужно остановиться и осмыслить такой ненаблюдаемый континуум», — говорил он своим коллегам на лекции в 1963 г. Чу предположил, что вместо последовательного описания частиц или волн, распространяющихся в пространстве, законы физики должны описывать набор принципов, на основе которых сущности или процессы связаны друг с другом. Внутренность ящика — это не часовой механизм с движущимися частями, а пазл, складывающийся определенным образом. Части не только не движутся, они на самом деле не являются «частями». В атомном ядре нет ничего более фундаментального, чем все остальное, — все имеет свое место в структуре. S -матрица описывает эту структуру математически, и физики могут подходить к ней как к sudoku: заполнять решетку чисел на основе простых правил. Пространство и время, воспринимаемые нами в макроскопических масштабах, рождаются из субатомного порядка.

Так или иначе, идея зашла в тупик. Она предсказывала, что базовые принципы должны полностью определять S -матрицу. Чу писал: «Природа такова, как есть, поскольку это единственно возможная природа, которая не противоречит сама себе». Однако по существу уникальной S -матрицы для частиц, которые изучал Чу, не существовало. Общие правила не говорили, куда ставить все числа, подобно плохо составленной судо-

ку, в которой недостает информации, чтобы заполнить ее. К началу 1970-х гг. квантовая теория поля смогла объяснить ядерные силы старомодным пространственно-временным образом, и большинство физиков отказались от S-матрицы во второй раз.



Пока S-матрица то набирала популярность, то теряла ее, оксфордский математик Роджер Пенроуз работал над собственным видением эмерджентности пространства-времени. Первоначально он пытался представить пространство как сеть, о которой я говорил в предыдущей главе, но, увидев возможность объяснить лишь некоторые его аспекты, расширил в 1960-х гг. концепцию до «теории твисторов». Глядя на проявления нелокальности, Пенроуз рассудил, что нелокальные структуры должны быть более фундаментальными, чем локальные. Поэтому он положил в основу своей теории не частицы или другие локализованные строительные блоки, а лучи света. Пенроуза интересовал не сам по себе свет как источник освещения, а причинные связи, представляемые лучами света. Лучи света распространяются бесконечно далеко в пространстве, поэтому они настолько нелокальны, что дальше некуда. Из них можно выстроить все традиционные структуры физики. Пересечение лучей дает вам точку. Завихрение лучей (давнее начало слову «твистор») воспроизводит вращающуюся частицу. «Локальные структуры в пространстве-времени имеют нелокальную природу», — говорит Лайонель Мейсон, один из бывших студентов Пенроуза, а теперь его коллега в Оксфорде.

Каким бы странным ни казалось превращение светового луча в базовую единицу, это очень близко к тому, как мы воспринимаем мир. Мы никогда не наблюдаем пространственно-временные точки и расстояния как таковые — все, что мы видим, так это лучи света. Эндрю Ходжес, коллега Пенроуза, говорит: «Твисторная картина намного ближе к тому, как мы думаем... Идеи наблюдения за тем, что видно, очень фунда-

ментальны. Мы не можем непосредственно воспринимать пространственно-временные события». Когда в следующий раз будете смотреть на ночное небо, представьте, что лучи света связывают вас со звездами. В каком-то смысле вы ближе к звездам, чем к тому, кто сидит на некотором расстоянии, поскольку свет, идущий от звезд, уже достигает вас, а связь с соседом происходит с небольшой задержкой. Как говорит Рафаэль Соркин, выдвигающий аналогичные идеи, «звезда ближе к вам, чем вчерашний день».

Увы, интерес к этому подходу, как и ко многим другим, постепенно угасает. Основную трудность Пенроуз называет проблемой «гугли», заимствовав словечко из крикета, а поклонник телесериала «Баффи — истребительница вампиров» вполне может назвать ее проблемой вампиров: частицы в этой теории не отражаются в зеркале. «Он очень упорен, но идея почему-то не работает», — говорит Мейсон. На взгляд большинства физиков, Пенроуз напрасно тратит время. «Твисторная теория — это гадкий утенок теоретической физики», — замечает Нима Аркани-Хамед. Делу Пенроуза не идет на пользу и его крайне скептическое отношение к конкурирующим подходам, особенно к теории струн, у которой собственный цикл взлетов и падений. Какой бы обоснованной ни была его критика, она не вызывает теплых чувств у коллег.

Вновь и вновь мы видим одну и ту же картину: блистательная идея относительно пространства стремительно набирает популярность и так же быстро теряет ее. Некоторые считают, что еще не пришло время для ответов, и привлекательность идеи нужно оценивать относительно потенциального разочарования в ней. Ханс Халворсон, например, оставил осмысление нелокальности и углубился в другие области философии. «Тот, кто задумывается над этим, проходит через фазы воодушевления и депрессии, — говорит он. — В настоящее время я чувствую себя довольно подавленным». Фотини Маркопоулоу уже не раз проходила то через одно состояние, то через другое.

«Разочарований было больше, чем надежд, — сказала она мне как-то раз за обедом в 2011 г. — Хотелось бы знать, стоит ли тратить жизнь на это. Вряд ли можно надеяться на значительные результаты». Когда мы вновь встретились год спустя, выяснилось, что она оставила науку и занялась изучением промышленной эстетики. «Я абсолютно уверена, что вопрос квантовой гравитации нужно решать, но вытянуть ответ из ничего невозможно... Моя жизнь не бесконечна. Мне хочется поэкспериментировать немного».

•

Осенью 2003 г. Пенроуз прочитал в Принстонском университете цикл лекций, в которых окрестил теорию струн «модным увлечением». Он вспоминает, как опасался встречи с Эдвардом Виттеном, главным проповедником теории струн. Однако тот даже не подумал прийти на лекции, ему просто нравилось подкидывать Пенроузу новые идеи. «Он начал что-то объяснять мне, — вспоминает Пенроуз. — Похоже, это имело отношение к твисторам». Виттен предложил ему прочитать короткую статью, касающуюся старого детища Пенроуза. «Короткая» статья оказалась 70-страничным монстром, где струны и твисторы связывались в единую теорию. «Это было очень увлекательно и впечатляюще», — говорит Пенроуз.

Виттен давно считался разноплановой фигурой — не просто главным проповедником теории струн, а точкой контакта с другими областями исследования, в частности с чистой математикой. Он даже написал статью о твисторах в их золотую пору 25 лет назад. «Твисторная теория интересует меня с того момента, когда я впервые услышал о ней, — говорит Виттен. — Я не раз пытался сделать что-нибудь полезное с ее помощью, но ни разу не получил того, что хотел. Все эти годы меня занимали возможные направления применения твисторной теории».

Статья Виттена представляла собой анализ того, как физика непрерывно переосмысливает себя, нередко выходя за старые границы. Она побуждала к определенной переоценке цен-

ностей. Твисторианцы неожиданно узнали, что у сторонников теории струн есть ответы на проблему гугли и другие вопросы, которые мучили их. Мейсон начал понимать, как часто они упускали возможность обмена идеями. Например, во время визита в Сиракузский университет в 1987 г. он и Пенроуз отказались послушать выступление теоретика Парамешварана Наира из Городского колледжа Нью-Йорка, чья работа предвосхищала работу Виттена и, как теперь понятно, могла бы заполнить пробелы твисторной теории. «Мы так и не встретились, — говорит Мейсон. — В результате эта чудесная идея пролежала без пользы 16 или даже 17 лет».

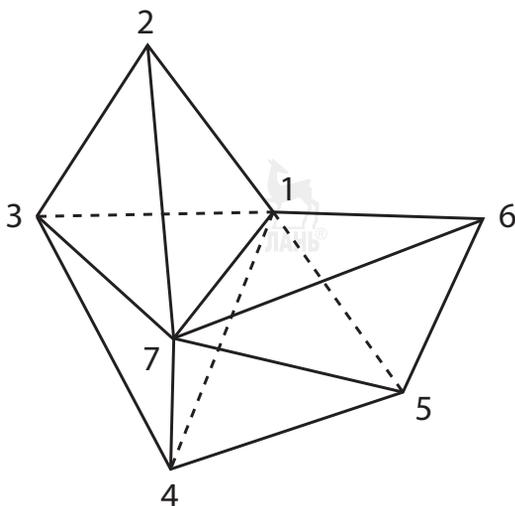
Сторонники теории струн тоже пришли в движение. Статья Виттена не только помирила их с твисторианцами, но и указала на вопрос, который они упустили в своей собственной области исследования: почему результаты столкновений частиц так трудно поддаются расчету и существует ли более удобный путь их определения? Как я говорил в главе 1, большинство физиков смотрели на такие расчеты как на адское домашнее задание и старались поскорее забыть о нем. Лишь несколько человек вроде Цви Берна не отступали, но и они стали отказываться от этого к 2003 г. После того как статья Виттена вышла в свет, Фредди Качасо из Института теоретической физики «Периметр» с рядом коллег предложил способ выполнения расчетов без пространственно-временных координат, оставив в стороне механизм столкновения частиц и сфокусировавшись на входных параметрах и результатах. Идея имела пугающее сходство со старой S -матрицей, которая вновь возрождалась из небытия. «Эту историю можно озаглавить, как “Месть аналитической S -матрицы”», — говорит Ланс Диксон из Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми, один из ближайших соратников Берна.

До того момента, когда Виттен объединил сообщества струн и твисторов, они работали порознь и изъяснялись каждое на своем языке. Аркани-Хамед так описывает их обмен мнениями на встрече в Оксфорде в 2005 г. Качасо сделал доклад о новом

методе расчета, а во время ответа на вопросы Ходжес высказал замечание, смысл которого никто не мог понять — что-то вроде чрезвычайной схожести S-матричных диаграмм Качасо с твисторными диаграммами. «Я просто ничего не понял, абсолютно ничего, — вспоминает Аркани-Хамед. — Я подумал, что этот парень либо полный псих, либо гений». Тем не менее Аркани-Хамед был заинтригован настолько, что выполнил собственные расчеты и представил их графически. «Диаграммы смутно напоминали то, что демонстрировал Эндрю», — говорит он. Аркани-Хамед не знал, что реально означают эти диаграммы, но они совпадали, и это было заметно.

Что увидел Ходжес, так это способ визуализации S-матричных расчетов геометрически с использованием твисторов. В 2013 г. Аркани-Хамед вместе со своим аспирантом Ярославом Трнка, ныне работающим в Калифорнийском технологическом институте, представил геометрический метод расчета вероятностей, называемых на профессиональном жаргоне «амплитудами», для процессов с участием частиц. Они дали своему методу старомодное название «амплитуэдр». Для частиц, участвующих в конкретном процессе, строится полиэдр с количеством вершин по числу частиц. Так, если у вас две входящие частицы, рождающие четыре исходящие частицы, то требуется шесть вершин — шестигранник или его более многомерный эквивалент. Импульс частицы определяет размер соответствующей грани полиэдра. Сформировав такую фигуру, можно рассчитать ее внутренний объем, и его величина в соответствии с правилами процедуры будет равна искомой амплитуде.

Такой полиэдр — это не реальный объект, находящийся в обычном пространстве, а абстрактная математическая форма, которая отражает структуру взаимодействий частиц. Она включает в себя все прежние методы расчета, которые физики используют для определения амплитуд, в том числе причудливые диаграммы Фейнмана и их минималистскую альтернативу, предложенную Берном и его коллегами. Эти разные методы соответствуют разным способам деления полиэдра в целях



Часть амплитуэдра, которая соответствует взаимодействию семи частиц (Публикуется с разрешения Ярослава Трнка)

расчета его объема. Полиэдр также демонстрирует симметрию естественных процессов, которую до тех пор теоретики не видели.

Эта процедура не предполагает, что процесс происходит в пространстве-времени. «Здесь нет полей, нет частиц, нет взаимодействий», — говорит Трнка. Локальность, которую мы наблюдаем в повседневной жизни, является следствием сложения граней воедино — точнее, следствием того, что они образуют замкнутую фигуру, а не разомкнутые плоскости. Эти шесть вершин складываются в шестигранник, а, например, не в звезду. Обычно грани не сложены воедино, а следовательно, локальность — это особый случай. «Простые геометрические свойства амплитуэдра заключают в себе локальность», — объясняет Аркани-Хамед.

Главный урок, как и в случае других подходов к эмерджентному пространству-времени, заключается в том, что пространство представляет собой такой тип порядка в мире,



который вы не можете ожидать априори. Конечно, этот метод работает пока лишь в случае сильно идеализированных теорий, ядерных сил, и исследователям еще предстоит распространить его на более беспорядочную реальность, в которой мы живем. Более того, им и философам еще нужно разработать физическую интерпретацию структуры. В настоящее время им лучше удастся описание того, чем природа *не является*, а не того, что она собой представляет. «Строительные блоки не имеют пространственно-временной интерпретации, — говорит Аракани-Хамед. — Эти строительные блоки — выходцы из совершенно другого мира, чем тот, который мы нарисовали в физике частиц». Что они реально представляют собой — другой вопрос. Будущее наверняка внесет свои коррективы и покажет, как ответить на него. Те из нас, кому доведется жить в ту эпоху, воочию увидят, насколько интересным был этот поиск.

Как подростки

Обратимся теперь к двум современным дискуссиям по вопросу нелокальности. Твисторно-струнное противостояние закончилось, однако спор вокруг запутанности, о котором я говорил в главе 4, не утихает (хотя, как будет показано далее, становится более схоластическим, поскольку все указывает на то, что наши представления о пространстве должны измениться). Ни в одном из случаев разногласия не были устранены путем явной победы одной стороны над другой. Такая ясность редко встречается в науке.

Если представить науку в виде дерева, то внимание большинства далеких от науки людей будет сосредоточено на стволе — возвышающемся хранилище знаний. Однако это мертвая часть дерева. Для ученых реально имеет значение тонкий слой живой ткани под корой, обеспечивающий рост организма. Мы обращаемся к науке в поисках ответов, а для ученых главное — вопросы, они рассматривают ответ лишь как прелюдию к дру-

гому вопросу. Мы ожидаем, что ученые будут говорить одно и то же, но сама идея единомыслия чужда науке.

Ученые предпочитают не касаться этого аспекта их профессии. Они нередко рассматривают свои споры как копание в грязном белье, о котором публике лучше не знать (и жалуется, когда журналисты вытаскивают их на свет божий). Но если скрывать споры, то о чем тогда говорить? Наука — это непрерывный спор. Как только ученые достигают согласия в чем-то, они переходят на новую тему. Это все равно что устроить званый ужин с ньюйоркцами: если они и согласятся с чем-то, то спокойствие продлится ровно столько, сколько нужно для хорошего глотка пива. Сфера науки требует такого склада характера, при котором процесс ценится не меньше, чем результат. «Когда вы открываете что-то, у вас возникает более тесная связь с идеями, — говорит Аркани-Хамед. — Это сплошь тупики. Вы видите их без всяких прикрас. Так легче полюбить их, так легче понять, когда пришло время отвернуться от них».

В целом об ученых судят по их оригинальности, а не по дипломатичности. В их профессиональной жизни есть что-то от социальной жизни подростков. Они уязвимы. Выдвинув идею, им постоянно приходится изворачиваться, чтобы ее услышали. Самый верный путь к принятию идеи — показать, что старшие делают что-нибудь неправильно, а они могут сделать это лучше. Они делают имя, отстаивая свое мнение по вопросу, который коллеги считают важным, а когда им возражают, идут ва-банк, а не сбрасывают карты. Различия между своими и чужими у них сильны — чтобы иметь возможность делиться безумными идеями или задавать глупые вопросы, они добиваются благорасположения своей группы за счет углубления разногласий с другими группами.

Как бы ни разочаровывала индивидуальных исследователей необходимость борьбы с упрямыми коллегами, сложность достижения согласия идет на пользу науке в целом. Каждой новой идее нужен энтузиаст. Иногда теория торжеству-

ет, несмотря на первоначальный скепсис, а иногда она бывает плодотворной, даже если совершенно неправильна. Множество великих достижений начинались с неправильных идей. В этом есть своя ирония. Ученым, участвующим в споре, нужно убедиться в том, что они правы, а их противники упускают что-то. Со стороны, конечно, виднее, но нам по-прежнему нужно, чтобы все спорщики считали себя правыми так, чтобы никто не сдавался слишком быстро. Нам нужна терпимость к нетерпимости.

Идеи живут, по крайней мере в краткосрочной перспективе, не потому, что они правильные или неправильные, а потому, что они заставляют людей задуматься. Успех научного или художественного творения определяется в большей мере не тем, что оно представляет собой, а тем, что оно влечет за собой. Истинность определяют потомки, а до той поры более значимой является плодотворность. «Хорошие идеи обладают эдакой дарвиновской способностью к выживанию, а плохие — нет, — писал Леонард Сасскинд. — Хорошие идеи порождают новые хорошие идеи, а плохие не ведут никуда». А еще идея скорее получает распространение, если она помогает другим продвигать свои идеи. Ученые нередко шутят, что если во время лекции кто-то поднимает руку, то вопрос наверняка будет выглядеть так: «Сказанное очень интересно, но как оно связано с моей работой?» Одной из главных причин, по которой новым идеям для признания требуется время, является то, что они по своей природе не связаны с работой других людей.

Консенсус возникает, когда старые вопросы теряют плодотворность, о которой говорил Сасскинд, а новые становятся преобладающими в экосистеме. Вчерашние затяжные споры превращаются в домашние задачки. Но на это требуется время. Иногда ученые пытаются ускорить этот процесс, но обычно такое происходит только в ответ на запрос со стороны. Финансирующие агентства спрашивают совета, за какие проекты лучше платить; Конгресс запрашивает экспертную оценку по текущим вопросам; популяризатор науки расспрашивает

ет квантовых физиков о нелокальности. Такие запросы сродни коллапсу волновой функции в квантовой механике. Когда частица находится в неопределенном состоянии, факт наблюдения может инициировать результат за счет создания парадоксов. Аналогичным образом, принуждение ученых к согласию может иметь нежелательные последствия. Вспомните постоянно меняющиеся рекомендации по вопросу о том, что следует есть или какие исследования необходимо проходить для своевременного выявления онкологических заболеваний. Именно это происходит, когда от ученых требуют результатов до того, как они появятся.

•

Оторванные от земли физические концепции непонятным образом проникают в нашу повседневную жизнь и становятся восприимчивыми к широким культурным трендам. «Наша цивилизация существует как органическое целое, — сказал Шрёдингер на лекции в 1932 г. — Те счастливики, которые могут посвятить свою жизнь научным исследованиям, не просто ботаники, физики или химики. Они люди и дети, независимо от своего возраста».

Хотя физики нередко предвосхищают социальные тренды, они плетутся позади, когда дело доходит до концепций пространства. Возможно, иллюзорность пространственного расстояния кажется им слишком радикальной, но мы уже живем в эпоху «смерти расстояний», как выразилась журналист и редактор журнала *Economist* Франсес Кернкросс. Современные коммуникационные технологии технически, наверное, не могут быть нелокальными, но создают полное впечатление нелокальности. Телеграф и телефон казались почти волшебством в XIX в. и заставляли людей переосмысливать границы своей личности. Теперь мы слышим нечто подобное в отношении новых продуктов Apple. Информационная эра — это лишь очередной этап долгой истории, которая началась с печатного станка и океанских судов. Живым примером того, насколько

изменилось наше представление о расстоянии, служит ураган «Катрина», во время которого многие эвакуированные говорили, что впервые выезжают за пределы Нового Орлеана. Разговоры о таком отсутствии мобильности вряд ли можно было бы представить столетие назад, когда люди в среднем не удалялись от своего места рождения более чем на несколько десятков километров. Сегодня люди с высшим образованием, как правило, несколько раз меняют место жительства на протяжении жизни. Пассажирский транспорт может доставить вас практически в любой населенный пункт планеты, и на это уйдет не более 24 часов.

Место проживания больше не определяет судьбу. Наша идентичность по-прежнему формируется на основе старых географических атрибутов — гражданства, этнической принадлежности и расы, однако сейчас есть возможность сконструировать групповую идентичность для себя. Мы выбираем круг друзей и коллег на основе общих интересов и эмоциональной близости и не ограничиваемся теми, кто родился в одной деревне с нами. В этих сетях связей существует собственное понятие социального расстояния, которое отличается от пространственного расстояния.

Я заметил, что современная жизнь видоизменила даже наше чувственное восприятие реального физического расстояния. После восьмичасового сидения перед экраном и привыкания к его иллюзорной глубине трудно оценить реальную глубину. Когда я был ассистентом преподавателя астрономии в магистратуре, студенты, бывало, посмотрев в окуляр телескопа на Сатурн, отстранялись, словно не знали, что делать, вновь смотрели и спрашивали: «Это действительно Сатурн? Это не рисунок? Не проекция?» Некоторые хотели посмотреть в телескоп с другого конца, чтобы убедиться, действительно ли они могут видеть что-то на расстоянии 1,28 млрд км.

По иронии судьбы, впрочем, чем меньше значения имеет расстояние, тем больше оно кажется. Люди жалуются, что сейчас между нами больше световых дней, чем когда-либо,

что трудно установить человеческий контакт друг с другом, что о соседях мы можем сказать лишь то, что они кажутся милыми. По ощущениям мы ближе к тем, кто далеко, и дальше от тех, кто рядом. Как бы мы ни сетовали на такую тенденцию, выдерживание дистанции очень важно для современной жизни. Любовь имеет смысл по той причине, что мы остаемся индивидуумами; если бы желание влюбленных слиться в одно целое реализовалось, что осталось бы? По большому счету величайшее зло — это когда расстояние пропадает и мы сливаемся в толпу.

Раздвоенность сейчас стала определяющим элементом физики. С одной стороны, расстояние может не иметь значения на фундаментальном уровне. Когда два человека разделены большим расстоянием, они в действительности могут быть рядом друг с другом в определенном, более глубоком смысле. С другой стороны, наше существование все же требует появления концепции расстояния. Для Эйнштейна необходимость коснуться для оказания воздействия была чем-то на уровне здравого смысла, однако теперь мы понимаем, насколько исключительным и хрупким является этот факт в реальности. «Пространство и время — величайшие объединяющие и разделяющие факторы», — писал в начале XX в. немецкий философ Мориц Шлик. Они делают нас индивидуумами и связывают нас друг с другом. Мы не можем иметь одно без другого.

Если окажется, что пространство и время действительно являются продуктами более глубокого уровня реальности, то никто не знает, какие новые явления нам ждать от этого открытия. Могут ли космические загадки вроде темной материи и темной энергии быть признаком распада пространства? Могут ли существовать условия, позволяющие нам перемещаться быстрее света (предположительно таким образом, который исключает возникновение парадоксов)? С моей точки зрения, эти безрассудные предположения блекнут на фоне простой реализации. Если конечные составляющие Вселенной являются непространственными, то у них нет размера

и их нельзя исследовать путем деления на более мелкие части. Они вездесущи. Они могут находиться прямо у нас под носом, но оставаться незамеченными. Мы можем обнаружить самые экзотические явления в самых прозаических местах.





Примечания

Введение: воздушный замок Эйнштейна

- C. 7 *ни одно предыдущее открытие*: Kafatos and Nadeau, *The Conscious Universe: Part and Whole in Modern Physical Theory*, 1.
- C. 7 *первоначальное значение, появившееся в XVII в.*: locality, n., (1) The fact or quality of having a place, that is, of having position in space. 1628 Вр. J. Hall *Olde Relig.* vii. iii. 69 'It destroyes the truth of Christs humane bodie, in that it ascribes quantitie to it, without extension, without localitie.'" *Oxford English Dictionary Online*, accessed November 30, 2012, www.oed.com.
- C. 8 *В знаменитом эссе 1936 г.*: Einstein, "Physics and Reality."
следует ожидать, что мир хаотичен: Einstein, *Letters to Solovine: 1906–1955*, 117.
- C. 9 *может означать разное*: Earman, "Locality, Nonlocality, and Action at a Distance: A Skeptical Review of Some Philosophical Dogmas."
- C. 9 *она имела два аспекта*: Howard, "Einstein on Locality and Separability."
- C. 13 *без такого четкого разделения*: там же, 187–88.
- C. 14 *мир без пространства*: Kant, *Critique of Pure Reason*, 50.
- C. 15 *он неизменно оказывался впереди всех*: Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, 16–25.
- C. 15 *Атомы вашего тела*: Smolin, *Life of the Cosmos*, 252.
- C. 15 *призрачного действия на расстоянии*: Born and Einstein, *The Born-Einstein Letters 1916–1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*, 155.
- C. 15 *искал более глубокую теорию*: Belousek, "Einstein's 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance."
- C. 16 *моего воздушного замка*: Stachel, *Einstein from 'B' to 'Z'*, 151.
- C. 17 *могли бы наделить вас сверхъестественными способностями*: Collins and Pinch, *Frames of Meaning: The Social Construction of*

- Extraordinary Science*, chap. 4; Kaiser, *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, chaps. 4, 10.
- C. 17 *не такое, как мы думали раньше*: Greene, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*, 123.
- C. 17 *пространство и время обречены*: Gross, “Einstein and the Search for Unification,” 2039.
- C. 18 *самым поразительным открытием*: Tim Maudlin, e-mail to author, October 17, 2012.
- C. 18 *более глубокое, более таинственное*: Maudlin, “Part and Whole in Quantum Mechanics,” 60.
- C. 18 *Что делает физику возможной*: William Unruh, interview by author, November 15, 2010, Utrecht, Netherlands.

I. Многообразие видов нелокальности

- C. 21 *играешь в конструктор*: Энрике Гальвез, имейл автору, 4 июля 2012.
- C. 22 *хитроумные изобретения «безумных ученых»*: Gilder, *The Age of Entanglement*, chaps. 30–31.
- C. 22 *Похоже, что стиральные машины*: Маркус Бейден, интервью автора, 15 ноября 2011, Сингапур.
- C. 22 *намного веселее, чем какие-то взрывы*: Гальвез, телефонное интервью автора, 31 мая 2012.
- C. 23 *использовали запутанность для телепортации*: Bouwmeester et al., “Experimental Quantum Teleportation.”
- C. 23 *просто ради интереса*: Гальвез, телефонное интервью автора.
- C. 24 *билась над ней два года*: Holbrow, Galvez, and Parks, “Photon Quantum Mechanics and Beam Splitters.”
- C. 24 *создавать запутанные частицы у себя в подвалах*: Galvez, *Correlated-Photon Experiments for Undergraduate Labs*; Prutchi and Prutchi, *Exploring Quantum Physics Through Hands-On Projects*; Musser, “How to Build Your Own Quantum Entanglement Experiment, Part 2 (of 2).”
- C. 24 *Оно становится массовым*: Дэвид ван Баак, интервью автора, 17 марта 2011, Дрезден, Германия.
- C. 24 *это метафора*: Lightman, “Magic on the Mind: Physicists’ Use of Metaphor.”
- C. 26 *на два красных луча*: Nikogosyan, “Beta Barium Borate (BBO).”
- C. 27 *Вы не представляете*: Гальвез, имейл автору, 8 октября 2012.
- C. 29 *оно доходит до сотен миль*: Ursin et al., “Entanglement-Based Quantum Communication Over 144 Km.”
- C. 29 *этого эксперимента в космосе*: Morong, Ling, and Oi, “Quantum Optics for Space Platforms.”
- C. 29 *ближе к волшебству*: Mermin, “Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory,” 47.
- C. 29 *Студенты обожают это*: Гальвез, интервью автора, 5 августа 2011, Гамильтон, штат Нью-Йорк.

- C. 30 статью о первых экспериментах с запутанностью: d'Espagnat, "The Quantum Theory and Reality."
- C. 30 У моих соседей по общежитию: Модлин, интервью автора, 19 января 2011, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 30 Просто закрыл вопрос: Модлин, имейл автору, 17 октября 2012.
- C. 31 отстаивающие нелокальность, либо как опровергающие ее: Beller and Fine, "Bohr's Response to EPR," 23–27; Howard, "Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue," 59, 81–82.
- C. 31 репутация не пострадала бы: Pais, *Einstein Lived Here*, 43.
- C. 31 считали их «философскими»: Kaiser, *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, chap. 1.
- C. 32 удовлетворительным описанием природы: Dirac, "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature," 48.
- C. 32 добраться до сути всего: Модлин, интервью автора.
- C. 32 что высказывание сомнений: Whitaker, "John Bell in Belfast: Early Years and Education," 14–17.
- C. 32 не цитировалась нигде: Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*, 319n41.
- C. 32 Один из его некрологов: Gribbin, "The Man Who Proved Einstein Was Wrong"; Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 150.
- C. 33 явную несовместимость: там же, 172.
- C. 33 мирно сосуществуют: Shimony, "Conceptual Foundations of Quantum Mechanics," 388.
- C. 34 фундаментального конфликта с теорией относительности: Модлин, имейл автору, 18 октября 2012.
- C. 34 самая коварная правительственная программа наблюдения: Ekert, "Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem."
- C. 34 В фотосинтезе запутанностью: Vedral, "High-Temperature Macroscopic Entanglement"; Sarovar et al., "Quantum Entanglement in Photosynthetic Light-Harvesting Complexes."
- C. 35 стала одной из самых цитируемых: Redner, "Citation Statistics from More Than a Century of Physical Review."
- C. 35 между физиками и философами: Антон Цайлингер, интервью автора, 1 апреля 2011, Нью-Йорк.
- C. 36 энергия, попадающая внутрь: Рамеш Нараян, телефонное интервью автора, 19 июля 2012.
- C. 36 обнаружили завихрение газа: Goss and McGee, "The Discovery of the Radio Source Sagittarius A (Sgr A)."
- C. 36 область таинственно неярка: Broderick, Loeb, and Narayan, "The Event Horizon of Sagittarius A*."
- C. 36 и исчезает — пшик: Нараян, телефонное интервью автора.
- C. 37 У черной дыры нет поверхности: там же.
- C. 38 журнале для туристов *Climbing*: Johnson, "A Passion for Physical Realms, Minute and Massive."
- C. 38 единения с природой: Стивен Гиддингс, имейл автору, 27 октября 2012.

- C. 38 *от большого гризли*: Гиддингс, интервью автора, 9 мая 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.
- C. 39 *студенты чувствовали себя совершенно затюканными*: там же.
- C. 39 *просто разные способы колебаний*: Musser, *The Complete Idiot's Guide to String Theory*.
- C. 39 *захлестнуло меня с головой*: Гиддингс, интервью автора, 9 мая 2012.
- C. 39 *это, может быть, и сработает*: там же.
- C. 40 *распасться на случайный мусор*: Гиддингс, интервью автора, 30 марта 2007.
- C. 40 *все утрачивается*: Hawking, "Black Holes and Thermodynamics."
- C. 40 *в поисках потайных дверей и лазеек*: Callan et al., "Evanescent Black Holes."
- C. 41 *первоначальное видение Хокинга*: Гиддингс, интервью автора, 9 мая 2012.
- C. 41 *мы должны видеть подобные проколы*: Banks, Susskind, and Peskin, "Difficulties for the Evolution of Pure States into Mixed States."
- C. 41 *должны быть обратимы*: Hawking, "Information Loss in Black Holes."
- C. 41 *продолжаю биться над вопросом*: Гиддингс, интервью автора, 14 мая 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.
- C. 41 *Примерно к тому же выводу*: Lowe et al., "Black Hole Complementarity Versus Locality."
- C. 41 *Я не пошел дальше*: Гиддингс, интервью автора, 9 мая 2012.
- C. 42 *привлекает внимание людей*: Sivers, "How to Start a Movement."
- C. 43 *Hubble Deep Field*: Macchetto and Dickinson, "Galaxies in the Young Universe."
- C. 43 *всего один фотон света в минуту*: Марио Ливлио, имейл автору, 13 ноября 2012.
- C. 43 *впервые заметил в 1969 г.*: Misner, "Mixmaster Universe."
- C. 43 *учебника по теории гравитации*: Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*.
- C. 43 *капал кислоту на различные виды ткани*: Lightman and Brawer, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, 233.
- C. 44 *Лабораторные работы были ужасны*: Чарльз Мизнер, телефонное интервью автора, 5 июля 2012.
- C. 44 *геометрическая и физическая интуиция*: там же.
- C. 44 *растягивая световые волны*: Schmidt, "3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift."
- C. 45 *однако шипение не исчезло*: Wilson, "The Cosmic Microwave Background Radiation," 475.
- C. 45 *ему 13,8 млрд лет*: Planck Collaboration, "Planck 2013 Results. XVI. Cosmological Parameters."
- C. 45 *случайные совпадения маловероятны*: Carroll, "In What Sense Is the Early Universe Fine-Tuned?"
- C. 45 *почему небо не испещрено пятнами*: Мизнер, телефонное интервью автора.

- C. 47 *российский теоретик Яков Зельдович*: Zel'dovich, "Particle Production in Cosmology."
- C. 47 *в таких экстремальных случаях*: Мизнер, телефонное интервью автора.
- C. 47 *как решить проблему горизонта*: Guth and Steinhardt, "The Inflationary Universe."
- C. 48 *галактики фактически не перемещаются в пространстве*: Davis and Lineweaver, "Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe," 5–6.
- C. 48 *относительной скоростью*: Мизнер, телефонное интервью автора.
- C. 49 *верные признаки следов инфляции*: Ade et al., "BICEP2 I: Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales."
- C. 49 *открытие обернулось пшиком*: Planck Collaboration, "Planck Intermediate Results. XXX. The Angular Power Spectrum of Polarized Dust Emission at Intermediate and High Galactic Latitudes."
- C. 49 *неестественно однородной*: Vachaspati and Trodden, "Causality and Cosmic Inflation"; Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 755–57; Steinhardt, "The Inflation Debate."
- C. 50 *поделила первое место*: Kaplan, "Winners of the Young Researchers Competition in Physics Announced."
- C. 50 *любопытная взаимосвязь*: Фотини Маркопоулоу, телефонное интервью автора, 23 ноября 2012.
- C. 50 *похож на планетарий*: там же.
- C. 51 *на котором Эйнштейн остановился*: там же.
- C. 51 *Странно, когда в программе*: Маркопоулоу, интервью автора, 4 июня 2011, Нью-Йорк.
- C. 51 *занимались квантовой гравитацией*: Маркопоулоу, телефонное интервью автора.
- C. 51 *Маркопоулоу сделала имя*: Markopoulou and Smolin, "Causal Evolution of Spin Networks"; Markopoulou and Smolin, "Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States."
- C. 51 *интуиция подсказывала мне*: Маркопоулоу, телефонное интервью автора.
- C. 52 *Несколько струнных теоретиков*: Easther et al., "Constraining Holographic Inflation with WMAP."
- C. 52 *находящаяся прямо у нас под носом*: Маркопоулоу, имейл автору, 17 мая 2012.
- C. 52 *самой базовой функцией*: Greene, *The Fabric of the Cosmos*, 122.
- C. 54 *число кабелей для передачи данных*: Perkins and Malyukov, "Cables: The 'Blood Vessels' of ATLAS."
- C. 54 *2900 км*: Musser, "How to Build the World's Simplest Particle Detector."
- C. 54 *вычисления по диаграммам Фейнмана*: Цви Берн, имейл автору, 16 мая 2012.

- C. 55 *220 различными способами*: Mangano and Parke, “Multi-Parton Amplitudes in Gauge Theories,” 304.
- C. 55 *сокращаются всего до четырех*: там же, 326.
- C. 56 *Наука делается не так*: Берн, интервью автора, 24 апреля 2012, Лос-Анджелес.
- C. 56 *сразу перейти к конечным четырем*: Bern et al., “Fusing Gauge Theory Tree Amplitudes into Loop Amplitudes.”
- C. 56 *критиковали аятолл*: Нима Аркани-Хамед, интервью автора, 23 февраля 2011, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 57 *стремительно развивается*: Аркани-Хамед, имейл автору, 8 января 2010.
- C. 57 *полноценной альтернативы*: Arkani-Hamed and Trnka, “The Amplituhedron.”
- C. 57 *проблема диаграмм Фейнмана*: Arkani-Hamed, Cachazo, and Kaplan, “What Is the Simplest Quantum Field Theory?”
- C. 57 *привлек подход Фейнмана*: Kaiser, *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, 368–73.
- C. 57 *в наказание получаете*: Аркани-Хамед, телефонное интервью автора, 5 февраля 2010.
- C. 58 *Частицы все равно подчиняются*: Arkani-Hamed et al., “Local Spacetime Physics from the Grassmannian.”
- C. 59 *но она побуждала к революции*: Kuhn, *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, chap. 5.
- C. 59 *В детстве именно это*: Аркани-Хамед, интервью автора, 11 июля 2011, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 60 *части одного и того же слона*: Heller, “Where Physics Meets Metaphysics,” 261.
- C. 60 *представление о смысле запутанности*: Аркани-Хамед, интервью автора, 11 июля 2011.
- C. 60 *клеем, который скрепляет пространство*: Giddings, “Black Holes, Quantum Information, and Unitary Evolution”; Van Raamsdonk, “Building Up Spacetime with Quantum Entanglement.”
- C. 60 *вроде тайных туннелей*: Maldacena and Susskind, “Cool Horizons for Entangled Black Holes.”

2. Истоки нелокальности

- C. 61 *конец рациональности*: Popper, “Bell’s Theorem: A Note on Locality,” 417.
- C. 61 *несовместимо с самой возможностью*: Bohm and Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, 157.
- C. 61 *«чепуха»*: Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*, 172.
- C. 61 *единство в многообразии*: Salmon, *Causality and Explanation*, 69–71, 76–78, 85–90.
- C. 63 *поразительным образом похожа*: McMullin, “The Explanation of Distant Action: Historical Notes,” 272.

- C. 63 *глыба грубой материи*: Франс ван Люнтерен, имейл автору, 19 августа 2012.
- C. 64 *привычно упускать суть*: ван Люнтерен, имейл автору, 19 августа 2012.
- C. 64 *начинали с дифференциального уравнения*: ван Люнтерен, имейл автору, 18 августа 2012.
- C. 64 *в древнюю тьму*: Hesse, *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*, 157.
- C. 65 *трудно перевариваемой*: ван Люнтерен, имейл автору, 18 августа 2012.
- C. 65 *ученые пытались оправдать*: van Lunteren, “Framing Hypotheses: Conceptions of Gravity in the 18th and 19th Centuries.”
- C. 65 *естествоиспытатели отмахивались от нелокальности*: Hesse, *Forces and Fields*, 166, 187; Jammer, *Concepts of Force*, 145–46.
- C. 65 *перипетии начались*: Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, 18.
- C. 65 *Согласно рассказу Платона*: Taylor, “Parmenides, Zeno, and Socrates.”
- C. 65 *узнать побудительные причины*: Salmon, *Causality*, 6–7.
- C. 66 *Посейдон рассердился*: Thucydides, *History of the Peloponnesian War*, 83.
- C. 66 *объяснения не проводят различия*: Hesse, *Forces and Fields*, 34–35.
- C. 66 *Какие правила определяли*: Guthrie, *A History of Greek Philosophy*, vol. 1, *The Earlier Presocratics and the Pythagoreans*, 37–45.
- C. 66 *плавает в подземном океане*: Lloyd, *Early Greek Science: Thales to Aristotle*, 9.
- C. 66 *Он был не так уж уверен*: Guthrie, *A History of Greek Philosophy*, vol. 2, *The Presocratic Tradition from Parmenides to Democritus*, 31–33; Lloyd, *Early Greek Science*, 36–39.
- C. 66 *девять таких парадоксов*: Huggett, “Zeno’s Paradoxes.”
- C. 67 *самоочевидную вещь*: Simplicius, *On Aristotle’s Physics* 6, 114.
- C. 67 *присущего ему масштаба*: Riemann, “On the Hypotheses Which Lie at the Bases of Geometry”; Grünbaum, *Modern Science and Zeno’s Paradoxes*, chap. 3.
- C. 67 *Одно из толкований*: Фэй Даукер, интервью автора, 4 апреля 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.
- C. 68 *одним крошечным кусочком пространства/времени*: Feynman, *The Character of Physical Law*, 57.
- C. 68 *дискретных строительных блоков*: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 2, 389–92, 455–56; Leucippus and Democritus, *The Atomists: Leucippus and Democritus*, 73–74, 164–71.
- C. 68 *чувства, которыми мы наслаждаемся*: там же, 119, 208–209.
- C. 68 *придумали атомисты*: Cornford, “The Invention of Space”; Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 1, 279; Casey, *The Fate of Place*, 79–84.
- C. 68 *Без пустоты никуда*: Lucretius, *The Nature of Things*, 15.
- C. 69 *неисчислимым разнообразием миров*: Guthrie, *History*, vol. 2, 404–407.

- C. 69 *пространство отделяет атомы*: Leucippus and Democritus, *The Atomists*, 184–88.
- C. 69 *только при прямом контакте*: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 2, 418–19, 498; Leucippus and Democritus, *The Atomists* 73, 74, 88.
- C. 69 *едва ли существовало жизненное*: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 2, 388; Leucippus and Democritus, *The Atomists*, 159, 195.
- C. 70 *эта аналогия появилась столетия спустя*: Berryman, *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, 33–39.
- C. 70 *Отдельные атомы безжизненны*: Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture: Pythagoras to Newton*, 11–12, 495–98.
- C. 70 *отсутствие цели и смысла*: там же, 77–78.
- C. 70 *сжечь его книги*: Leucippus and Democritus, *The Atomists*, 56–57.
- C. 70 *получившей Пулитцеровскую премию*: Greenblatt, “The Answer Man.”
- C. 70 *лишенной хозяев надменных*: Lucretius, *The Nature of Things*, 68.
- C. 71 *мир кишит жизнью*: Kearney, *Science and Change, 1500–1700*, 23–24, 26–33.
- C. 71 *разработал сложную теорию*: Newstead, “Aristotle and Modern Mathematical Theories of the Continuum.”
- C. 71 *к расположению атомов*: Hesse, *Forces and Fields*, 62.
- C. 71 *Аристотель пытал отворачивать*: Aristotle, *Physics*, book 4, parts 7–9.
- C. 71 *относительно соседних объектов*: Barbour, *Absolute or Relative Motion? The Discovery of Dynamics*, 84–91.
- C. 71 *импульс, передающийся через среду*: Hesse, *Forces and Fields*, 79–80.
- C. 71 *Современники Аристотеля в Китае*: Needham and Wang, *Science and Civilisation in China*, vol. 4, part 1, 6–8.
- C. 71 *образ мыслей Аристотеля*: Lloyd, *Early Greek Science*, 103–9; Rovelli, “Aristotle’s Physics: A Physicist’s Look.”
- C. 72 *подтвердить или опровергнуть*: Lloyd, *Early Greek Science*, 139–42.
- C. 72 *сделать Вселенную постижимой*: Hesse, *Forces and Fields*, 72.
- C. 72 *исключительно при соприкосновении*: там же, 67–73.
- C. 72 *изменения положения тела*: Aristotle, *Physics*, book 7, part 1, 242b59.
- C. 72 *Аристотель пытался разработать*: Jammer, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*, 17–22.
- C. 72 *полукоза-полуолень или сфинкс*: Aristotle, *Physics*, book 4, part 1, 208a27.
- C. 72 *многих странных камней*: Hesse, *Forces and Fields*, 57–58.
- C. 72 *известной как Магнисия*: Melfos, Helly, and Voudouris, “The Ancient Greek Names ‘Magnesia’ and ‘Magnetes’ and Their Origin from the Magnetite Occurrences at the Mavrovouni Mountain of Thessaly, Central Greece. A Mineralogical-Geochemical Approach.”
- C. 72 *Фалес также восхищался янтарем*: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 1, 66.
- C. 72 *По-гречески янтарь*: Gilbert, *On the Magnet*, 46–47.
- C. 72 *Китайские ученые обнаружили*: Needham and Wang, *Science and Civilisation in China*, vol. 4, part 1, 230, 232.

- C. 73 пары, которые вытесняют воздух: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 2, 426.
- C. 73 проигнорировал ее: Hesse, *Forces and Fields*, 57.
- C. 73 вращающимся прозрачным сферам: Kuhn, *The Copernican Revolution*, 79–80; Jammer, *Concepts of Force*, 41–42.
- C. 73 подталкивают его внутрь: Guthrie, *History of Greek Philosophy*, vol. 2, 400–413; Leucippus and Democritus, *The Atomists*, 94–95, 179–84.
- C. 74 не совершается на расстоянии: Saint Thomas Aquinas, *The Summa Theologica of Saint Thomas Aquinas*, book 1, query 8, article 1, reply to objection 3.
- C. 74 чем больше ученые вдумывались: Kuhn, *The Copernican Revolution*, 101–104, 115–17.
- C. 74 магнит притягивает: Hesse, *Forces and Fields*, 87–90.
- C. 75 в процессе «соития»: Gilbert, *On the Magnet*, 1, 208.
- C. 75 доказательством существования атомов: Kuhn, *The Copernican Revolution*, 89–90, 231–37.
- C. 75 все явления природы: Descartes, *The Philosophical Writings of Descartes*, vol. 3, *The Correspondence*, 7.
- C. 75 всесторонность, как и Аристотелева: Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, 408.
- C. 75 послужили манифестом: Kearney, *Science and Change*, 151–60.
- C. 76 преемственность очевидна: Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, 417; Garber, *Descartes' Metaphysical Physics*, 119.
- C. 76 просто геометрическая фигура: Descartes, *Principles of Philosophy*, 40–41.
- C. 76 свободно и прямолинейно: Suppes, “Descartes and the Problem of Action at a Distance,” 149–50.
- C. 76 не требуют доказательств: Descartes, *Principles of Philosophy*, 69.
- C. 76 превзошел современные теории: Westfall, *The Construction of Modern Science: Mechanisms and Mechanics*, 34–36.
- C. 77 крошечных винтов или рычагов: Hesse, *Forces and Fields*, 106–107.
- C. 77 алхимическую лабораторию в сарае: Westfall, “Newton and Alchemy,” 318–19.
- C. 78 Фейнман увлекался этим: Feynman, “Surely You’re Joking, Mr. Feynman!”, *Adventures of a Curious Character*, 332–36.
- C. 78 продукт магии: Kearney, *Science and Change*, 22–25, 48; Westfall, “Newton and the Hermetic Tradition,” 195; Henry, *The Scientific Revolution and the Origins of Modern Science*, 55.
- C. 78 мало сердца: Goodrick-Clarke, *The Western Esoteric Traditions: A Historical Introduction*, chap. 1.
- C. 78 единстве природы: Stamatellos, *Plotinus and the Presocratics: A Philosophical Study of Presocratic Influences in Plotinus' Enneads*, 26–29, 150–54.
- C. 78 Они сохраняют влияние: Hanegraaff, “The New Age Movement and the Esoteric Tradition.”

- C. 79 заклинания и зелья: Copenhaver, "Natural Magic, Hermetism, and Occultism in Early Modern Science," 270–81; Hesse, *Forces and Fields*, 31–32; Goodrick-Clarke, *The Western Esoteric Traditions*, 8, 56.
- C. 79 их причины покрыты тайной: Agrippa von Nettesheim, *Three Books of Occult Philosophy*, 32.
- C. 79 карточке из шоколадной лягушки: Rowling, *Harry Potter and the Sorcerer's Stone*, 102.
- C. 79 была важной частью: Sack, "Magic and Space."
- C. 79 симпатий и антипатий: Jammer, *Concepts of Force*, 42–47.
- C. 79 подобное создает подобное: Frazer, *The Golden Bough: A Study in Magic and Religion; Part I: The Magic Art and the Evolution of Kings*, vol. 1, 52.
- C. 80 алхимией, астрологией и нумерологией: Hesse, *Forces and Fields*, 74–77, 93–97.
- C. 80 Западная культура колебалась: Brush, "The Chimerical Cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective," 403–10.
- C. 80 следы в споре Бора — Эйнштейна: Forman, "Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918–1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment," 111–12; Brush, "The Chimerical Cat," 410–18.
- C. 80 как Агриппа, ухватились за них: Kearney, *Science and Change*, 40–41.
- C. 81 могли разрешить загадки: Henry, *The Scientific Revolution*, chap. 4.
- C. 81 управлять природой: Yates, *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*, 155–56.
- C. 81 Пико делла Мирандола: Goodrick-Clarke, *The Western Esoteric Traditions*, 45.
- C. 81 За такое замечательное мнение: Yates, *Giordano Bruno*, 112.
- C. 81 В монологе Гамлета: Caldiero, "The Source of Hamlet's 'What a Piece of Work Is a Man!'"
- C. 81 мочой зеленой ящерицы: Agrippa von Nettesheim, *Three Books of Occult Philosophy*, 150.
- C. 81 заложив основы: Kearney, *Science and Change*, 116–18, 130–32.
- C. 81 Цель магии: Rossi, *Francis Bacon: From Magic to Science*, 22.
- C. 82 магического понятия симпатий: Jammer, *Concepts of Force*, 72.
- C. 82 кризис неуверенности в себе: Koestler, *The Watershed: A Biography of Johannes Kepler*, 123–24.
- C. 82 здесь я оплошал: там же, 62.
- C. 82 влияния мистики на свой образ мыслей: Kearney, *Science and Change*, 138.
- C. 82 Кеплер зарабатывал на жизнь составлением гороскопов: Koestler, *The Watershed*, 39–42.
- C. 82 если бы Луна состояла из воды: Kepler, *New Astronomy*, 56–57; McMullin, "The Origins of the Field Concept in Physics," 18–19.
- C. 82 корректирующее влияние на орбиты: Kuhn, *The Copernican Revolution*, 246.
- C. 82 Пусты механицизма: McMullin, "Origins of the Field Concept," 20.

- C. 82 *владычеством Луны*: Galilei, *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems, Ptolemaic and Copernican*, 462.
- C. 82 *периферию господствующей философии*: Koestler, *The Watershed*, 163–65.
- C. 82 *«великой амфибией»*: Kearney, *Science and Change*, 196.
- C. 83 *яркими атеистами*: Henry, “Occult Qualities and the Experimental Philosophy: Active Principles in Pre-Newtonian Matter Theory,” 352–53.
- C. 83 *алхимии, неоплатонизма и каббалы*: там же, 352–53, 357–58; Westfall, *The Life of Isaac Newton*, 117–19.
- C. 83 *свидетельствуют о Божественном*: Dobbs, “Newton’s Alchemy and His Theory of Matter,” 526–27.
- C. 84 *предаются интеллектуальному разврату*: Албион Лоуренс, интервью автора, 12 апреля 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.
- C. 84 *точно знали*: Kearney, *Science and Change*, 194–96.
- C. 84 *поздравляя его*: Newton, *Isaac Newton: Philosophical Writings*, 106–107.
- C. 85 *15 000 писем*: Leibniz, *Philosophical Papers and Letters*, vol. 1, 549n21.
- C. 85 *насколько это меня отвлекает*: Mates, *Philosophy of Leibniz*, 27.
- C. 85 *в пяти раундах переписки*: Westfall, *Life of Isaac Newton*, 294; Leibniz, *Philosophical Papers and Letters*, vol. 2, 675.
- C. 85 *считаться их удовлетворительным разрешением*: Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 109.
- C. 85 *механистического объяснения*: Mischel, “Pragmatic Aspects of Explanation.”
- C. 85 *но и необъяснима*: Hutchison, “What Happened to Occult Qualities in the Scientific Revolution?,” 253.
- C. 86 *Это химера*: Leibniz, *Philosophical Papers and Letters*, vol. 2, 716.
- C. 86 *у меня нет никаких гипотез*: Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, vol. 1, 314.
- C. 86 *этого вполне достаточно*: Henry, “Occult Qualities and the Experimental Philosophy,” 358–59, 362–63.
- C. 86 *две отдельные функции*: Janiak, *Newton as Philosopher*, 15–25, 53–65.
- C. 86 *убедительную картину*: Jammer, *The Philosophy of Quantum*.
- C. 87 *Настойчивый поиск объяснения*: Hutchison, “What Happened to Occult Qualities in the Scientific Revolution?,” 251.
- C. 87 *усмирить неумное желание*: Hume, *A Treatise of Human Nature*, book 1, *Of the Understanding*, 13.
- C. 87 *известна как инструментализм*: Popper, “Three Views Concerning Human Knowledge.”
- C. 87 *уверяют своих коллег*: Kuhn, *The Copernican Revolution*, 229–30; Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*, 176–77.
- C. 88 *творческая искра науки*: Lightman, “Magic on the Mind.”
- C. 88 *Нет четкой границы*: Lange, *An Introduction to the Philosophy of Physics: Locality, Fields, Energy, and Mass*, 249–50.

- C. 88 *три широкие гипотезы*: Newton, *Mathematical Principles*, vol. 1, 174; Hesse, *Forces and Fields*, 148–53; McMullin, “The Explanation of Distant Action,” 293–301.
- C. 88 *частицы оказывают силовое воздействие*: Newton, *Mathematical Principles*, vol. 2, 313.
- C. 89 *яростных религиозных фанатиков*: van Lunteren, “Nicolas Fatio de Duillier on the Mechanical Cause of Universal Gravitation.”
- C. 89 *«нематериальном»*: Newton, *Philosophical Writings*, 102.
- C. 89 *«бестелесном»*: Newton, *Mathematical Principles*, vol. 1, 174.
- C. 89 *«неосозаемом»*: Leibniz, *Philosophical Papers and Letters: A Selection*, vol. 2, 696.
- C. 89 *проникать внутрь планет*: Janiak, *Newton as Philosopher*, 76–79; Kochiras, “Gravity and Newton’s Substance Counting Problem.”
- C. 90 *способствовали появлению концепции*: Gale, “Leibniz and Some Aspects of Field Dynamics”; Friedman, Introduction to Kant’s *Metaphysical Foundations of Natural Science*, ix–x.
- C. 90 *вездесущности Бога*: Newton, *Philosophical Writings*, 22, 25–27.
- C. 90 *Бог уже существует*: Kochiras, “Gravity and Newton’s Substance Counting Problem,” 270–72; Janiak, *Newton as Philosopher*, 37–40.
- C. 90 *монады дают начало*: Gale, “Leibniz and Some Aspects of Field Dynamics,” 39–40; Slowik, “The ‘Properties’ of Leibnizian Space: Whither Relationism?,” 123–24, 128–29.
- C. 90 *Никто из них не думал*: Newton, *Philosophical Writings*, 21–22; Leibniz, *Leibniz: New Essays on Human Understanding*, book 2, chap. 13, paragraph 17.
- C. 90 *помог Ньютону переработать*: Janiak, *Newton as Philosopher*, 90–94, 168–72.
- C. 90 *относилась к атеизму*: Newton, *Philosophical Writings*, 102; Henry, “Pray Do Not Ascribe That Notion to Me’: God and Newton’s Gravity.”
- C. 90 *упоминал нелокальные силы*: Hesse, *Forces and Fields*, 153–56, 180–88; Henry, “Gravity and De Gravitatione: The Development of Newton’s Ideas on Action at a Distance,” 20–23.
- C. 91 *отвращать от себя механицистов-нуристов*: Westfall, *Life of Isaac Newton*, 187–88.
- C. 91 *абсолютно приемлемыми*: van Lunteren, “Framing Hypotheses,” 68–90; Hesse, *Forces and Fields*, 155–56, 166, 187.
- C. 91 *жидкости существуют в случаях магнетизма*: Williams, *The Origins of Field Theory*, 17–27; Hesse, *Forces and Fields*, 182–83.
- C. 91 *повернулась на 180 градусов*: там же, 166.
- C. 91 *казалось бы простое соударение*: Jammer, *Concepts of Force*, 211.
- C. 91 *сторонники локальности*: Leibniz, *Philosophical Papers and Letters*, vol. 2, 446; Leucippus and Democritus, *The Atomists*, 84, 186–87, 192–93.
- C. 91 *мгновенный разворот*: Hesse, *Forces and Fields*, 163–66.
- C. 91 *Главный немецкий философ*: Kuehn, *Kant: A Biography*, 64.

- C. 92 о континууме сил: Friedman, "Introduction" pp. xvi– xix; Kant, *Metaphysical Foundations of Natural Science*, 34, 50–55; Williams, *Origins of Field Theory*, 37–43.
- C. 92 никогда не вступают в непосредственный контакт: Hesse, *Forces and Fields*, 163–66.
- C. 92 сводили локальные силы: van Lunteren, "Framing Hypotheses," 126.
- C. 93 сводят незаурядные непостижимости: Mach, *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, 55–56.
- C. 93 тяготение больше никого не беспокоит: Mach, *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*, 56.
- C. 93 лапки лягушек дергались: Kipnis, "Luigi Galvani and the Debate on Animal Electricity, 1791–1800," 114.
- C. 94 влажным куском картона: там же, 135.
- C. 94 новую замечательную игрушку: Berkson, *Fields of Force: The Development of a World View from Faraday to Einstein*, 30.
- C. 94 восстанию против механистических взглядов: Williams, *Origins of Field Theory*, 31, 43.
- C. 94 возрождений магического мышления: Goodrick-Clarke, *The Western Esoteric Traditions*, 180.
- C. 94 сторонники были очарованы: Safranski and Osers, *Schopenhauer and the Wild Years of Philosophy*, 200–201.
- C. 94 разнообразные силы природы: Morus, *When Physics Became King*, 54–63.
- C. 94 свою первую батарейку: Stauffer, "Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism," 40.
- C. 94 не создает магнитных эффектов: там же, 43.
- C. 94 провод, соединенный с батареей: там же, 46.
- C. 95 слепа к другим объектам: Berkson, *Fields of Force*, 21–22.
- C. 95 вихревые движения: Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, vol. 2, 317.
- C. 95 соглашались с атомистическим ньютоновским объяснением: Cantor, *Optics After Newton: Theories of Light in Britain and Ireland, 1704–1840*, 29–31, 86–90, 204.
- C. 95 вдохновение в течении: там же, 129–30.
- C. 95 среди схоластов Средневековья: Hesse, *Forces and Fields*, 81.
- C. 97 использовать лазерную указку: Prutchi and Prutchi, *Exploring Quantum Physics Through Hands-On Projects*, 4–6.
- C. 97 При императоре: Morus, *When Physics Became King*, 23, 26–32.
- C. 97 склонны неправильно истолковывать: Cantor, *Optics After Newton: Theories of Light in Britain and Ireland, 1704–1840*, 142–44.
- C. 97 учеником переплетчика книг: Williams, *Michael Faraday: A Biography*, 8, 14.
- C. 97 Он взял займы: там же, 15, 22.
- C. 97 их видение единства: Williams, *Origins of Field Theory*, 68–69; Morus, *When Physics Became King*, 91–97.

- C. 98 слово «физик»: Morus, 6–7, 53.
- C. 98 стратегией ребрендинга: там же.
- C. 98 никогда не изучал математику: Williams, *Origins of Field Theory*, 67.
- C. 98 природа в конечном счете локальна: Berkson, *Fields of Force*, 39–49.
- C. 98 силовыми линиями: Williams, *Origins of Field Theory*, 76.
- C. 98 обычное вещество, состоящее: Doran, “Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature,” 164–65; Hesse, *Forces and Fields*, 199–200.
- C. 99 нематериального посредника: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, vol. 2, 284–93, vol. 3, 447–52; Doran, “Origins and Consolidation of Field Theory,” 166–78.
- C. 99 ввел термин: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, vol. 3, 30.
- C. 99 никогда не видим его: Williams, *Origins of Field Theory*, 112–13, 117.
- C. 102 в точках пространства: Maxwell, *Scientific Papers*, vol. 1, 160, 205.
- C. 102 могли так же хорошо: Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. 1, x.
- C. 102 отвечали бы на гипотетические: Hesse, *Forces and Fields*, 196–98.
- C. 102 возмущения требуют времени: Berkson, *Fields of Force*, 231–40.
- C. 102 Задержка кажется странной: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, vol. 3, 409, 412.
- C. 102 электромагнитная волна: Maxwell, *Scientific Papers*, vol. 1, 535, 579–80.
- C. 102 сущность реальных объектов: там же, 564; Lange, *Introduction to the Philosophy of Physics*, 120–36.
- C. 102 никакая энергия не пропадает: Faraday, *Experimental Researches in Chemistry and Physics*, 443–63.
- C. 102 очень пагубную ересь: Tait, *Properties of Matter*, 6; Lodge, *Modern Views of Electricity*, 331.
- C. 103 не было места в теории Максвелла: van Lunteren, “Gravitational and Nineteenth-Century Physical Worldviews.”
- C. 103 сила тяжести всегда притягивает: Maxwell, *Scientific Papers*, vol. 1, 570–71.
- C. 103 проносится через пространство: Hesse, *Forces and Fields*, 195, 225.
- C. 103 выделяли одну скорость: Lange, *Introduction to the Philosophy of Physics*, 210–12.
- C. 104 что волны остановились: Einstein, “Autobiographical Notes,” in Schilpp, *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, 53.
- C. 104 были так же противоречивы: Berkson, *Fields of Force*, 261–67.
- C. 104 как медведь в клетке: de Haas-Lorentz, *H. A. Lorentz: Impressions of His Life and Work*, 41.
- C. 104 возможно, даже тяготение: McCormach, “H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature.”
- C. 104 относительно измерительного прибора: Berkson, *Fields of Force*, 274–75, 313–15.

- C. 105 *неприятные последствия*: Einstein, “Physics and Reality,” 364–65; Berkson, *Fields of Force*, 271; Frisch, “Inconsistency in Classical Electrodynamics.”
- C. 105 *словно ясновидящая*: Dirac, “Classical Theory of Radiating Electrons,” 159–60; Jackson, *Classical Electrodynamics*, 786–98.
- C. 105 *использовать для бесконечно быстрой*: Frisch, “Non-Locality in Classical Electrodynamics,” 4–7.
- C. 105 *взрываться под давлением*: Dirac, “Classical Theory of Radiating Electrons,” 149.
- C. 105 *бесконечная емкость*: Rayleigh, “The Dynamical Theory of Gases and of Radiation.”
- C. 106 *Некоторые начали сомневаться*: Ritz, “Recherches critiques sur l'électrodynamique générale”; Wheeler and Feynman, “Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action.”

3. Локальность Эйнштейна

- C. 107 *сторонай все интересное*: Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 32–37.
- C. 107 *великие философские труды*: Howard, “Albert Einstein as a Philosopher of Science.”
- C. 107 *отклонили заявление*: Isaacson, *Einstein*, 54–61.
- C. 107 *В первых научных статьях*: McCormmach, “Einstein, Lorentz, and the Electron Theory,” 43–44.
- C. 107 *подправил эти уравнения*: Norton, “Einstein’s Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics Prior to 1905.”
- C. 108 *эгалитарные чувства Эйнштейна*: Zahar, “Why Did Einstein’s Programme Supersede Lorentz’s? (II),” 232–33.
- C. 108 *В момент прозрения*: Abiko, “Einstein’s Kyoto Address: ‘How I Created the Theory of Relativity,’” 14.
- C. 108 *складывания или вычитания*: Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, vol. 1, 21–22.
- C. 108 *предположение о мгновенной передаче информации*: Ehlers, “The Nature and Structure of Spacetime,” 73–74.
- C. 109 *увидит собственное невежество*: Fernbach et al., “Political Extremism Is Supported by an Illusion of Understanding.”
- C. 109 *обменяться какими-то сигналами*: Einstein, “On the Electrodynamics of Moving Bodies,” 126–27.
- C. 109 *альтернативу ньютоновскому правилу*: Einstein and Penrose, *Einstein’s Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*, 142.
- C. 110 *мириться с нелокальностью*: McCormmach, “Einstein, Lorentz, and the Electron Theory,” 67.
- C. 110 *указал на некоторые следствия*: Minkowski, “Raum Und Zeit.”
- C. 110 *это объективный факт*: Nozick, *Invariances: The Structure of the Objective World*, 76–77.

- C. 112 *свойством пространства*: Carroll, *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*, 2, 48–50, 178–79.
- C. 112 *теория не запрещает*: Liberati, Sonego, and Visser, “Faster-Than-C Signals, Special Relativity, and Causality”; Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics*; Hesse, *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*.
- C. 113 *где кончается радуга*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 70.
- C. 113 *десятикратную разницу*: Lincoln, “Proving Special Relativity: Episode 2.”
- C. 113 *чтобы достичь скорости света*: Einstein, “On the Electrodynamics of Moving Bodies,” 158.
- C. 113 *нарушению причинно-следственных связей*: Hesse, *Forces and Fields*, 236, 283–88, 305.
- C. 115 *осознал это еще в 1907 г.*: Einstein, “Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie,” 381–82; Schwartz, “Einstein’s Comprehensive 1907 Essay on Relativity, Part 1,” 516; Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 235–36.
- C. 115 *телеграфировать в прошлое*: Langevin, “L’évolution de l’espace et du temps,” 44; Miller, *Albert Einstein’s Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)*, 223.
- C. 115 *создавая причинно-следственную петлю*: Mitchell, “The Clock That Went Backward.”
- C. 115 *предотвращение своего собственного рождения*: Schachner, “Ancestral Voices.”
- C. 115 *Ну а в реальной жизни*: Gödel, “A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy,” 560–61; Black, “Why Cannot an Effect Precede Its Cause?,” 54–55.
- C. 115 *был знаком с анархией*: Borisov and Kudryashov, “Paul Painlevé and His Contribution to Science.”
- C. 116 *с бесконечной скоростью*: Saari and Xia, “Off to Infinity in Finite Time.”
- C. 116 *космическому захватчику*: Earman, *A Primer on Determinism*, 46–47.
- C. 116 *позволяют импульсам распространяться*: там же, 40–42.
- C. 116 *вашу корзину для белья*: там же, 55–61.
- C. 116 *потенциально может оказаться мусором*: Гиддингс, интервью автора, 11 октября 2010, Санта-Барбара, штат Калифорния.
- C. 117 *Даже Нильс Бор*: Bohr, “Space and Time in Nuclear Physics,” 212, 218.
- C. 117 *Каждая точка поля*: Einstein, “Quanten-Mechanik Und Wirklichkeit,” 321–22; Howard, “Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments,” 232–40.
- C. 117 *признавал ее предположением*: Einstein, “Autobiographical Notes,” 13; Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, chap. 6.

- C. 118 *зачата во грехе*: Артур Файн, имейл автору, 24 июня 2011.
- C. 118 *Они признавали, что не знали*: Stachel, *Einstein from 'B' to 'Z'*, 378–79.
- C. 118 *отцом теории*: Stone, “Einstein and the Quantum: The Quest of the Valiant Swabian,” 281–82.
- C. 118 *фактически был единственным*: Stuewer, “The Experimental Challenge of Light Quanta,” 146–47.
- C. 118 *Эйнштейн уладил этот вопрос*: Einstein, “On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light”; Einstein, “Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung.”
- C. 119 *нелокальность кажется неизбежной*: Hesse, *Forces and Fields*, 265.
- C. 119 *атомы поглощают энергию волны дискретными порциями*: Stuewer, “The Experimental Challenge of Light Quanta,” 147–48.
- C. 119 *очень рано увидел*: Vaccigaluppi and Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, 178–81.
- C. 119 *«парадоксом пузыря»*: Cramer, “The Quantum Handshake.”
- C. 120 *изначальное интуитивное ощущение Эйнштейна*: McCormmach, “Einstein, Lorentz, and the Electron Theory,” 56–57.
- C. 120 *Частицы света, существующие независимо*: Howard, “‘Nicht Sein Kann Was Nicht Sein Darf,’ or the Prehistory of EPR, 1909–1935: Einstein’s Early Worries About the Quantum Mechanics of Composite Systems,” 69–78.
- C. 120 *«направляющее поле»*: там же, 72–73, 75–76.
- C. 120 *Бор тоже рассматривал*: Howard, “Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue,” 67–69.
- C. 121 *привычного пространственно-временного описания*: Bohr, *The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924–1926)*, vol. 5, 79.
- C. 121 *с целью отдыха*: Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 157.
- C. 122 *своего рода «барашки»*: Schrödinger, “On Einstein’s Gas Theory.”
- C. 122 *любопытную математическую абстракцию*: Schrödinger, “Quantisation as a Problem of Proper Values (Part IV),” 120.
- C. 123 *признавал, что не знал*: Tollaksen et al., “Quantum Interference Experiments, Modular Variables and Weak Measurements,” 5нб.
- C. 123 *удаленных областях пространства*: Aharonov and Rohrlich, *Quantum Paradoxes*, 61–75.
- C. 124 *двух сторонах в споре*: Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*, 143, 187–89.
- C. 124 *атом испускает фотон*: Einstein, “On the Quantum Theory of Radiation,” 76.
- C. 124 *чудом в буквальном смысле*: Earman, “Locality, Nonlocality, and Action at a Distance: A Skeptical Review of Some Philosophical Dogmas,” 475.
- C. 125 *культурное настроение восходит*: Forman, “Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918–1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment,”

- 111–12; Brush, “The Chimerical Cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective,” 410–18.
- C. 125 *Бог не играет в кости*: Born and Einstein, *The Born-Einstein Letters 1916–1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*, x, 88, 146.
- C. 125 *не возражал против случайности*: von Plato, *Creating Modern Probability: Its Mathematics, Physics and Philosophy in Historical Perspective*, 114–23.
- C. 125 *оставить поиски*: Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, xvii, 7–10.
- C. 125 *наполовину постижимой и наполовину*: Stachel, *Einstein from ‘B’ to ‘Z,’* 410–14.
- C. 125 *повлечет за собой нелокальность*: Howard, “*The Shaky Game*,” 130–35; Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, 143.
- C. 126 *над этой дилеммой*: Einstein, “Autobiographical Notes,” 682; Redhead, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, 76.
- C. 126 *бельгийским промышленным магнатом*: Vaccigaluppi and Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 3, 18–19.
- C. 126 *28 изысканно одетых мужчин и одна элегантная дама*: там же, 257.
- C. 126 *должно управлять коллапсом*: там же, 440–42.
- C. 127 *подразумевает, по моему мнению, противоречие*: там же, 441.
- C. 127 *называют «реализмом»*: Laudisa, “Non-Local Realistic Theories and the Scope of the Bell Theorem.”
- C. 127 *«скрытым параметром»*: Bohm, “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‘Hidden’ Variables, I,” 168.
- C. 127 *Эйнштейн пытался*: Belousek, “Einstein’s 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance.”
- C. 127 *де Бройль представил*: Vaccigaluppi and Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 67–76, 341–71.
- C. 127 *мистер де Бройль правильно делает*: там же, 441.
- C. 127 *Бор безусловно принял*: Howard, “Revisiting the Einstein-Bohr Dialogue,” 59; Landsman, “When Champions Meet: Rethinking the Bohr-Einstein Debate,” 233–34.
- C. 127 *некоторые математические методы*: Vaccigaluppi and Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 442.
- C. 128 *принципа неопределенности Гейзенберга*: Bohm, “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics,” 213–18; Howard, “Nicht Sein Kann Was Nicht Sein Darf,” 93–97.
- C. 128 *как черт из табакерки*: Bohm, *Foundations of Quantum Physics I (1926–1932)*, 38.
- C. 129 *очень сильно противоречит*: Einstein, Letter to Paul Epstein (EA 10–583); Howard, “Nicht Sein Kann Was Nicht Sein Darf,” 102.
- C. 129 *либо нелокальна, либо неполна*: Howard, “Nicht Sein Kann Was Nicht Sein Darf,” 98–105.

- C. 130 *дополнительная функциональность вторична*: Fine, *The Shaky Game*, 37–38; Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 139–40.
- C. 130 *То, что действительно существует*: Born and Einstein, *The Born-Einstein Letters*, 162–63.
- C. 130 *Мой предшественник*: Musser, “Forces of the World, Unite!”
- C. 130 *полночи не спал*: Bohr, “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics,” 224–28; Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 347–49.
- C. 130 *больше не спорил*: Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 405–409.
- C. 131 *трих писем в день*: Gilder, *The Age of Entanglement*, chap. 16.
- C. 131 *было изобретено название*: Schrödinger, “Discussion of Probability Relations Between Separated Systems.”
- C. 131 *известный жутковатый сценарий*: Trimmer, “The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger’s ‘Cat Paradox’ Paper.”
- C. 131 *обвинил своих соавторов*: Einstein, Letter to Erwin Schrödinger (EA 22–47).
- C. 131 *попытался опровергнуть*: Howard, “Einstein on Locality and Separability.”
- C. 131 *свою собственную версию*: Einstein, “Physics and Reality,” 376.
- C. 131 *выпустил опровержение*: Fine, *The Shaky Game*, 191–92; Beller, *Quantum Dialogue*, 153, 277.
- C. 132 *Бор выиграл спор*: Milburn, *The Feynman Processor: Quantum Entanglement and the Computing Revolution*, 47.
- C. 132 *интерпретация остается доминирующей*: Schlosshauer, Kofler, and Zeilinger, “A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics.”
- C. 132 *был одиночкой*: Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 273–75.
- C. 132 *Бор был авторитетом*: Beller, *Quantum Dialogue*, 177, 244, 270.
- C. 132 *Он и его последователи*: там же, 10–11.
- C. 132 *преуменьшался вклад Эйнштейна*: Klein, “Einstein and the Wave-Particle Duality,” 3–4.
- C. 132 *«недопонимание»*: Rosenfeld, “Niels Bohr in the Thirties: Consolidation and Extension of the Conception of Complementarity,” 128.
- C. 132 *умным и подающим надежды*: Bohr, *Foundations of Quantum Physics II (1933–1958)*, 251.
- C. 133 *правдоподобные альтернативные сценарию*: Cushing, *Quantum Mechanics*, chap. 10.

4. Великий спор

- C. 135 *чертовски крупный спор*: Модлин, интервью автора.
- C. 136 *интеллектуальной «трясиной»*: имя не сообщается, интервью автора, 15 ноября 2010, Утрехт, Нидерланды.
- C. 136 *высокого мнения о себе*: имя не сообщается, интервью автора, 7 декабря 2011, Сингапур.
- C. 136 *прет как танк*: имя не сообщается, интервью автора, 7 июня 2011, Нью-Йорк.

- C. 136 *ужасающе неправ*: имя не сообщается, имейл автору, 15 мая 2008.
- C. 136 *война всех против всех*: Файн, имейл автору, 24 июня 2011.
- C. 137 *выражения эмоциональных различий*: там же.
- C. 138 *Исходная статья Эйнштейна*: Einstein, Podolsky, and Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?"
- C. 138 *последующую работу Джона Белла*: Bell, "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox."
- C. 138 *«задушена формализмом»*: Einstein, Letter to Erwin Schrödinger (EA 22–47); Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, 35.
- C. 138 *два логических шага*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics*, 144; Laudisa, "Non-Local Realistic Theories and the Scope of the Bell Theorem," 1122.
- C. 139 *остановить печатные машины*: Belousek, "Einstein's 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance."
- C. 140 *сделали видеоролик*: Musser, "George and John's Excellent Adventures in Quantum Entanglement."
- C. 140 *приблизительно в 85% случаев*: Gisin, "Can Relativity Be Considered Complete? From Newtonian Nonlocality to Quantum Nonlocality and Beyond."
- C. 140 *любого числа частиц*: Greenberger et al., "Bell's Theorem Without Inequalities."
- C. 141 *Бом заново придумал*: Bohm, "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. II," 186–87.
- C. 142 *не только создавать причудливые последовательности*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 119.
- C. 142 *это становилось осуществимым*: Valentini, "Beyond the Quantum."
- C. 142 *открыто заявляет об этом*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 120–21.
- C. 142 *наиболее упрямы*: Mitroff, "Norms and Counter-Norms in a Select Group of the Apollo Moon Scientists: A Case Study of the Ambivalence of Scientists."
- C. 143 *якобы неопровержимые аргументы*: Bauer, *Scientific Literacy and the Myth of the Scientific Method*, 73–78.
- C. 143 *были согласованы друг с другом*: Griffiths, "Quantum Locality"; Unruh, "Minkowski Space-Time and Quantum Mechanics"; Weatherall, "The Scope and Generality of Bell's Theorem."
- C. 143 *не можете сделать никаких выводов*: Smerlak and Rovelli, "Relational EPR."
- C. 144 *физик Ник Герберт*: Kaiser, *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, chap. 9.
- C. 145 *предполагаемая связь*: de Muynck, "Can We Escape from Bell's Conclusion That Quantum Mechanics Describes a Non-Local Reality?" 316–17.

- C. 145 *не можете послать сигнал*: Гиддингс, интервью автора, 11 октября 2010.
- C. 145 *в стандартной квантовой механике*: Модлин, имейл автору, 18 октября 2012.
- C. 147 *называется «супердетерминизмом»*: Davies and Brown, *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*, 47.
- C. 147 *выбор может быть абсолютно свободным*: Ismael, “Decision and the Open Future”; List, “Free Will, Determinism, and the Possibility of Doing Otherwise.”
- C. 147 *спорят на эту тему*: Grim, “Free Will in Context: A Contemporary Philosophical Perspective.”
- C. 147 *просто предопределено заранее*: Price, *Time’s Arrow and Archimedes’ Point: New Directions for the Physics of Time*, 234–40; Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 100–104, 154.
- C. 148 *безумно звучащие идеи*: ’t Hooft, “Discreteness and Determinism in Superstrings,” 14, 21–22.
- C. 148 *невозможно сформулировать*: Герард ’т Хоофт, имейл автору, 31 декабря 2009.
- C. 148 *похожи на тайный сговор*: ’t Hooft, “The Future of Quantum Mechanics.”
- C. 148 *такого небольшого ограничения*: Barrett and Gisin, “How Much Measurement Independence Is Needed to Demonstrate Nonlocality?”; Hall, “Relaxed Bell Inequalities and Kochen-Specker Theorems.”
- C. 149 *Ограничения обычны*: Файн, имейл автору, 24 июня 2011.
- C. 149 *должны произойти в будущем*: Price, *Time’s Arrow and Archimedes’ Point*, chaps. 5, 8.
- C. 149 *частицы обладают даром предвидения*: Wheeler and Feynman, “Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action.”
- C. 149 *Обратная причинно-следственная связь*: Модлин, имейл автору, 31 марта 2011.
- C. 149 *обычно мы не видим*: Price, *Time’s Arrow and Archimedes’ Point*, chap. 7.
- C. 150 *чтобы открыть портал в прошлое*: там же, 128–29, 173–74, 243–44, 247–48, 250.
- C. 152 *видит, что монета упала орлом*: Wallace, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*, 36–38.
- C. 152 *почти точные копии вас*: DeWitt, “Quantum Mechanics and Reality.”
- C. 153 *космологических сущностей*: Gell-Mann and Hartle, “Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology,” 340; Smerlak and Rovelli, “Relational EPR”; Griffiths, “EPR, Bell, and Quantum Locality”; Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 216–20.
- C. 153 *Нет никакой потребности в нелокальных воздействиях*: Vaccigaluppi, “Remarks on Space-Time and Locality in Everett’s Interpretation.”
- C. 154 *часами смотрел*: Цайлингер, интервью автора.
- C. 154 *фундаментальных вопросах*: там же.
- C. 154 *Чего-то не хватало*: там же.

- C. 154 *она ему скорее по душе*: Zeilinger, “On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics.”
- C. 155 *не как сир-феминистка*: Kahneman, *Thinking, Fast and Slow*, 157–59.
- C. 155 *придете к противоречию*: Lapkiewicz et al., “Experimental Non-Classicality of an Indivisible Quantum System.”
- C. 156 *главная помеха*: Zeilinger, “Testing Concepts of Reality with Entangled Photons in the Laboratory and Outside.”
- C. 156 *по-другому смотрю на эти вещи*: Maudlin, “Special Relativity and Quantum Entanglement: How Compatible Are They?”
- C. 156 *Он его вывел: там же.*
- C. 156 *повторно вывел свою теорему*: Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 150, 157n10.
- C. 157 *они отрицают любую потребность*: Zeilinger, “On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics.”
- C. 158 *вам не нужна нелокальность*: Zeilinger, “Testing Concepts of Reality with Entangled Photons.”
- C. 158 *добратся до его сути*: Albert, “Physics and Narrative.”
- C. 158 *Потраченные вами средства*: David Z. Albert, interview by author, March 16, 2011, Dresden, Germany.
- C. 159 *очень выдающихся людей*: Jon P. Jarrett, e-mail to author, July 11, 2011.
- C. 159 *Ежегодный доход двадцать фунтов*: Dickens, *The Personal History of David Copperfield*, 231.
- C. 160 *казалось, что душно*: Zeilinger, interview by author.
- C. 160 *комбинировать с обычными световыми или радиосигналами*: Brassard, “Quantum Communication Complexity (A Survey).”
- C. 161 *нелокальной связи*: Mattle et al., “Dense Coding in Experimental Quantum Communication.”
- C. 161 *нарушить запутанность*: Jennewein et al., “Quantum Cryptography with Entangled Photons.”
- C. 161 *«безопасное» или «слепое» вычисление*: Barz et al., “Demonstration of Blind Quantum Computing.”
- C. 161 *в зашифрованной форме*: He, “Simple Quantum Protocols for the Millionaire Problem with a Semi-Honest Third Party.”
- C. 161 *не верим в те факты и теории*: James, *The Will to Believe and Other Essays in Pop and Philosophy*, 10.
- C. 162 *но не изумляются*: Николая Жизан, интервью автора, 8 ноября 2010, Женева.
- C. 163 *«руководить» своим партнером*: Schrödinger, “Discussion of Probability Relations Between Separated Systems”; Wiseman, Jones, and Doherty, “Steering, Entanglement, Nonlocality, and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox.”
- C. 163 *способы «приглушить»*: Popescu, “Bell’s Inequalities and Density Matrices: Revealing ‘Hidden’ Nonlocality.”

- C. 163 *избегать слежки со стороны властей*: Branciard et al., “One-Sided Device-Independent Quantum Key Distribution: Security, Feasibility, and the Connection with Steering.”
- C. 163 *описали «суперквантовые» монеты*: Rohrlich and Popescu, “Nonlocality as an Axiom for Quantum Theory.”
- C. 163 *подходящего всем времени*: Brassard et al., “A Limit on Nonlocality in Any World in Which Communication Complexity Is Not Trivial.”
- C. 164 *жидкостью, заполняющей все пространство*: Bohm and Vigier, “Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations.”
- C. 164 *высокой, но все же конечной скоростью*: Bancal et al., “Quantum Non-Locality Based on Finite-Speed Causal Influences Leads to Superluminal Signalling.”
- C. 165 *уже находится в месте своего назначения*: Van Fraassen, *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, 351.
- C. 165 *сигнализирует о том*: Bohm and Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, 42, 350, 374–78.
- C. 166 *я сам постоянно размышляю*: ’т Хоофт, интервью автора, 4 июня 2011, Нью-Йорк.
- C. 167 *в сущности, являются нелокальными*: Price, *Time’s Arrow and Archimedes’ Point*, 223–24.
- C. 167 *видом нелокальности*: Allori et al., “Many Worlds and Schrödinger’s First Quantum Theory,” 13–15; Wallace, *The Emergent Multiverse*, 303–10.
- C. 167 *быть отдельным человеком*: Howard, “A Peek Behind the Veil of Maya.”
- C. 168 *делят с вами все ваши воспоминания*: Tegmark, “Parallel Universes.”
- C. 168 *Какое из них — вы?*: Wallace, *The Emergent Multiverse*, 275–76.
- C. 168 *никакого объяснения не может быть*: Van Fraassen, *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, 372–74.
- C. 168 *нет никакой причины*: Fine, “Do Correlations Need to Be Explained?”
- C. 168 *веры в детерминизм*: Файн, имейл автору, 27 апреля 2011.
- C. 169 *У нас есть случайность*: Жизан, интервью автора.
- C. 169 *отсутствие любого из аспектов*: Einstein, “Autobiographical Notes,” 85.
- C. 170 *в реальности они почти всегда сопутствуют*: Jones and Clifton, “Against Experimental Metaphysics”; Cushing, “Locality/Separability: Is This Necessarily a Useful Distinction?” 111; Spekkens, “The Paradigm of Kinematics and Dynamics Must Yield to Causal Structure,” 4.
- C. 170 *теряет смысл*: Shimony, “Aspects of Nonlocality in Quantum Mechanics,” 119; Ismael, “What Entanglement Might Be Telling Us,” 14.
- C. 171 *не теряет своей силы*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, 22–24; Lange, *An Introduction to the Philosophy of Physics: Locality, Fields, Energy, and Mass*, 281.

- C. 171 *органическое следствие понимания*: Дженанн Исмаэль, интервью автора, 9 апреля 2014.
- C. 171 *похожее на их союз*: Minkowski, "Raum Und Zeit."
- C. 171 *нужно обращаться осторожно*: Healey, "Holism and Nonseparability."
- C. 172 *специалисты, практикующие альтернативную медицину*: Maudlin, "Part and Whole in Quantum Mechanics," 55.
- C. 172 *за пределами пространства-времени*: Жизан, интервью автора.
- C. 172 *фундаментальную ошибку*: Maudlin, "Part and Whole," 55–56.
- C. 173 *у пространства-времени нет будущего*: Жизан, интервью автора.

5. Нелокальность и объединение физики

- C. 175 *группы альпинистов*: Гиддингс, имейл автору, 7 марта 2014.
- C. 176 *сообщество было еще не готово*: Гиддингс, имейл автору, 4 июля 2013.
- C. 176 *неявно предполагала, что силы перепрыгивают*: Strocchi, "Relativistic Quantum Mechanics and Field Theory," 508.
- C. 177 *эту удивительную теорию*: Hertz, *Miscellaneous Papers*, 318.
- C. 177 *большой клубок*: Ashtekar and Rovelli, "A Loop Representation for the Quantum Maxwell Field."
- C. 178 *ранее известной, как теория струн*: Duff, "The Theory Formerly Known as Strings."
- C. 178 *«AdS/CFT-соответствие»*: Horowitz and Polchinski, "Gauge/Gravity Duality."
- C. 178 *рождения и становления*: Дональд Маролф, имейл автору, 17 июня 2013.
- C. 178 *характерных для Аляски сумерках*: Гиддингс, имейл автору, 7 марта 2014.
- C. 179 *не может объяснить природу света*: Weinberg, "The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field Theory," 21.
- C. 179 *частицей или волной*: Schweber, *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, xxvi, 1–2, 37.
- C. 179 *возникновения и аннигиляции*: Teller, *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, 82.
- C. 179 *огромной массы фотонов*: там же, 112–13.
- C. 180 *не крупинки материи*: там же, 69–81.
- C. 180 *взаимоувязывание этого с теорией*: Schweber, *QED and the Men Who Made It*, 53.
- C. 180 *Как подчеркивал Паули*: Blum, "From the Necessary to the Possible: The Genesis of the Spin-Statistics Theorem," 553–54.
- C. 181 *разделено на две части*: Pauli, "The Connection Between Spin and Statistics," 721; Teller, *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, 83–84.
- C. 181 *альтернативы также делят пространство*: Wright, "Quantum Field Theory: Motivating the Axiom of Microcausality."

- C. 182 *глубоко сомневались*: Weinberg, “The Search for Unity,” 24–26; Schweber, *QED and the Men Who Made It*, 83–85.
- C. 182 *дважды прослушал курс*: Джозеф Полчински, имейл автору, 8 июля 2013.
- C. 182 *отпугивает большинство из них*: Teller, *Interpretive Introduction*, vii.
- C. 183 *интерпретировать смысл математики*: Ханс Халворсон, интервью автора, 5 июля 2013, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 184 *одновременно в двух местах*: Teller, *Interpretive Introduction*, 86–87, 109; Halvorson and Clifton, “No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories?”; Duncan, *The Conceptual Framework of Quantum Field Theory*, 160–63.
- C. 184 *покончить с нелокальностью, а не подкреплять ее*: Halvorson, “Locality, Localization, and the Particle Concept: Topics in the Foundations of Quantum Field Theory,” 169–70.
- C. 184 *приводит к нелокальности*: Халворсон, интервью автора.
- C. 184 *только если теория относительности не применяется*: Newton and Wigner, “Localized States for Elementary Systems”; Teller, *Interpretive Introduction*, 56, 85–89.
- C. 184 *увидеть, как она неожиданно перепрыгивает*: Ruijsenaars, “On Newton-Wigner Localization and Superluminal Propagation Speeds”; Hegerfeldt, “Violation of Causality in Relativistic Quantum Theory?”; Malament, “In Defense of Dogma: Why There Cannot Be a Relativistic Quantum Mechanics of (Localizable) Particles.”
- C. 184 *давать разные ответы*: Halvorson, “Locality, Localization, and the Particle Concept,” 64; Kuhlmann, “What Is Real?”
- C. 185 *Нет ничего, что действительно*: Халворсон, интервью автора.
- C. 185 *гитарной струны*: Auyang, *How Is Quantum Field Theory Possible?*, 51–53, 157–60.
- C. 185 *волны настолько перепутаны*: Fraser, “The Fate of ‘Particles’ in Quantum Field Theories with Interactions.”
- C. 186 *разбивки крупной проблемы*: Teller, *Interpretive Introduction*, 139–42.
- C. 186 *ничего не могут сказать о реальности*: Халворсон, интервью автора.
- C. 187 *конвейерных лент и вращающихся барабанов*: Morus, *When Physics Became King*, 81–84.
- C. 187 *не может быть скоплением пикселей*: Teller, *Interpretive Introduction*, 80–81, 98–99.
- C. 187 *исключают из картины пиксели*: Halvorson, “Algebraic Quantum Field Theory,” 778–79; Baker, “Against Field Interpretations of Quantum Field Theory.”
- C. 187 *похоже становится своей противоположностью*: Халворсон, интервью автора.
- C. 188 *не передадут информацию*: Peskin and Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, 27–29.
- C. 188 *разновидностью призрачной синхронности*: Wald, “Correlations and Causality in Quantum Field Theory,” 300; Reznik, “Distillation

- of Vacuum Entanglement to EPR Pairs”; Franson, “Generation of Entanglement Outside of the Light Cone.”
- C. 188 *не частицы, а точки поля*: Summers and Werner, “The Vacuum Violates Bell’s Inequalities”; Clifton et al., “Superentangled States.”
- C. 188 *ограниченности импульса*: Халворсон, интервью автора.
- C. 188 *«суперзапутанностью»*: Clifton et al., “Superentangled States.”
- C. 188 *точки, лежащие за пределами*: Wald, “Correlations and Causality in Quantum Field Theory,” 301.
- C. 189 *частицами можно разорвать*: Clifton and Halvorson, “Entanglement and Open Systems in Algebraic Quantum Field Theory.”
- C. 189 *остаточную случайную вибрацию*: Summers and Werner, “The Vacuum Violates Bell’s Inequalities”; Redhead, “More Ado About Nothing.”
- C. 189 *Забудьте об эксперименте*: Халворсон, интервью автора.
- C. 189 *несмотря на различные предложения*: Retzker, Cirac, and Reznik, “Detecting Vacuum Entanglement in a Linear Ion Trap”; Sabin et al., “Dynamics of Entanglement via Propagating Micro wave Photons.”
- C. 189 *незначительном смещении*: Summers and Werner, “The Vacuum Violates Bell’s Inequalities,” 258–59; Halvorson, “Locality, Localization, and the Particle Concept,” 18.
- C. 190 *нелокальность на всех расстояниях*: Халворсон, интервью автора.
- C. 190 *поля могут стать*: Reznik, “Distillation of Vacuum Entanglement to EPR Pairs.”
- C. 190 *запутанными друг с другом*: Haroche and Raimond, *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons*, 285.
- C. 190 *индийского фильма*: Wen, “Topological Order: From Long-Range Entangled Quantum Matter to a Unified Origin of Light and Electrons.”
- C. 190 *когда-то казались волшебными*: Sachdev, “Strange and Stringy.”
- C. 190 *Непрофессионалам она нравилась*: Аркани-Хамед, интервью автора, 24 сентября 2013, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 190 *взаимной запутанности*: Аркани-Хамед, интервью автора, 29 марта 2012, Пасадена, штат Калифорния.
- C. 192 *Фарадей же преспокойно проводил электрические эксперименты*: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, vol. 1, 83–84, 364–66; Healey, *Gauging What’s Real: The Conceptual Foundations of Contemporary Gauge Theories*, 4, 155–57.
- C. 192 *зажигал свечи, пользовался электрометрами*: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, vol. 1, 366.
- C. 193 *математических сложностей*: Hatfield, *Quantum Field Theory of Point Particles and Strings*, 77–81.
- C. 193 *полная фикция*: Arkani-Hamed, “Space-Time, Quantum Mechanics and Scattering Amplitudes.”
- C. 193 *первый кивок среди большого множества*: Аркани-Хамед, интервью автора, 24 сентября 2013.

- C. 193 *поправочное слагаемое*: Belot, "Understanding Electromagnetism," 541–42; Healey, *Gauging What's Real*, 25–26, 49.
- C. 193 *определять значение*: Bork, "Maxwell and the Vector Potential."
- C. 193 *возмущения потенциала*: Jackson, *Classical Electrodynamics*, 222–23.
- C. 194 *«покончить» с ней*: Hunt, *The Maxwellians*, 115–18, 165–66.
- C. 195 *в соответствии с профессиональным жаргоном*: Castellani, "Dirac on Gauges and Constraints."
- C. 195 *Из-за связи*: Jackson, *Classical Electrodynamics*, 271.
- C. 195 *связь определяется*: Strocchi, "Gauss' Law in Local Quantum Field Theory," 229–31; Ashtekar and Rovelli, "A Loop Representation for the Quantum Maxwell Field," 1149.
- C. 195 *области поля независимы*: Earman, "Locality, Nonlocality, and Action at a Distance: A Skeptical Review of Some Philosophical Dogmas," 457, 458.
- C. 196 *электроны, а не зажженные свечи*: Aharonov and Bohm, "Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory."
- C. 196 *технически сложным*: Matteucci and Pozzi, "New Diffraction Experiment on the Electrostatic Aharonov-Bohm Effect."
- C. 196 *аналогичное тестирование магнетизма*: там же; Chambers, "Shift of an Electron Interference Pattern by Enclosed Magnetic Flux."
- C. 196 *как гром среди ясного неба*: Ramsey, *Spectroscopy with Coherent Radiation: Selected Papers of Norman F. Ramsey*, 399.
- C. 196 *локальные структуры не соответствуют*: Wu and Yang, "Concept of Nonintegrable Phase Factors and Global Formulation of Gauge Fields."
- C. 197 *Физика в средней школе*: Ричард Хили, интервью автора, 22 марта 2014, Ирвайн, штат Калифорния.
- C. 197 *я чувствовал себя очень одиноко*: Healey, "New Thoughts on Yang-Mills Theories."
- C. 197 *были больше «зрителями»*: Healey, *Gauging What's Real*, 31, 53, 127; Wallace, *The Emergent Multiverse*, 294n7.
- C. 197 *отличают от парадокса*: Хили, интервью автора.
- C. 197 *разделимо почти по определению*: Howard, "Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments," 232–40.
- C. 198 *восходящей к Дираку*: Dirac, "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field"; Mandelstam, "Quantum Electrodynamics Without Potentials"; Wu and Yang, "Concept of Nonintegrable Phase Factors."
- C. 198 *Петли, а не точки*: Хили, имейл автору, 24 июля 2013.
- C. 198 *в соответствии с локальностью действия*: Lurie, "Holism and Structuralism in $U(1)$ Gauge Theory," 657–60.
- C. 199 *остаётся некоторая неопределенность*: Rozali, "Comments on Background Independence and Gauge Redundancies."
- C. 199 *Мы не теряем точки*: Хили, интервью автора.
- C. 199 *Чтобы задать вопрос*: Маролф, интервью автора, 12 октября 2010, Санта-Барбара, штат Калифорния.

- C. 200 *анализировать смещение тектонических зон*: Musser, “What Happens to Google Maps When Tectonic Plates Move?”
- C. 201 *масса Земли искривляет время*: Unruh, “Time, Gravity, and Quantum Mechanics”; Schutz, *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity*, 229–32.
- C. 201 *Искривление пространства*: Schutz, *Gravity from the Ground Up*, 234–36.
- C. 202 *мини-норами*: Howard, “Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments,” 251–52; Maldacena and Susskind, “Cool Horizons for Entangled Black Holes.”
- C. 203 *имеют непредсказуемые результаты*: Coleman, “Why There Is Nothing Rather Than Something: A Theory of the Cosmological Constant”; Markopoulou and Smolin, “Quantum Theory from Quantum Gravity.”
- C. 203 *наложиться на саму себя*: Misner and Wheeler, “Classical Physics as Geometry,” 552.
- C. 203 *Чтобы предотвратить такие парадоксы*: Horwich, *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*, 124–25; Friedman et al., “Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves.”
- C. 204 *ограничение есть форма нелокальности*: Earman, “Recent Work on Time Travel”; Arntzenius and Maudlin, “Time Travel and Modern Physics.”
- C. 204 *внешней, или абсолютной, системы*: Misner, “Feynman Quantization of General Relativity,” 499; Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 429–31; Rovelli, *Quantum Gravity*, 65–75.
- C. 204 *если честно, то Эйнштейн не понимал*: Маролф, интервью автора, 12 октября 2010.
- C. 204 *форма пространства становилась неопределенной*: Stachel, *Einstein from ‘B’ to ‘Z,’* 323–25.
- C. 205 *в измененном пространстве-времени*: Маролф, имейл автору, 26 июня 2013.
- C. 206 *к пространству-времени в целом*: Маролф, интервью автора, 26 марта 2012, Санта-Барбара, штат Калифорния.
- C. 206 *версия калибровочной инвариантности*: Kuchař, “Time and Interpretations of Quantum Gravity,” 2–3.
- C. 206 *нет отличительных особенностей*: Stachel, *Einstein from ‘B’ to ‘Z,’* 312–18.
- C. 206 *Эти количественные показатели должны быть холистическими*: Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 466–68; Rickles, *Symmetry, Structure, and Spacetime*, 129–31.
- C. 207 *Любая теория гравитации*: Marolf, “Discussion: Holography and Unitarity in Black Hole Evaporation.”
- C. 207 *определенной независимой реальностью*: Earman, *World Enough and Space-Time: Absolute Versus Rational Theories of Space and Time*, 96–108, Greene, *The Fabric of the Cosmos*, 73–75.

- C. 207 привязки координатной сетки: Rovelli, *Quantum Gravity*, 88–96.
- C. 207 непрерывно движется: Маролф, интервью автора, 26 марта 2012.
- C. 207 лишь «псевдолокальными»: Giddings, Marolf, and Hartle, “Observables in Effective Gravity.”
- C. 208 насколько сильным оно будет: Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 841.
- C. 208 даже не почувствовать этого: Gibbons, “Black Holes and Information.”
- C. 209 холистическое свойство пространства-времени: Lam, “Structural Aspects of Space-Time Singularities.”
- C. 209 иметь границу: Harrison, *Cosmology: The Science of the Universe*, 149–53.
- C. 209 забавляться с гипотетическими моделями: Randall and Sundrum, “A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension.”
- C. 210 фиксирует форму пространства: Marolf, “Holographic Thought Experiments,” 2.
- C. 210 прибито к границе: Маролф, имейл автору, 24 февраля 2014.
- C. 211 Локальность на границе: Marolf, “Unitarity and Holography in Gravitational Physics”; Marolf, “Holography Without Strings?”
- C. 211 идентичными основной массе наблюдений: Маролф, имейл автору, 17 октября 2013.
- C. 211 не может быть таким фундаментальным: Greene, *The Fabric of the Cosmos*, 477.
- C. 212 Пространство разваливается: Gorelik, “Matvei Bronstein and Quantum Gravity: 70th Anniversary of the Unsolved Problem.”
- C. 213 пределом программы уменьшения: Seiberg, “Emergent Spacetime,” 176.
- C. 214 заметил Эйнштейн в письме другу: Stachel, *Einstein from ‘B’ to ‘Z,’* 149.
- C. 214 спонтанно во всех масштабах: Wilczek, “Quantum Field Theory,” S87–S88.
- C. 214 континуум должен распасться: Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*, 19–22.
- C. 214 «решетчатый мир»: Carazza and Kragh, “Heisenberg’s Lattice World: The 1930 Theory Sketch.”
- C. 214 действуют в малых масштабах: Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, chap. 8.3.
- C. 215 никакое дополнение не поможет: Rovelli, *Quantum Gravity*, 404.
- C. 215 вот-вот распадется: Markopoulou, “Space Does Not Exist, So Time Can,” 4.
- C. 216 как шар: Witten, “Reflections on the Fate of Spacetime”; Martinec, “Evolving Notions of Geometry in String Theory.”
- C. 216 просто несправедливы: Полчински, интервью автора, 13 октября 2010, Санта-Барбара, штат Калифорния.
- C. 216 но и в макром мире: Markopoulou and Smolin, “Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States.”

- C. 216 *быть слишком маленьким*: Markopoulou, telephone interview by author.
- C. 217 *миниатюрные камертоны*: O'Connell et al., "Quantum Ground State and Single-Phonon Control of a Mechanical Resonator."
- C. 218 *на больших расстояниях*: Гиддингс, интервью автора, 14 мая 2012.
- C. 218 *тревожную тишину*: Redhead, "More Ado About Nothing."
- C. 219 *не будет думать, что поля исчезают*: Teller, *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, 110–11.
- C. 219 *унося энергию из дыры*: Jacobson, "Introduction to Quantum Fields in Curved Spacetime and the Hawking Effect," 23–27.
- C. 219 *это не вакуум*: Mathur, "The Information Paradox: A Pedagogical Introduction"; Almheiri et al., "Black Holes: Complementarity or Firewalls?"
- C. 220 *жесткое крушение*: Полчински, интервью автора.
- C. 220 *удваивается в радуге*: 't Hooft, "Dimensional Reduction in Quantum Gravity," 288.
- C. 220 *энтропия — в четыре раза*: Bekenstein, "Black Holes and Entropy."
- C. 221 *при достаточно сильном сжатии*: там же, 2339.
- C. 221 *граница и объем эквивалентны*: Rickles, "AdS/CFT Duality and the Emergence of Spacetime."
- C. 221 *это фундаментальная реальность*: Bousso, "The Holographic Principle," 859–60.
- C. 223 *совершенно непонятно, как это происходит*: Дэниел Кабат, интервью автора, 13 апреля 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.
- C. 223 *Анализ, сделанный Малдасеной*: Seiberg, "Emergent Spacetime," 171–72; Horowitz and Polchinski, "Gauge/Gravity Duality."
- C. 223 *подвозил Малдасену*: Alex Maloney, interview by author, March 23, 2012. Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA.

6. Конец пространства-времени

- C. 225 *не сказала сестре*: Исмаэль, имейл автору, 20 мая 20, 2015.
- C. 225 *один осколок стекла*: Исмаэль, интервью автора.
- C. 226 *аналогия нелокальности*: Ismael, "What Entanglement Might Be Telling Us," 1–2.
- C. 226 *в различных его частях*: там же.
- C. 227 *фундаментальный уровень*: Майкл Хеллер, интервью автора, 13 марта 2008, Нью-Йорк.
- C. 227 *первичной материи*: Guthrie, *A History of Greek Philosophy*, vol. 2, *The Presocratic Tradition from Parmenides to Democritus*, 143.
- C. 227 *переход атомов*: Leucippus and Democritus, *The Atomists, Leucippus and Democritus*, 85n78; Lucretius, *The Nature of Things*, 7–11, 25–27.
- C. 228 *из чего-то более элементарного*: Аркани-Хамед, телефонное интервью автора.
- C. 228 *рассуждаем об эмерджентном пространстве-времени*: Аркани-Хамед, телефонное интервью автора.

- C. 228 *сфера за пределами пространства*: Stump and Kretzmann, “Eternity”; Heller, “Where Physics Meets Metaphysics,” 263–64.
- C. 228 *шагом в сторону эмерджентного пространства-времени*: Slowik, “The Deep Metaphysics of Quantum Gravity: The Seventeenth Century Legacy and an Alternative Ontology Beyond Substantivalism and Relationism.”
- C. 229 *дышать в пустом пространстве*: Einstein, “Physics and Reality,” 378.
- C. 229 *выстроено из «предгеометрии»*: Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 1212.
- C. 229 *Нашего языка не хватает*: Аркани-Хамед, телефонное интервью автора.
- C. 229 *Более 2000 лет*: Arkani-Hamed, “Space-Time, Quantum Mechanics, and the Large Hadron Collider.”
- C. 230 *что произойдет в будущем*: Earman, *A Primer on Determinism*, 4–7, 30–31.
- C. 230 *хитроумных устройств Руба Голдберга*: OK Go, “This Too Shall Pass.”
- C. 230 *клея, который соединяет Вселенную*: Barbour, *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, 18.
- C. 231 *ограничены расположением в пространстве*: Lieb and Robinson, “The Finite Group Velocity of Quantum Spin Systems.”
- C. 231 *«интерактивным»*: Albert, “Elementary Quantum Metaphysics.”
- C. 231 *лев близко*: Альберт, интервью автора, 18 апреля 2011, Нью-Йорк.
- C. 232 *одну загадку на другую*: Maudlin, “Buckets of Water and Waves of Space: Why Spacetime Is Probably a Substance,” 192–94, 196.
- C. 233 *«обратной проблемой»*: Smolin, *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*, 184–86.
- C. 233 *Существование пространства-времени*: Моше Розали, телефонное интервью автора, 13 июля 2011.
- C. 233 *время не эмерджентно*: Smolin, *Time Reborn*; Maudlin, *New Foundations for Physical Geometry*.
- C. 233 *активную организующую роль*: Musser, “Could Time End?”
- C. 234 *перевернул это представление с ног на голову*: Leibniz, *Philosophical Papers and Letters: A Selection*, vol. 2, 666–74; Mehlberg, *Time, Causality, and the Quantum Theory*, vol. 1, 42–50.
- C. 234 *воссоздать карту всего мира*: Bombelli et al., “Space-Time as a Causal Set.”
- C. 235 *количества таких атомов*: Riemann, “On the Hypotheses Which Lie at the Bases of Geometry,” 37.
- C. 235 *связей должна быть высокоупорядоченной*: Dowker, “Causal Sets and the Deep Structure of Spacetime,” 454; Henson, “The Causal Set Approach to Quantum Gravity,” 405.
- C. 235 *непохоже на пространство-время*: Доукер, интервью автора.
- C. 236 *поскольку они взаимосвязаны*: Barbour, “The Nature of Time.”
- C. 236 *через взаимосвязь объектов*: Mach, *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*, 223, 224.

- C. 236 *показания одометра*: Майкл Маусер, телефонное интервью автора, 3 июня 2014.
- C. 236 *Расстояния подчиняются*: Lefschetz, *Introduction to Topology*, 28.
- C. 238 *опустить еще несколько чисел*: Einstein, *The Meaning of Relativity*, 8; Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, 6–8; Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 306–308.
- C. 238 *массированное сжатие данных*: Джулиан Барбур, интервью автора, 22 мая 2010, конференция Laws of Nature: Their Nature and Knowability, conference, Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Ontario, Canada, May 20–22, 2010.
- C. 240 *«непосредственными» расстояниями*: Nerlich, *The Shape of Space*, 18–23.
- C. 242 *помешанных на сериале «Игра престолов»*: McGoldrick, Gerson, and Petry, *Genograms: Assessment and Intervention*.
- C. 243 *Такой вид самоорганизации*: Smith and Foley, “Classical Thermodynamics and Economic General Equilibrium Theory.”
- C. 244 *взаимосвязи становятся упорядоченными*: Markopoulou, “Space Does Not Exist, So Time Can,” 7–8.
- C. 244 *Упомогачительно сложная*: Rovelli, “Forget Time.”
- C. 244 *пространстве, как о сети*: Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 1203–12; Bohm and Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, 374–78; Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 946–50; Finkelstein, “Space-Time Code.”
- C. 245 *пытаются заставить эту идею работать*: Kaplunovsky and Weinstein, “Space-Time: Arena or Illusion?”; Meschini, Lehto, and Piilonen, “Geometry, Pregeometry and Beyond.”
- C. 245 *добавить толику юмора*: Конопка, Markopoulou, and Severini, “Quantum Graphity: A Model of Emergent Locality.”
- C. 245 *от землетрясений и экосистем*: Stanley et al., “Scale Invariance and Universality: Organizing Principles in Complex Systems.”
- C. 245 *очень амбициозно и опасно*: Клаус Кифер, интервью автора, 31 августа 2011, Копенгаген.
- C. 246 *просто протянете руку*: Markopoulou and Kuhn, “Why Is the Universe So Breathtaking?”
- C. 247 *прохождение сигнала*: Hama and Markopoulou, “Background-Independent Condensed Matter Models for Quantum Gravity.”
- C. 248 *Вселенную нужно охлаждать*: Маркопоулоу, интервью автора.
- C. 248 *Первоначальные крупинки*: Hama and Markopoulou, “Background-Independent Condensed Matter Models,” 13–16.
- C. 248 *«каузальная динамическая триангуляция»*: Loll, Ambjørn, and Jurkiewicz, “The Universe from Scratch.”
- C. 248 *эксперимент с конфетами*: Surowiecki, *The Wisdom of Crowds: Why the Many Are Smarter Than the Few and How Collective Wisdom Shapes Business, Economies, Societies, and Nations*, 5.

- C. 249 *ошибки отдельных людей взаимно компенсируются*: там же, 10–11, 27–30.
- C. 249 *результатом странных процессов*: Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, 53–54.
- C. 250 «*матричные модели*»: Banks et al., “M Theory as a Matrix Model: A Conjecture.”
- C. 250 *кучи деталей из детского конструктора*: Леонард Сасскинд, интервью автора, 18 февраля 2011, Пало-Альто, штат Калифорния.
- C. 250 *концы струн*: Musser, *The Complete Idiot’s Guide to String Theory*, 155.
- C. 252 *самовзаимодействия их компонентов*: Banks, “The State of Matrix Theory,” 342–43; Martinec, “Evolving Notions of Geometry in String Theory,” 167–68.
- C. 252 *просто аннулирование*: Сасскинд, интервью автора.
- C. 253 *не то поведение, которое мы ожидаем*: Эмиль Мартинек, имейл автору, 10 мая 2014.
- C. 256 *эффектно рассказывает об этом*: Sundrum, “From Fixed Points to the Fifth Dimension.”
- C. 256 *изобразить Мемориал*: Раман Сандрам, интервью автора, 3 октября 2014.
- C. 257 *Китайский гонг*: Fletcher, “Nonlinear Dynamics and Chaos in Musical Instruments.”
- C. 257 *распространения через масштаб*: Balasubramanian et al., “Holographic Probes of Anti — de Sitter Spacetimes”; Heemskerk et al., “Holography from Conformal Field Theory.”
- C. 258 *обеспечивает связь пространства-времени*: Марк Ван Раамсдонк, интервью автора, 30 сентября 2010, Ванкувер.
- C. 258 *создает пространство*: Nishioka, Ryu, and Takayanagi, “Holographic Entanglement Entropy: An Overview”; Van Raamsdonk, “Building Up Spacetime with Quantum Entanglement”; Swingle, “Constructing Holographic Spacetimes Using Entanglement Renormalization.”
- C. 259 «*нарушенной локальностью*»: Markopoulou and Smolin, “Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States.”
- C. 259 *термин «длинные связи»*: Брайан Свингл, имейл автору, 22 августа 2014.
- C. 259 *объяснить природу частиц*: Einstein and Rosen, “The Particle Problem in the General Theory of Relativity.”
- C. 259 *объединять запутанные частицы*: Jensen and Karch, “Holographic Dual of an Einstein-Podolsky-Rosen Pair Has a Wormhole”; Baez and Vicary, “Wormholes and Entanglement.”
- C. 260 *близости через кротовую нору*: Хуан Малдасена, интервью автора, 17 сентября 2013, Принстон, штат Нью-Джерси.
- C. 260 *кажутся перебором*: Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics*, 238.
- C. 260 *закрывает кротовую нору*: Maldacena and Susskind, “Cool Horizons for Entangled Black Holes,” 782.

- C. 260 *огромную трудность*: Свингл, интервью автора, 21 августа 2014.
- C. 260 *но лишенное смысла*: Markopoulou and Smolin, “Disordered Locality,” 3822; Valentini, “Beyond the Quantum,” 36.
- C. 261 *поглощается глобальностью*: Хеллер, интервью автора.
- C. 261 *философы и социологи*: Pettit, *The Common Mind: An Essay on Psychology, Society, and Politics*, 166–73.
- C. 261 *воспринимает то, что происходит*: Heller and Sasin, “Einstein-Podolski-Rosen Experiment from Noncommutative Quantum Gravity”; Heller and Sasin, “Nonlocal Phenomena from Noncommutative Pre-Planckian Regime.”
- C. 262 *привести космос в движение*: Misner, Thorne, and Wheeler, *Gravitation*, 1196–97.
- C. 262 *постепенно самоформируется*: Craps, Sethi, and Verlinde, “A Matrix Big Bang”; Martinec, Robbins, and Sethi, “Toward the End of Time.”
- C. 262 *древние мифы о создании*: Casey, *The Fate of Place: A Philosophical History*, 9–16.
- C. 262 *«ультралокальностью»*: Carlip, “Spontaneous Dimensional Reduction?”; Mielczarek, “Asymptotic Silence in Loop Quantum Cosmology.”
- C. 263 *распределяется равномерно*: Hama and Markopoulou, “Background-Independent Condensed Matter Models,” 12; McFadden and Skenderis, “Observational Signatures of Holographic Models of Inflation.”
- C. 263 *полностью связанный граф*: Маркопоулоу, имейл автору.
- C. 263 *Фазовый переход*: Easther et al., “Constraining Holographic Inflation with WMAP”; Dreyer, “The World Is Discrete.”
- C. 264 *текущую субстанцию*: Witten, “Anti — de Sitter Space, Thermal Phase Transition, and Confinement in Gauge Theories.”
- C. 264 *Понятие традиционной геометрии*: Мартинек, имейл автору, 23 апреля 2010.
- C. 264 *фактически бесконечномерная*: Sekino and Susskind, “Fast Scramblers.”
- C. 264 *найти выход*: Hama and Markopoulou, “Background-Independent Condensed Matter Models for Quantum Gravity,” 16–17.
- C. 264 *действует как ловушка*: Маркопоулоу, интервью автора.
- C. 264 *черная дыра рассеивается*: Banks et al., “Schwarzschild Black Holes from Matrix Theory,” 229; Horowitz, Lawrence, and Silverstein, “Insightful D- Branes,” 18–20.
- C. 265 *в этом огромном пространстве состояний*: Мартинек, имейл автору, 12 августа 2014.
- C. 266 *пожирание пространства-времени*: Розали, телефонное интервью автора.
- C. 266 *становится слишком беспорядочной*: Balasubramanian, “What We Don’t Know About Time,” 109–111.
- C. 266 *в четырех измерениях*: Sachdev, “Strange and Stringy.”

- C. 267 *внутренней простотой*: Nastase, “The RHC Fireball as a Dual Black Hole”; Horowitz and Polchinski, “Gauge/Gravity Duality,” 181.
- C. 267 *предопределена правилами*: Nerlich, *The Shape of Space*, chap. 1; Meschini, Lehto, and Piilonen, “Geometry, Pregeometry and Beyond.”
- C. 268 *Каковы правила?*: Мартинек, интервью автора, 18 июня 2014, Чикаго.
- C. 268 *Пространство же — полная фикция*: Carroll, “Setting Time Aright.”
- C. 268 *эмерджентности без обязательного существования времени*: Heller and Sasin, “Emergence of Time”; Balasubramanian, “What We Don’t Know About Time”; Aoki et al., “Space-Time Structures from IIB Matrix Model.”
- C. 268 *эмерджентное измерение темпорально*: Strominger, “Inflation and the dS/CFT Correspondence.”

Заключение: амплитуэдр

- C. 269 *неоднозначную поездку в Копенгаген*: Powers, *Heisenberg’s War: The Secret History of the German Bomb*, 120–28.
- C. 269 *американский шпион*: там же, 294–97.
- C. 269 *Берг оставил его в живых*: там же, 394–401.
- C. 270 *S-матрица представляет вероятности*: Cushing, *Theory Construction and Selection in Modern Physics: The S Matrix*, 32–34; Schweber, *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, 154–55.
- C. 270 *выполнения полномасштабных расчетов*: Weinberg, “The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field Theory,” 26–30.
- C. 271 *S-матрица вновь обрела привлекательность*: Cushing, *Theory Construction and Selection*, 115–18.
- C. 271 *это все, что есть*: там же, 142–45.
- C. 271 *такой ненаблюдаемый континуум*: Chew, “The Dubious Role of the Space-Time Continuum in Subatomic Physics,” 529.
- C. 271 *ничего более фундаментального*: Capra, *The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*, 286–87.
- C. 271 *как к судоку*: Chew, “‘Bootstrap’: A Scientific Idea?” 763–64.
- C. 271 *в макроскопических масштабах*: Stapp, “Space and Time in S-Matrix Theory”; Capra, *The Tao of Physics*, 318.
- C. 271 *природа, которая не противоречит сама себе*: там же, 762.
- C. 271 *по существу уникальной S-матрицы*: Gross, “Twenty Five Years of Asymptotic Freedom,” 429.
- C. 272 *расширил в 1960-х гг. концепцию*: Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 962–66.
- C. 272 *более фундаментальными, чем локальные*: там же, 963, 991.
- C. 272 *слову «твистор»*: там же, 980–82.
- C. 272 *имеют нелокальную природу*: Лайонель Мейсон, интервью автора, 14 марта 2010, Оксфорд.



- C. 272 *Идеи наблюдения за тем*: Эндрю Ходжес, интервью автора, 16 марта 2010, Оксфорд.
- C. 273 *связывают вас со звездами*: Penrose, *The Road to Reality*, 1049.
- C. 273 *ближе к вам, чем вчерашний день*: Рафаэль Соркин, имейл автору, 16 ноября 2007.
- C. 273 *проблемой «гугли»*: Penrose, *The Road to Reality*, 1000.
- C. 273 *Он очень упорен*: Мейсон, интервью автора, 14 марта 2010.
- C. 273 *гадкий утенок*: Arkani-Hamed, “Space-Time, Quantum Mechanics and Scattering Amplitudes.”
- C. 273 *воодушевления и депрессии*: Халворсон, интервью автора.
- C. 274 *Разочарований было больше*: Маркопоулоу, интервью автора.
- C. 274 *Моя жизнь не бесконечна*: Маркопоулоу, телефонное интервью автора.
- C. 274 *70-страничным монстром*: Witten, “Perturbative Gauge Theory as a String Theory in Twistor Space.”
- C. 274 *увлекательно и впечатляюще*: Роджер Пенроуз, интервью автора, 15 марта 2010, Оксфорд.
- C. 274 *Твисторная теория интересует*: Witten, “An Interpretation of Classical Yang-Mills Theory.”
- C. 274 *пытался сделать что-нибудь*: Эдвард Виттен, имейл автору, 6 января 2015.
- C. 275 *эта чудесная идея*: Мейсон, интервью автора, 14 марта 2010.
- C. 275 *на входных параметрах и результатах*: Britto et al., “Direct Proof of the Tree-Level Scattering Amplitude Recursion Relation in Yang-Mills Theory.”
- C. 275 *«Месть аналитической S-матрицы»*: Ланс Диксон, имейл автору, 16 февраля 2010.
- C. 276 *напоминали то, что демонстрировал Эндрю*: Аркани-Хамед, телефонное интервью автора.
- C. 276 *геометрически с использованием твисторов*: Arkani-Hamed et al., “A Note on Polytopes for Scattering Amplitudes.”
- C. 276 *старомодное название*: Arkani-Hamed and Trnka, “The Amplituhedron.”
- C. 277 *Здесь нет полей*: Ярослав Трнка, имейл автору, 16 сентября 2014.
- C. 277 *Простые геометрические свойства*: Аркани-Хамед, интервью автора, 24 сентября 2013.
- C. 278 *Строительные блоки*: там же.
- C. 279 *Наука — это непрерывный спор*: Beller, *Quantum Dialogue*, 310; Freire, *The Quantum Dissidents*, 2–4.
- C. 279 *Это сплошь тупики*: Аркани-Хамед, интервью автора, 24 сентября 2013.
- C. 279 *когда им возражают, идут ва-банк*: Mitroff, “Norms and Counter-Norms in a Select Group of the Apollo Moon Scientists: A Case Study of the Ambivalence of Scientists,” 588–89.
- C. 279 *благорасположения своей группы*: Traweek, *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists*, 113–23.

- C. 280 начинались с неправильных идей: Johnson, *Where Good Ideas Come From: The Natural History of Innovation*, 134–39.
- C. 280 дарвиновской способностью к выживанию: Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, 271.
- C. 281 дети, независимо от своего возраста: Schrödinger, *Science and the Human Temperament*, 80.
- C. 281 «смерти расстояний»: Cairncross, *The Death of Distance: How the Communications Revolution Will Change Our Lives*.
- C. 281 границы своей личности: Thurschwell, *Literature, Technology and Magical Thinking, 1880–1920*, 12–14.
- C. 282 ураган «Катрина»: Baum, “Deluged.”
- C. 282 более чем на несколько десятков километров: Wijsman and Cavalli-Sforza, “Migration and Genetic Population Structure with Special Reference to Humans.”
- C. 282 люди с высшим образованием: Taylor et al., “American Mobility: Who Moves? Who Stays Put? Where’s Home?”
- C. 283 мы сливаемся в толпу: Zimbardo, *The Lucifer Effect*, chap. 13.
- C. 283 величайшие объединяющие и разделяющие факторы: Schlick, *General Theory of Knowledge*, 53.
- C. 283 темной материи и темной энергии: Seiberg, “Emergent Spacetime,” 167; Henson, “The Causal Set Approach to Quantum Gravity,” 13; Prescod-Weinstein and Smolin, “Disordered Locality as an Explanation for the Dark Energy”; Verlinde, “The Dark Phase Space of de Sitter.”
- C. 283 быстрее света: Hashimoto and Itzhaki, “Traveling Faster Than the Speed of Light in Noncommutative Geometry”; Valentini, “Beyond the Quantum.”





Библиография

Abiko, Seiya. "Einstein's Kyoto Address: 'How I Created the Theory of Relativity.'" *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 31, no. 1 (2000): 1–35.

Ade, P. A. R., R. W. Aikin, D. Barkats, S. J. Benton, C. A. Bischoff, J. J. Bock, J. A. Brevik, et al. "Detection of B- Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2." *Physical Review Letters* 112 (June 20, 2014).

Agrippa von Nettesheim, Heinrich Cornelius. *Three Books of Occult Philosophy*. Edited by Donald Tyson. Translated by James Freake. St. Paul, MN: Llewellyn Worldwide, 1993.

Aharonov, Yakir, and David Bohm. "Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory." *Physical Review* 115, no. 3 (August 1, 1959): 485–91.

Aharonov, Yakir, and Daniel Rohrlich. *Quantum Paradoxes*. Berlin: Wiley-VCH, 2005.

Albert, David Z. "Elementary Quantum Metaphysics." In *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, edited by James T. Cushing, Arthur Fine, and Sheldon Goldstein, 277–84. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

— — . "Physics and Narrative." Intersectional Symposium: The Concept of Reality in Physics, Dresden, Germany, March 16, 2011.

Allori, Valia, Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka, and Nino Zanghì. "Many Worlds and Schrödinger's First Quantum Theory." *The British Journal for the Philosophy of Science* 62, no. 1 (March 2011): 1–27.

Almheiri, Ahmed, Donald Marolf, Joseph Polchinski, and James Sully. "Black Holes: Complementarity or Firewalls?" *Journal of High Energy Physics*, no. 2 (February 11, 2013): 1–20.

Aoki, Hajime, Satoshi Iso, Hikaru Kawai, Yoshihisa Kitazawa, and Tsukasa Tada. "Space-Time Structures from IIB Matrix Model." *Progress of Theoretical Physics* 99, no. 5 (May 1998): 713–45.

Aristotle. *Physics*. Edited by David Bostock. Translated by Robin Waterfeld. New York: Oxford University Press, 1996.

Arkani-Hamed, Nima. "Space-Time, Quantum Mechanics and Scattering Amplitudes." Columbia University Department of Physics Colloquium, New York, March 28, 2011.

— — . "Space-Time, Quantum Mechanics, and the Large Hadron Collider." Institute for Advanced Study Public Lecture, Princeton, NJ, February 23, 2011.

Arkani-Hamed, Nima, Jacob Bourjaily, Freddy Cachazo, and Jaroslav Trnka. "Local Spacetime Physics from the Grassmannian." *Journal of High Energy Physics*, no. 1 (January 24, 2011).

Arkani-Hamed, Nima, Jacob Bourjaily, Freddy Cachazo, Andrew Hodges, and Jaroslav Trnka. "A Note on Polytopes for Scattering Amplitudes." *Journal of High Energy Physics*, no. 4 (April 16, 2012).

Arkani-Hamed, Nima, Freddy Cachazo, and Jared Kaplan. "What Is the Simplest Quantum Field Theory?" *Journal of High Energy Physics*, no. 9 (September 6, 2010).

Arkani-Hamed, Nima, and Jaroslav Trnka. "The Amplituhedron." *Journal of High Energy Physics*, no. 10 (October 6, 2014).

Arntzenius, Frank, and Tim Maudlin. "Time Travel and Modern Physics." In *Time, Reality and Experience*, edited by Craig Callender, 169–200. Royal Institute of Philosophy Supplements. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

Ashtekar, Abhay, and Carlo Rovelli. "A Loop Representation for the Quantum Maxwell Field." *Classical and Quantum Gravity* 9, no. 5 (May 1992): 1121–50.

Auyang, Sunny Y. *How Is Quantum Field Theory Possible?* New York: Oxford University Press, 1995.

Bacciagaluppi, Guido. "Remarks on Space-Time and Locality in Everett's Interpretation." In *Non-Locality and Modality*, edited by Tomasz Placek and Jeremy Butterfeld, 105–22. New York: Springer, 2002.

Bacciagaluppi, Guido, and Antony Valentini. *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. New York: Cambridge University Press, 2009.

Baez, John C., and Jamie Vicary. "Wormholes and Entanglement." arXiv.org, January 14, 2014.

Baker, David John. "Against Field Interpretations of Quantum Field Theory." *The British Journal for the Philosophy of Science* 60, no. 3 (August 11, 2009): 585–609.

Balasubramanian, Vijay. "What We Don't Know About Time." *Foundations of Physics* 43, no. 1 (January 2013): 101–14.

Balasubramanian, Vijay, and Per Kraus. "Spacetime and the Holographic Renormalization Group." *Physical Review Letters* 83, no. 18 (November 1, 1999).

Balasubramanian, Vijay, Per Kraus, Albion Lawrence, and Sandip P. Trivedi. "Holographic Probes of Anti-de Sitter Spacetimes." *Physical Review D* 59, no. 10 (April 26, 1999).

Bancal, Jean- Daniel, Stefano Pironio, Antonio Acin, Yeong-Cherng Liang, Valerio Scarani, and Nicolas Gisin. "Quantum Non- Locality Based on Finite-Speed Causal Influences Leads to Superluminal Signalling." *Nature Physics* 8, no. 12 (December 2012): 867–70.

Banks, Tom. "The State of Matrix Theory." *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements* 62, nos. 1–3 (March 1998): 341–47.

Banks, Tom, Willy Fischler, Igor R. Klebanov, and Leonard Susskind. "Schwarzschild Black Holes from Matrix Theory." *Physical Review Letters* 80, no. 2 (January 12, 1998): 226–29.

Banks, Tom, Willy Fischler, Stephen H. Shenker, and Leonard Susskind. "M Theory as a Matrix Model: A Conjecture." *Physical Review D* 55, no. 8 (April 15, 1997): 5112–28.

Banks, Tom, Leonard Susskind, and Michael E. Peskin. "Difficulties for the Evolution of Pure States into Mixed States." *Nuclear Physics B* 244, no. 1 (September 24, 1984): 125–34.

Barbour, Julian B. *Absolute or Relative Motion? Vol. 1, The Discovery of Dynamics*. New York: Cambridge University Press, 1989.

— — . *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. New York: Oxford University Press, 1999. Reprint, 2001.

— — . "The Nature of Time." Essay written for the Foundational Questions Institute Essay Contest, The Nature of Time, December 1, 2008.

Barrett, Jonathan, and Nicolas Gisin. "How Much Measurement Independence Is Needed to Demonstrate Nonlocality?" *Physical Review Letters* 106, no. 10 (March 10, 2011).

Barz, Stefanie, Elham Kashef, Anne Broadbent, Joseph F. Fitzsimons, Anton Zeilinger, and Philip Walther. "Demonstration of Blind Quantum Computing." *Science* 335, no. 6066 (January 20, 2012): 303–308.

Bauer, Henry H. *Scientific Literacy and the Myth of the Scientific Method*. Champaign, IL: University of Illinois Press, 1994.

Baum, Dan. "Deluged." *The New Yorker*, January 9, 2006.

Bekenstein, Jacob D. "Black Holes and Entropy." *Physical Review D* 7, no. 8 (April 15, 1973): 2333–46.

Bell, John S. "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox." *Physics* 1, no. 3 (1964): 195–200.

— — . *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2004.

Beller, Mara. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1999.

Beller, Mara, and Arthur Fine. "Bohr's Response to EPR." In *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, edited by Jan Faye and Henry J. Folse, 1–31. Boston Studies in the Philosophy of Science 153. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994.

Belot, Gordon. "Understanding Electromagnetism." *The British Journal for the Philosophy of Science* 49, no. 4 (December 1998): 531–55.

Belousek, Darrin W. "Einstein's 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 27, no. 4 (December 1996): 437–61.

Berkson, William. *Fields of Force: The Development of a World View from Faraday to Einstein*. New York: Halsted Press/John Wiley and Sons, 1974.

Bern, Zvi, Lance J. Dixon, David C. Dunbar, and David A. Kosower. "Fusing Gauge Theory Tree Amplitudes into Loop Amplitudes." *Nuclear Physics B* 435, nos. 1–2 (February 6, 1995): 59–101.

Berryman, Sylvia. *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*. New York: Cambridge University Press, 2009.

Black, Max. "Why Cannot an Effect Precede Its Cause?" *Analysis* 16, no. 3 (January 1956): 49–58.

Blum, Alexander. "From the Necessary to the Possible: The Genesis of the Spin-Statistics Theorem." *The European Physical Journal H* 39, no. 5 (December 2014): 543–74.

Bohm, David. "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I." *Physical Review* 85, no. 2 (January 1952): 166–79.

— — . "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. II." *Physical Review* 85, no. 2 (January 1952): 180–93.

Bohm, David, and Basil J. Hiley. *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. London: Routledge, 1993.

Bohm, David, and J. P. Vigier. "Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations." *Physical Review* 96, no. 1 (October 1954): 208–16.

Bohr, Niels. "Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics." In *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, edited by Paul Arthur Schilpp, 199–241. Chicago: Northwestern University Press, 1949.

— — . *The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924–1926)*. Edited by Klaus Stolzenburg. Vol. 5. New York: Elsevier, 1984.

— — . *Foundations of Quantum Physics I (1926–1932)*. Edited by Jørgen Kalckar. Vol. 6 of *Niels Bohr: Collected Works*, edited by Erik Rüdinger. New York: Elsevier, 1985.

— — . *Foundations of Quantum Physics II (1933–1958)*. Edited by Jørgen Kalckar. Vol. 7 of *Niels Bohr: Collected Works*, edited by Erik Rüdinger. New York: Elsevier, 1996.

— — . "Space and Time in Nuclear Physics." In *Niels Bohr: Essays and Papers*, edited by John T. Sanders, translated by Else Mogensen. 1:205–20. Rochester, NY: Self-published, 1987.

Bombelli, Luca, Joohan Lee, David Meyer, and Rafael D. Sorkin. "Space-Time as a Causal Set." *Physical Review Letters* 59, no. 5 (August 3, 1987): 521–24.

Borisov, Alexey V., and Nikolay A. Kudryashov. "Paul Painlevé and His Contribution to Science." *Regular and Chaotic Dynamics* 19, no. 1 (February 9, 2014): 1–19.

Bork, Alfred M. "Maxwell and the Vector Potential." *Isis* 58, no. 2 (Summer 1967): 210–22.

Born, Max, and Albert Einstein. *The Born-Einstein Letters 1916–1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*. Translated by Irene Born. New York: Palgrave Macmillan, 2005.

Bousoff, Raphael. “The Holographic Principle.” *Reviews of Modern Physics* 74, no. 3 (July — September 2002): 825–74.

Bouwmeester, Dik, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger. “Experimental Quantum Teleportation.” *Nature* 390 (December 11, 1997): 575–79.

Branciard, Cyril, Eric G. Cavalcanti, Stephen P. Walborn, Valerio Scarani, and Howard M. Wiseman. “One-Sided Device- Independent Quantum Key Distribution: Security, Feasibility, and the Connection with Steering.” *Physical Review A* 85, no. 1 (January 3, 2012).

Brassard, Gilles. “Quantum Communication Complexity (A Survey).” arXiv.org, January 1, 2001.

Brassard, Gilles, Harry Buhrman, Noah Linden, André Allan Méthot, Alain Tapp, and Falk Unger. “Limit on Nonlocality in Any World in Which Communication Complexity Is Not Trivial.” *Physical Review Letters* 96, no. 25 (June 27, 2006).

Britto, Ruth, Freddy Cachazo, Bo Feng, and Edward Witten. “Direct Proof of the Tree-Level Scattering Amplitude Recursion Relation in Yang-Mills Theory.” *Physical Review Letters* 94, no. 18 (May 10, 2005).

Broderick, Avery E., Abraham Loeb, and Ramesh Narayan. “The Event Horizon of Sagittarius A*.” *The Astrophysical Journal* 701, no. 2 (July 31, 2009): 1357–66.

Brush, Stephen G. “The Chimerical Cat: Philosophy of Quantum Mechanics in Historical Perspective.” *Social Studies of Science* 10, no. 4 (November 1980): 393–447.

Cairncross, Frances. *The Death of Distance: How the Communications Revolution Will Change Our Lives*. Boston: Harvard Business School Press, 1997.

Caldiero, Frank M. “The Source of Hamlet’s ‘What a Piece of Work Is a Man!’” *Notes and Queries* 196 (September 29, 1951): 421–24.

Callan, Curtis G., Jr., Steven B. Giddings, Jeffrey A. Harvey, and Andrew Strominger. “Evanescence Black Holes.” *Physical Review D* 45, no. 4 (February 15, 1992): 1005–1009.

Cantor, Geoffrey N. *Optics After Newton: Theories of Light in Britain and Ireland, 1704–1840*. Dover, NH: Manchester University Press, 1983.

Capra, Fritjof. *The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*. 3rd ed. Boston: Shambhala, 1991.

Carazza, Bruno, and Helge Kragh. “Heisenberg’s Lattice World: The 1930 Theory Sketch.” *American Journal of Physics* 63, no. 7 (July 1995): 595–605.

Carlip, Steven. “Spontaneous Dimensional Reduction?” In *The Sixth International School on Field Theory and Gravitation*, edited by Waldyr Alves Rodrigues Jr., Richard Kerner, Gentil O. Pires, and Carlos Pinheiro, 63–72.

AIP Conference Proceedings 1483. Melville, NY: American Institute of Physics, 2012.

Carroll, Sean M. "In What Sense Is the Early Universe Fine-Tuned?" arXiv.org, June 11, 2014.

— — . Opening talk at Setting Time Aright, conference of the Foundational Questions Institute, Bergen, Norway, and Copenhagen, Denmark, August 27 — September 1, 2011.

— — . *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. San Francisco: Addison-Wesley, 2004.

Casey, Edward S. *The Fate of Place: A Philosophical History*. Berkeley: University of California Press, 1997.

Castellani, Elena. "Dirac on Gauges and Constraints." *International Journal of Theoretical Physics* 43, no. 6 (June 2004): 1503–14.

Chambers, R. G. "Shift of an Electron Interference Pattern by Enclosed Magnetic Flux." *Physical Review Letters* 5, no. 1 (July 1, 1960): 3–5.

Chew, Geoffrey F. "The Dubious Role of the Space-Time Continuum in Subatomic Physics." *Science Progress* 51, no. 204 (October 1963): 529–39.

— — . "'Bootstrap': A Scientific Idea?" *Science* 161, no. 3843 (August 23, 1968): 762–65.

Clifton, Robert K., and Hans P. Halvorson. "Entanglement and Open Systems in Algebraic Quantum Field Theory." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 32, no. 1 (March 2001): 1–31.

Clifton, Robert K., D. V. Feldman, Hans P. Halvorson, Michael Redhead, and Alexander Wilce. "Superentangled States." *Physical Review A* 58, no. 1 (July 1, 1998): 135–45.

Coleman, Sidney. "Why There Is Nothing Rather Than Something: A Theory of the Cosmological Constant." *Nuclear Physics B* 310, nos. 3–4 (December 12, 1988): 643–68.

Collins, Harry M., and Trevor J. Pinch. *Frames of Meaning: The Social Construction of Extraordinary Science*. London: Routledge and Kegan Paul, 1982.

Copenhaver, Brian P. "Natural Magic, Hermetism, and Occultism in Early Modern Science." In *Reappraisals of the Scientific Revolution*, edited by David C. Lindberg and Robert S. Westman, 261–301. New York: Cambridge University Press, 1990.

Cornford, F. M. "The Invention of Space." In *The Concepts of Space and Time: Their Structure and Their Development*, edited by Milič Čapek, 3–16. Boston Studies in the Philosophy of Science 22. New York: Springer, 1976.

Cramer, John G. "The Quantum Handshake." *The Alternate View, Analog Science Fiction and Fact*, November 1986.

Craps, Ben, Savdeep Sethi, and Erik P. Verlinde. "A Matrix Big Bang." *Journal of High Energy Physics* 10, no. 1 (October 2005).

Cushing, James T. "Locality/Separability: Is This Necessarily a Useful Distinction?" *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1994. Vol. 1, *Contributed Papers*, 107–16. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

— — . *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

— — . *Theory Construction and Selection in Modern Physics: The S Matrix*. New York: Cambridge University Press, 1990.

Cushing, James T., and Ernan McMullin, eds. *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame, IN: University of Notre Dame Press, 1989.

Davies, Paul C. W., and J. R. Brown. *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*. New York: Cambridge University Press, 1986. Reprint, 1993.

Davis, Tamara M., and Charles H. Lineweaver. "Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe." *Publications of the Astronomical Society of Australia* 21, no. 1 (2004): 97–109.

de Haas-Lorentz, Geertruida Luberta. *H. A. Lorentz: Impressions of His Life and Work*. Amsterdam: North Holland Publishing, 1957.

de Muynck, Willem M. "Can We Escape From Bell's Conclusion That Quantum Mechanics Describes a Non-Local Reality?" *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 27, no. 3 (September 1996): 315–30.

Descartes, René. *Principles of Philosophy*. Translated by Valentine Rodger Miller and Reese P. Miller. New York: Springer, 1984.

— — . *The Philosophical Writings of Descartes*. Vol. 3, *The Correspondence*. Translated by John Cottingham, Robert Stoothoff, and Dugald Murdoch. New York: Cambridge University Press, 1991.

d'Espagnat, Bernard. "The Quantum Theory and Reality." *Scientific American*, November 1979.

DeWitt, Bryce S. "Quantum Mechanics and Reality." *Physics Today* 23, no. 9 (September 1970): 155–65.

Dickens, Charles. *The Personal History of David Copperfeld*. Edited by Trevor Blount, New York: Penguin Classics, 1966.

Dickson, Michael. *Quantum Chance and Non-Locality: Probability and Non-Locality in the Interpretations of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

Dijksterhuis, E. J. *The Mechanization of the World Picture: Pythagoras to Newton*. Translated by C. Dikshoorn. Prince ton, NJ: Prince ton University Press, 1986.

Dirac, Paul Adrien Maurice. "Classical Theory of Radiating Electrons." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences* 167, no. 929 (August 5, 1938): 148–69.

— — . "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences* 133, no. 821 (September 1, 1931): 60–72.

— — . "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature." *Scientific American*, May 1963, 45–53.

Dobbs, B. J. T. "Newton's Alchemy and His Theory of Matter." *Isis* 73, no. 4 (December 1982): 511–28.

Doran, Barbara Giusti. "Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature." *Historical Studies in the Physical Sciences* 6 (1975): 133–260.

Dowker, Fay. "Causal Sets and the Deep Structure of Spacetime." In *One Hundred Years of Relativity: Space-Time Structure; Einstein and Beyond*, edited by Abhay Ashtekar, 445–64. Hackensack, NJ: World Scientific, 2005.

Dreyer, Olaf. "The World Is Discrete." arXiv.org, July 23, 2013.

Duff, Michael J. "The Theory Formerly Known as Strings." *Scientific American*, February 1998.

Duncan, Anthony. *The Conceptual Framework of Quantum Field Theory*. New York: Oxford University Press, 2012.

Earman, John. "Locality, Nonlocality, and Action at a Distance: A Skeptical Review of Some Philosophical Dogmas." In *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics: Historical and Philosophical Perspectives*, edited by Robert Kargon and Peter Achinstein, 449–90. Cambridge, MA: The MIT Press, 1987.

— — . *A Primer on Determinism*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1986.

— — . "Recent Work on Time Travel." In *Time's Arrows Today: Recent Physical and Philosophical Work on the Direction of Time*, edited by Steven F. Savitt, 268–310. New York: Cambridge University Press, 1995.

— — . *World Enough and Space-Time: Absolute Versus Rational Theories of Space and Time*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1989.

Easther, Richard, Raphael Flauger, Paul McFadden, and Kostas Skenderis. "Constraining Holographic Inflation with WMAP." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, no. 9 (September 2011).

Ehlers, Jürgen. "The Nature and Structure of Spacetime." In *The Physicist's Conception of Nature*, edited by Jagdish Mehra, 71–91. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1973.

Einstein, Albert. "Autobiographical Notes." In *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, edited by Paul Arthur Schilpp. New York: MJF Books, 1949.

— — . *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Edited by John Stachel. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998.

— — . Letter to Erwin Schrödinger, June 19, 1935, Old Lyme, CT. Einstein Archives Online, EA 22–47.

— — . Letter to Paul Epstein, November 10, 1945, Princeton, NJ, EA 10–583.

— — . *Letters to Solovine: 1906–1955*. New York: Philosophical Library, 1987. Reprint, New York: Open Road, 2011.

— — . *The Meaning of Relativity*. Translated by Edwin Plimpton Adams. 5th ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2005. First published 1922.

— — . “On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light.” In Stachel, *Einstein’s Miraculous Year*, 177–98.

— — . “On the Electrodynamics of Moving Bodies.” In Stachel, *Einstein’s Miraculous Year*, 121–60.

— — . “On the Quantum Theory of Radiation.” In *Sources of Quantum Mechanics*, edited by B. L. van der Waerden, 63–77. Mineola, NY: Dover Publications, 2007. First published 1967.

— — . “Physics and Reality.” *Journal of the Franklin Institute* 221, no. 3 (March 1936): 349–82.

— — . “Quanten-Mechanik Und Wirklichkeit.” *Dialectica* 2, nos. 3–4 (November 1948): 320–24.

— — . “Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung.” *Physikalische Zeitschrift* 10, no. 22 (1909): 817–25.

— — . “Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie.” *Annalen Der Physik* 328, no. 7 (1907): 371–84.

Einstein, Albert, and Nathan Rosen. “The Particle Problem in the General Theory of Relativity.” *Physical Review* 48, no. 1 (July 1935): 73–77.

Einstein, Albert, Boris Podolsky, and Nathan Rosen. “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review* 47, no. 10 (May 15, 1935): 777–80.

Ekert, Artur K. “Quantum Cryptography Based on Bell’s Theorem.” *Physical Review Letters* 67, no. 6 (August 5, 1991): 661–63.

Erler, Theodore G., and David J. Gross. “Locality, Causality, and an Initial Value Formulation for Open String Field Theory.” arXiv.org, June 22, 2004.

Faraday, Michael. *Experimental Researches in Chemistry and Physics*. London, 1859.

— — . *Experimental Researches in Electricity*. Vol. 1. London, 1839.

— — . *Experimental Researches in Electricity*. Vol. 2. London, 1844.

— — . *Experimental Researches in Electricity*. Vol. 3. London, 1855.

Fernbach, Philip M., Todd Rogers, Craig R. Fox, and Steven A. Sloman. “Political Extremism Is Supported by an Illusion of Understanding.” *Psychological Science* 24, no. 6 (June 7, 2013): 939–46.

Feynman, Richard P. *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1986.

— — . *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1967.

— — . “Surely You’re Joking, Mr. Feynman!”: *Adventures of a Curious Character*. New York: W. W. Norton, 1985. Reprint, 1997.

Fine, Arthur. “Do Correlations Need to Be Explained?” In Cushing and McMullin, *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, 175–94.

— — . *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1996.

Finkelstein, David Ritz. “Space-Time Code.” *Physical Review* 184, no. 5 (August 25, 1969): 1261–71.

Fletcher, Neville H. "Nonlinear Dynamics and Chaos in Musical Instruments." In *Complex Systems: From Biology to Computation*, edited by David G. Green and Terry Bossomaier, 106–17. Amsterdam: IOS Press, 1993.

Forman, Paul. "Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918–1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment." *Historical Studies in the Physical Sciences* 3 (1971): 1–115.

Franson, J. D. "Generation of Entanglement Outside of the Light Cone." *Journal of Modern Optics* 55, no. 13 (July 20, 2008): 2117–40.

Fraser, Doreen. "The Fate of 'Particles' in Quantum Field Theories with Interactions." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 39, no. 4 (November 2008): 841–59.

Frazer, James George. *The Golden Bough: A Study in Magic and Religion. Part I: The Magic Art and the Evolution of Kings*. 3rd ed. Vol. 1. New York: Macmillan, 1913.

Freire, Olival, Jr. *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950–1990)*. New York: Springer, 2015.

Friedman, John, Michael S. Morris, Igor Dmitrievich Novikov, Fernando Echeverria, Gunnar Klinkhammer, Kip S. Thorne, and Ulvi Yurtsever. "Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves." *Physical Review D* 42, no. 6 (September 15, 1990): 1915–30.

Friedman, Michael. Introduction to *Metaphysical Foundations of Natural Science*, by Immanuel Kant, vii–xxx. Translated by Michael Friedman. New York: Cambridge University Press, 2004.

Frisch, Mathias. "Inconsistency in Classical Electrodynamics." *Philosophy of Science* 71, no. 4 (October 2004): 525–49.

—. "Non-Locality in Classical Electrodynamics." *The British Journal for the Philosophy of Science* 53 (2002): 1–19.

Gale, George. "Leibniz and Some Aspects of Field Dynamics." *Studia Leibnitiana* 6, no. 1 (1974): 28–48.

Galilei, Galileo. *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems, Ptolemaic and Copernican*. Translated by Stillman Drake. Berkeley: University of California Press, 1953. Reprint, New York: Modern Library, 2001.

Galvez, Enrique. *Correlated-Photon Experiments for Undergraduate Labs*. Unpublished handbook, Colgate University, March 31, 2010.

Garber, Daniel. *Descartes' Metaphysical Physics*. Chicago: University of Chicago Press, 1992.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W. H. Freeman and Company, 1994. Reprint, New York: Henry Holt and Company, 1995.

Gell-Mann, Murray, and James B. Hartle. "Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology." In *Proceedings of the Third International Symposium Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, Tokyo, August 28–31, 1989*, edited by Shun'ichi Kobayashi and Nihon Butsuri Gakkai, 321–43. Tokyo: Physical Society of Japan, 1990.

Gibbons, Gary W. "Black Holes and Information." *Bits, Branes, Black Holes*, Santa Barbara, CA, March 26, 2012.

Giddings, Steven B. "Black Holes, Quantum Information, and Unitary Evolution." *Physical Review D* 85, no. 12 (June 27, 2012).

Giddings, Steven B., Donald Marolf, and James B. Hartle. "Observables in Effective Gravity." *Physical Review D* 74, no. 6 (September 18, 2006).

Gilbert, William. *On the Magnet*. Translated by Silvanus P. Thompson. London: Chiswick Press, 1900.

Gilder, Louisa. *The Age of Entanglement: When Quantum Physics Was Reborn*. New York: Alfred A. Knopf, 2008.

Gisin, Nicolas. "Can Relativity Be Considered Complete? From Newtonian Nonlocality to Quantum Nonlocality and Beyond." arXiv.org, December 20, 2005.

Goodrick-Clarke, Nicholas. *The Western Esoteric Traditions: A Historical Introduction*. New York: Oxford University Press, 2008.

Gorelik, Gennady E. "Matvei Bronstein and Quantum Gravity: 70th Anniversary of the Unsolved Problem." *Physics-Uspekhi* 48, no. 10 (2005): 1039–53.

Goss, W. M., and R. X. McGee. "The Discovery of the Radio Source Sagittarius A (Sgr A)." In *The Galactic Center*, edited by Roland Gredel, 369–79. Astronomical Society of the Pacific Conference Series 102. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996.

Gödel, Kurt. "A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy." In Schilpp, *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, 555–62.

Greenberger, Daniel M., Michael A. Horne, Abner Shimony, and Anton Zeilinger. "Bell's Theorem Without Inequalities." *American Journal of Physics* 58, no. 12 (December 1990): 1131–43.

Greenblatt, Stephen. "The Answer Man." *The New Yorker*, August 11, 2011.

Greene, Brian. *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*. New York: Vintage Books, 2005.

Gribbin, John. "The Man Who Proved Einstein Was Wrong." *New Scientist*, no. 1744, November 24, 1990.

Griffiths, Robert B. "EPR, Bell, and Quantum Locality." *American Journal of Physics* 79, no. 9 (September 2011): 954–65.

— — . "Quantum Locality." *Foundations of Physics* 41, no. 4 (April 2011): 705–33.

Grim, Patrick. "Free Will in Context: A Contemporary Philosophical Perspective." *Behavioral Sciences and the Law* 25, no. 2 (March/April 2007): 183–201.

Gross, David J. "Einstein and the Search for Unification." *Current Science* 89, no. 12 (December 25, 2005): 2035–40.

— — . "Twenty Five Years of Asymptotic Freedom." *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements* 74, no. 1 (March 1999): 426–46.

Grünbaum, Adolf. *Modern Science and Zeno's Paradoxes*. Middletown, CT: Wesleyan University Press, 1967.

Guth, Alan H., and Paul J. Steinhardt. "The Inflationary Universe." *Scientific American*, May 1984.

Guthrie, W. K. C. *A History of Greek Philosophy*. Vol. 1, *The Earlier Presocratics and the Pythagoreans*. Cambridge: Cambridge University Press, 1962. Reprint, 1979.

— — . *A History of Greek Philosophy*. Vol. 2, *The Presocratic Tradition From Parmenides to Democritus*. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. Reprint, 1979.

Hall, Michael J. W. "Relaxed Bell Inequalities and Kochen-Specker Theorems." *Physical Review A* 84 (August 2, 2011).

Halvorson, Hans P. "Algebraic Quantum Field Theory." In *Philosophy of Physics*, edited by Jeremy Butterfield and John Earman, Part A, 731–864. Amsterdam: North Holland, 2007.

— — . "Locality, Localization, and the Particle Concept: Topics in the Foundations of Quantum Field Theory," PhD diss., University of Pittsburgh, 2001.

Halvorson, Hans P., and Robert K. Clifton. "No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories?" *Philosophy of Science* 69, no. 1 (March 2002): 1–28.

Hamma, Alioscia, and Fotini Markopoulou. "Background-Independent Condensed Matter Models for Quantum Gravity." *New Journal of Physics* 13, no. 9 (September 2011).

Hanegraaff, Wouter J. "The New Age Movement and the Esoteric Tradition." In *Gnosis and Hermeticism from Antiquity to Modern Times*, edited by Roelof van den Broek and Wouter J. Hanegraaff, 359–82. Albany: State University of New York Press, 1998.

Haroche, Serge, and Jean-Michel Raimond. *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons*. New York: Oxford University Press, 2006.

Harrison, Edward. *Cosmology: The Science of the Universe*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2000.

Hashimoto, Akikazu, and N. Itzhaki. "Traveling Faster Than the Speed of Light in Noncommutative Geometry." *Physical Review D* 63, no. 12 (May 21, 2001).

Hatfield, Brian. *Quantum Field Theory of Point Particles and Strings*. Boulder, CO: Westview Press, 1992.

Hawking, Stephen W. "Black Holes and Thermodynamics." *Physical Review D* 13, no. 2 (January 15, 1976): 191–97.

— — . "Information Loss in Black Holes." *Physical Review D* 72, no. 8 (October 18, 2005).

He, Guang Ping. "Simple Quantum Protocols for the Millionaire Problem with a Semi-Honest Third Party." *International Journal of Quantum Information* 11, no. 2 (March 2013).

Healey, Richard A. *Gauging What's Real: The Conceptual Foundations of Contemporary Gauge Theories*. New York: Oxford University Press, 2007.

— — . “Holism and Nonseparability.” *The Journal of Philosophy* 88, no. 8 (August 1991): 393–421.

— — . “New Thoughts on Yang-Mills Theories.” Workshop on the Foundations of Gauge Theories, University of California, Irvine, March 21–23, 2014.

Heemskerk, Idse, Joao Penedones, Joseph Polchinski, and James Sully. “Holography from Conformal Field Theory.” *Journal of High Energy Physics* 2009, no. 10 (October 2009).

Hegerfeldt, Gerard C. “Violation of Causality in Relativistic Quantum Theory?” *Physical Review Letters* 54, no. 22 (June 3, 1985): 2395–98.

Heller, Michael. “Where Physics Meets Metaphysics.” In *On Space and Time*, edited by Shahn Majid, 238–77. New York: Cambridge University Press, 2008.

Heller, Michael, and Wiesław Sasin. “Einstein-Podolski-Rosen Experiment from Noncommutative Quantum Gravity.” In *Particles, Fields, and Gravitation*, edited by Jakub Rembliński, 234–41. AIP Conference Proceedings 453. Woodbury, NY: American Institute of Physics, 1998.

— — . “Emergence of Time.” *Physics Letters A* 250, no. 1 (1998): 48–54.

— — . “Nonlocal Phenomena From Noncommutative Pre-Planckian Regime.” arXiv.org, June 17, 1999.

Henry, John. “Gravity and *De Gravitatione*: The Development of Newton’s Ideas on Action at a Distance.” *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 42, no. 1 (2011): 11–27.

— — . “Occult Qualities and the Experimental Philosophy: Active Principles in Pre-Newtonian Matter Theory.” *History of Science* 24 (1986): 335–81.

— — . “‘Pray Do Not Ascribe That Notion to Me’: God and Newton’s Gravity.” In *The Books of Nature and Scripture: Recent Essays on Natural Philosophy, Theology, and Biblical Criticism in the Netherlands of Spinoza’s Time and the British Isles of Newton’s Time*, edited by James E. Force and Richard Henry Popkin, 123–47. International Archives of the History of Ideas 139. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.

— — . *The Scientific Revolution and the Origins of Modern Science*. 2nd ed. New York: Palgrave Macmillan, 2002.

Henson, Joe. “The Causal Set Approach to Quantum Gravity.” In Oriti, *Approaches to Quantum Gravity*, 393–413.

Hertz, Heinrich. *Miscellaneous Papers*. Edited by Philipp Lenard. Translated by Daniel Evan Jones and G. A. Schott. New York: Macmillan, 1896.

Hesse, Mary B. *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York: Thomas Nelson, 1961. Reprint, Mineola, NY: Dover Publications, 2005.

Holbrow, C. H., Enrique Galvez, and M. E. Parks. “Photon Quantum Mechanics and Beam Splitters.” *American Journal of Physics* 70, no. 3 (March 2002): 260–65.

Horowitz, Gary T., and Joseph Polchinski. “Gauge/Gravity Duality.” In Oriti, *Approaches to Quantum Gravity*, 169–86.

Horowitz, Gary T., Albion Lawrence, and Eva Silverstein. “Insightful D-Branes.” *Journal of High Energy Physics*, no. 7 (July 2009).

- Horwich, Paul. *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1987.
- Howard, Don. "Albert Einstein as a Philosopher of Science." *Physics Today* 58, no. 12 (December 2005): 34–40.
- — . "Einstein on Locality and Separability." *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16, no. 3 (September 1985): 171–201.
- — . "Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments." In Cushing and McMullin, *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, 224–53.
- — . "'Nicht Sein Kann Was Nicht Sein Darf,' or the Prehistory of EPR, 1909–1935: Einstein's Early Worries About the Quantum Mechanics of Composite Systems." In *Sixty-Two Years of Uncertainty: Historical, Philosophical, and Physical Inquiries Into the Foundations of Quantum Mechanics*, edited by Arthur I. Miller, 61–111. New York: Plenum Press, 1990.
- — . "A Peek Behind the Veil of Maya." In *The Cosmos of Science: Essays of Exploration*, edited by John Earman and John D. Norton, 87–150. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1997.
- — . "Revisiting the Einstein- Bohr Dialogue." *Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly* 56 (January 2007): 57–90.
- — . "The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory by Arthur Fine." *Synthese* 86, no. 1 (January 1991): 123–41.
- Huggett, Nick. "Zeno's Paradoxes." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, October 15, 2010.
- Hume, David. *Of the Understanding*. Book 1 of *A Treatise of Human Nature*. Edited by L. A. Selby-Bigge. Oxford: Clarendon Press, 1888.
- Hunt, Bruce J. *The Maxwellians*. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1991. Reprint, 2005.
- Hutchison, Keith. "What Happened to Occult Qualities in the Scientific Revolution?" *Isis* 73, no. 2 (June 1, 1982): 233–53.
- Isaacson, Walter. *Einstein: His Life and Universe*. New York: Simon and Schuster, 2007.
- Ismael, Jenann. "Decision and the Open Future." In *The Future of the Philosophy of Time*, edited by Adrian Bardon, 149–68. London: Routledge, 2011.
- — . "What Entanglement Might Be Telling Us." Paper presented at the 46th Chapel Hill Colloquium in Philosophy, Chapel Hill, NC, November 2–4, 2012.
- Jackson, John David. *Classical Electrodynamics*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1975.
- Jacobson, Ted. "Introduction to Quantum Fields in Curved Spacetime and the Hawking Effect." In *Lectures on Quantum Gravity*, edited by Andrés Gomberoff and Donald Marolf, 39–89. Series of the Centro De Estudios Científicos. New York: Springer, 2005.
- James, William. *The Will to Believe: And Other Essays in Popular Philosophy*. New York, 1897.

Jammer, Max. *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1957. Reprint, Mineola, NY: Dover Publications, 1999.

— — . *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*. Foreword by Albert Einstein. 3rd, enlarged ed. Mineola, NY: Dover Publications, 1993. First published 1954.

— — . *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: John Wiley and Sons, 1974.

Janiak, Andrew. *Newton as Philosopher*. New York: Cambridge University Press, 2008.

Jennewein, Thomas, Christoph Simon, Gregor Weihs, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger. "Quantum Cryptography with Entangled Photons." *Physical Review Letters* 84, no. 20 (May 15, 2000).

Jensen, Kristan, and Andreas Karch. "Holographic Dual of an Einstein-Podolsky-Rosen Pair Has a Wormhole." *Physical Review Letters* 111, no. 21 (November 21, 2013).

Johnson, George. "A Passion for Physical Realms, Minute and Massive." *The New York Times*, February 20, 2001.

Johnson, Steven. *Where Good Ideas Come From: The Natural History of Innovation*. New York: Riverhead Books, 2010.

Jones, Martin R., and Robert K. Clifton. "Against Experimental Metaphysics." *Midwest Studies in Philosophy* 18, no. 1 (September 1993): 295–316.

Kafatos, Menas, and Robert Nadeau. *The Conscious Universe: Part and Whole in Modern Physical Theory*. New York: Springer, 1990.

Kahneman, Daniel. *Thinking, Fast and Slow*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011.

Kaiser, David. *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. Chicago: University of Chicago Press, 2005.

— — . *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*. New York: W. W. Norton, 2011.

Kant, Immanuel. *Critique of Pure Reason*. Edited by Vasilis Politis. London: J. M. Dent, 1993.

— — . *Metaphysical Foundations of Natural Science*. Translated by Michael Friedman. New York: Cambridge University Press, 2004.

Kaplan, Marc. "Winners of the Young Researchers Competition in Physics Announced." Press release, Science and Ultimate Reality, meeting in honor of John Wheeler, Princeton, NJ, March 21, 2002.

Kaplunovsky, Vadim, and Marvin Weinstein. "Space-Time: Arena or Illusion?" *Physical Review D* 31, no. 8 (April 15, 1985): 1879–98.

Kavli Institute of Theoretical Physics. Bits, Branes, Black Holes, program, Santa Barbara, CA, March 19 — May 25, 2012.

Kearney, Hugh. *Science and Change, 1500–1700*. New York: McGraw-Hill, 1971.

- Kepler, Johannes. *New Astronomy*. Translated by William H. Donahue. New York: Cambridge University Press, 1992.
- Kipnis, Naum. "Luigi Galvani and the Debate on Animal Electricity, 1791–1800." *Annals of Science* 44, no. 2 (March 1987): 107–42.
- Klein, Martin J. "Einstein and the Wave- Particle Duality." *The Natural Philosopher* 3 (1964): 3–49.
- Kochiras, Hylarie. "Gravity and Newton's Substance Counting Problem." *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 40 (September 2009): 267–80.
- Koestler, Arthur. *The Watershed: A Biography of Johannes Kepler*. New York: Anchor Books, 1960.
- Konopka, Tomasz, Fotini Markopoulou, and Simone Severini. "Quantum Graphity: A Model of Emergent Locality." *Physical Review D* 77, no. 10 (May 27, 2008).
- Kuchař, Karel V. "Time and Interpretations of Quantum Gravity." In *General Relativity and Relativistic Astrophysics: The 4th Canadian Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, 16–18 May 1991*, edited by Gabor Kunstatter, Dwight E. Vincent, and Jeff G. Williams. Hackensack, NJ: World Scientific, 1992.
- Kuehn, Manfred. *Kant: A Biography*. New York: Cambridge University Press, 2001.
- Kuhlmann, Meinard. "What Is Real?" *Scientific American*, August 2013, 40–47.
- Kuhn, Thomas S. *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1957.
- . *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- Lam, Vincent. "Structural Aspects of Space-Time Singularities." In *The Ontology of Spacetime II*, edited by Dennis Dieks, 111–31. Philosophy and Foundations of Physics 4. New York: Elsevier, 2008.
- Landsman, N. P. "When Champions Meet: Rethinking the Bohr-Einstein Debate." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 37, no. 1 (March 2006): 212–42.
- Lange, Marc. *An Introduction to the Philosophy of Physics: Locality, Fields, Energy, and Mass*. Malden, MA: Blackwell Publishing, 2002.
- Langevin, Paul. "L'évolution de l'espace et du temps." *Scientia* 10 (1911): 31–54.
- Lapkiewicz, Radek, Peizhe Li, Christoph Schaeff, Nathan K. Langford, Sven Ramelow, Marcin Wieśniak, and Anton Zeilinger. "Experimental Non-Classicality of an Indivisible Quantum System." *Nature* 474, no. 7352 (June 23, 2011): 490–93.
- Laudisa, Federico. "Non-Local Realistic Theories and the Scope of the Bell Theorem." *Foundations of Physics* 38, no. 12 (December 2008): 1110–32.

Lefschetz, Solomon. *Introduction to Topology*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1949.

Leibniz, Gottfried Wilhelm. *New Essays on Human Understanding*. Abridged ed. Translated and edited by Peter Remnant and Jonathan Bennett. New York: Cambridge University Press, 1982.

— — . *Philosophical Papers and Letters: A Selection*. Edited and translated by Leroy E. Loemker. Vol. 1. Chicago: University of Chicago Press, 1956.

— — . *Philosophical Papers and Letters: A Selection*. Edited and translated by Leroy E. Loemker. 2nd ed. Vol. 2. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989.

Leucippus and Democritus. *The Atomists: Leucippus and Democritus; Fragments*. Translated by Christopher C. W. Taylor. Toronto: University of Toronto Press, 1999.

Liberati, Stefano, Sebastiano Sonego, and Matt Visser. “Faster-Than-C Signals, Special Relativity, and Causality.” *Annals of Physics* 298, no. 1 (May 25, 2002): 167–85.

Lieb, Elliott H., and Derek W. Robinson. “The Finite Group Velocity of Quantum Spin Systems.” *Communications in Mathematical Physics* 28, no. 3 (September 1972): 251–57.

Lightman, Alan P. “Magic on the Mind: Physicists’ Use of Metaphor.” *The American Scholar* 58, no. 1 (Winter 1989): 97–101.

Lightman, Alan P., and Roberta Brawer. *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.

Lincoln, Don. “Proving Special Relativity: Episode 2.” *Physics in a Nutshell, Fermilab Today*, April 4, 2014.

List, Christian. “Free Will, Determinism, and the Possibility of Doing Otherwise.” *Noûs* 48, no. 1 (March 2014): 156–78.

Lloyd, Geoffrey Ernest Richard. *Early Greek Science: Thales to Aristotle*. London: Chatto and Windus, 1970. Reprint, New York: W. W. Norton, 1974.

Lodge, Oliver. *Modern Views of Electricity*. London, 1889.

Loll, Renate, Jan Ambjørn, and Jerzy Jurkiewicz. “The Universe from Scratch.” *Contemporary Physics* 47, no. 2 (March 2006): 103–17.

Lowe, David A., Joseph Polchinski, Leonard Susskind, LÁrus Thorlacius, and John Uglum. “Black Hole Complementarity Versus Locality.” *Physical Review D* 52, no. 12 (December 15, 1995): 6997–7012.

Lucretius. *The Nature of Things*. Translated by A. E. Stallings, New York: Penguin Classics, 2007.

Lyre, Holger. “Holism and Structuralism in U (1) Gauge Theory.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 35, no. 4 (December 2004): 643–70.

Macchetto, F. Duccio, and Mark Dickinson. “Galaxies in the Young Universe.” *Scientific American* (May 1997): 92–99.

Mach, Ernst. *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*. Translated by Philip E. B. Jourdain. Chicago: Open Court Publishing, 1911.

— — . *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. Translated by Thomas J. McCormack. 4th ed. Chicago: Open Court Publishing, 1919. First published 1893.

Malament, David B. "In Defense of Dogma: Why There Cannot Be a Relativistic Quantum Mechanics of (Localizable) Particles." In *Perspectives on Quantum Reality: Non-Relativistic, Relativistic, and Field-Theoretic*, edited by Rob Clifton, 1–10. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

Maldacena, Juan, and Leonard Susskind. "Cool Horizons for Entangled Black Holes." *Fortschritte Der Physik* 61, no. 9 (September 2013): 781–811.

Mandelstam, Stanley. "Quantum Electrodynamics Without Potentials." *Annals of Physics* 19, no. 1 (July 1962): 1–24.

Mangano, Michelangelo L., and Stephen J. Parke. "Multi-Parton Amplitudes in Gauge Theories." *Physics Reports* 200, no. 6 (February 1991): 301–67.

Markopoulou, Fotini. "Space Does Not Exist, So Time Can." arXiv.org, September 10, 2009.

Markopoulou, Fotini, and Robert Lawrence Kuhn. "Why Is the Universe So Breathtaking?" Webcast, *Closer to Truth*, produced by the Kuhn Foundation, August 15, 2013.

Markopoulou, Fotini, and Lee Smolin. "Causal Evolution of Spin Networks." *Nuclear Physics B* 508, nos. 1–2 (December 22, 1997): 409–30.

— — . "Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States." *Classical and Quantum Gravity* 24, no. 15 (August 7, 2007): 3813–23.

— — . "Quantum Theory from Quantum Gravity." *Physical Review D* 70, no. 12 (December 23, 2004): 124029.

Marolf, Donald. "Discussion: Holography and Unitarity in Black Hole Evaporation," Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA, April 27, 2012.

— — . "Holographic Thought Experiments." *Physical Review D* 79, no. 2 (January 29, 2009).

— — . "Holography Without Strings?" *Classical and Quantum Gravity* 31, no. 1 (January 2014).

— — . "Unitarity and Holography in Gravitational Physics." *Physical Review D* 79, no. 4 (February 9, 2009).

Martinec, Emil J. "Evolving Notions of Geometry in String Theory." *Foundations of Physics* 43, no. 1 (January 2013): 156–73.

Martinec, Emil J., Daniel Robbins, and Savdeep Sethi. "Toward the End of Time." *Journal of High Energy Physics*, no. 8 (August 1, 2006).

Mates, Benson. *The Philosophy of Leibniz: Metaphysics and Language*. New York: Oxford University Press, 1986.

Mathur, Samir D. "The Information Paradox: A Pedagogical Introduction." *Classical and Quantum Gravity* 26, no. 22 (November 21, 2009).

Matteucci, Giorgio, and Giulio Pozzi. "New Diffraction Experiment on the Electrostatic Aharonov-Bohm Effect." *Physical Review Letters* 54, no. 23 (June 10, 1985): 2469–72.

Mattle, Klaus, Harald Weinfurter, Paul G. Kwiat, and Anton Zeilinger. "Dense Coding in Experimental Quantum Communication." *Physical Review Letters* 76, no. 25 (June 17, 1996): 4656–59.

Maudlin, Tim. "Buckets of Water and Waves of Space: Why Spacetime Is Probably a Substance." *Philosophy of Science* 60, no. 2 (June 1993): 183–203.

— — . *New Foundations for Physical Geometry: The Theory of Linear Structures*. New York: Oxford University Press, 2014.

— — . "Part and Whole in Quantum Mechanics." In *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, edited by Elena Castellani, 46–60. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998.

— — . *Quantum Non- Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics*. 2nd ed. Malden, MA: Blackwell Publishers, 2002.

— — . "Special Relativity and Quantum Entanglement: How Compatible Are They?" Intersectional Symposium: The Concept of Reality in Physics, Dresden, Germany, March 16, 2011.

Maxwell, James Clerk. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Vol. 1. Oxford, 1873.

— — . *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Edited by W. D. Niven. Vol. 1. New York: Dover Publications, 1965.

— — . *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Edited by W. D. Niven. Vol. 2. New York: Dover Publications, 1965.

McCormmach, Russell. "Einstein, Lorentz, and the Electron Theory." *Historical Studies in the Physical Sciences* 2 (1970): 41–87.

— — . "H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature." *Isis* 61, no. 4 (Winter 1970): 459–97.

McFadden, Paul, and Kostas Skenderis. "Observational Signatures of Holographic Models of Inflation." In *The Twelfth Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories*, edited by Thibault Damour, Robert T. Jantzen, and Remo Ruffini, 2315–23. Hackensack, NJ: World Scientific, 2012.

McGoldrick, Monica, Randy Gerson, and Sueli S. Petry. *Genograms: Assessment and Intervention*. New York: W. W. Norton, 2008.

McMullin, Ernan. "The Explanation of Distant Action: Historical Notes." In Cushing and McMullin, *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, 272–302.

— — . "The Origins of the Field Concept in Physics." *Physics in Perspective* 4, no. 1 (February 2002): 13–39.

Mehlberrg, Henry. *Time, Causality, and the Quantum Theory*. Vol. 1, *Essay on the Causal Theory of Time*. Vol. 2, *Time in a Quantized Universe*. Edited by Robert Sonné Cohen. Studies in the Philosophy of Science 19. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1980.

Melfos, Vasilios, Bruno Helly, and Panagiotis Voudouris. "The Ancient Greek Names 'Magnesia' and 'Magnetes' and Their Origin from the Magnetite Occurrences at the Mavrovouni Mountain of Thessaly, Central Greece. A Mineralogical — Geochemical Approach." *Archaeological and Anthropological Sciences* 3 (2011): 165–72.

Mermin, N. David. "Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory." *Physics Today* 38, no. 4 (April 1985): 38–47.

Meschini, Diego, Markku Lehto, and Johanna Piilonen. "Geometry, Pregeometry and Beyond." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 36, no. 3 (September 2005): 435–64.

Mielczarek, Jakub. "Asymptotic Silence in Loop Quantum Cosmology." In *Multiverse and Fundamental Cosmology*, edited by Mariusz P. Dąbrowski, Adam Balcerzak, and Tomasz Denkwicz, 81–84. AIP Conference Proceedings 1514. Melville, NY: American Institute of Physics, 2013.

Milburn, Gerard J. *The Feynman Processor: Quantum Entanglement and the Computing Revolution*. New York: Basic Books, 1998.

Miller, Arthur I. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)*. New York: Springer, 1997. First published 1981 by Addison-Wesley.

Minkowski, Hermann, with notes by Arnold Sommerfeld. "Raum Und Zeit." In *Das Relativitätsprinzip: Eine Sammlung von Abhandlungen*, edited by H. A. Lorentz, Albert Einstein, and Hermann Minkowski, 54–71. Fortschritte Der Mathematischen Wissenschaften in Monographien. Leipzig: Vieweg+Teubner Verlag, 1923.

Mischel, Theodore. "Pragmatic Aspects of Explanation." *Philosophy of Science* 33, nos. 1–2 (January 1966): 40–80.

Misner, Charles W. "Feynman Quantization of General Relativity." *Reviews of Modern Physics* 29, no. 3 (July 1957): 497–509.

— — . "Mixmaster Universe." *Physical Review Letters* 22, no. 20 (May 19, 1969): 1071–74.

Misner, Charles W., and John Archibald Wheeler. "Classical Physics as Geometry." *Annals of Physics* 2, no. 6 (December 1957): 525–603.

Misner, Charles W., Kip S. Thorne, and John Archibald Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman, 1973.

Mitchell, Edward Page. "The Clock That Went Backward." In *The Time Traveler's Almanac*, edited by Ann VanderMeer and Jeff VanderMeer, 450–59. New York: Tor, 2014.

Mitroff, Ian I. "Norms and Counter- Norms in a Select Group of the Apollo Moon Scientists: A Case Study of the Ambivalence of Scientists." *American Sociological Review* 39, no. 4 (August 1973): 579–95.

Morong, William, Alexander Ling, and Daniel Oi. "Quantum Optics for Space Platforms." *Optics and Photonics News* 23, no. 10 (2012): 42–49.

Morus, Iwan Rhys. *When Physics Became King*. Chicago: University of Chicago Press, 2005.

Musser, George. *The Complete Idiot's Guide to String Theory*. New York: Alpha Books, 2008.

— — . "Could Time End?" *Scientific American*, September 2010.

— — . "Forces of the World, Unite!" *Scientific American*, September 2004.

— — . "George and John's Excellent Adventures in Quantum Entanglement." *Observations*, *Scientific American* blog, January 30, 2012.

— — . "How to Build the World's Simplest Particle Detector." *Critical Opalescence*, *Scientific American* blog, October 15, 2012.

— — . “How to Build Your Own Quantum Entanglement Experiment, Part 2 (of 2).” *Critical Opalescence*, February 14, 2013.

— — . “What Happens to Google Maps When Tectonic Plates Move?” *Critical Opalescence*, November 11, 2013.

Nastase, Horatiu. “The RHIC Fireball as a Dual Black Hole.” arXiv.org, January 10, 2005.

Needham, Joseph, and Wang Ling. *Science and Civilisation in China*. Vol. 4, Part 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

Nerlich, Graham. *The Shape of Space*. New York: Cambridge University Press, 1976.

Newstead, Anne G. J. “Aristotle and Modern Mathematical Theories of the Continuum.” In *Aristotle and Contemporary Science*, edited by Demetra Sfendoni-Mentzou, J. Hattiangadi, and David M. Johnson, 2:113–29. Frankfurt: Peter Lang, 2001.

Newton, Isaac. *Isaac Newton: Philosophical Writings*. Edited by Andrew Janiak. New York: Cambridge University Press, 2004.

— — . *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*. 2 vols. Translated by Andrew Motte. London, 1803.

Newton, T. D., and Eugene Paul Wigner. “Localized States for Elementary Systems.” *Reviews of Modern Physics* 21, no. 3 (1949): 400–406.

Nikogosyan, D. N. “Beta Barium Borate (BBO).” *Applied Physics A: Solids and Surfaces* 52, no. 6 (1991): 359–68.

Nishioka, Tatsuma, Shinsei Ryu, and Tadashi Takayanagi. “Holographic Entanglement Entropy: An Overview.” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 42, no. 50 (December 2, 2009).

Norton, John D. “Einstein’s Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics Prior to 1905.” *Archive for History of Exact Sciences* 59, no. 1 (November 2004): 45–105.

Nozick, Robert. *Invariances: The Structure of the Objective World*. Cambridge, MA: Belknap Press, 2001.

O’Connell, A. D., M. Hofheinz, M. Ansmann, Radoslaw C. Bialczak, M. Lenander, Erik Lucero, M. Neeley, D. Sank, H. Wang, M. Weides, J. Wenner, John M. Martinis, and A. N. Cleland. “Quantum Ground State and Single-Phonon Control of a Mechanical Resonator.” *Nature* 464, no. 7289 (March 17, 2010): 697–703.

OK Go. “This Too Shall Pass.” YouTube, March 1, 2010.

Oriti, Daniele, ed. *Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space, Time and Matter*. New York: Cambridge University Press, 2009.

Pais, Abraham. *Einstein Lived Here*. New York: Oxford University Press, 1994.

Pauli, Wolfgang. “The Connection Between Spin and Statistics.” *Physical Review* 58, no. 8 (October 15, 1940): 716–22.

Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Alfred A. Knopf, 2005.

Perkins, Ceri, and Sergei Malyukov. "Cables: The 'Blood Vessels' of ATLAS." *ATLAS Experiment*, "ATLAS News," January 2008.

Peskin, Michael E., and Daniel V. Schroeder. *An Introduction to Quantum Field Theory*. Boulder, CO: Westview Press, 1995.

Pettit, Philip. *The Common Mind: An Essay on Psychology, Society, and Politics*. New York: Oxford University Press, 1993.

Planck Collaboration. "Planck 2013 Results. XVI. Cosmological Parameters." *Astronomy and Astrophysics* 571 (October 29, 2014).

— — . "Planck Intermediate Results. XXX. The Angular Power Spectrum of Polarized Dust Emission at Intermediate and High Galactic Latitudes." *Astronomy and Astrophysics* (forthcoming). Published electronically September 22, 2014.

Popescu, Sandu. "Bell's Inequalities and Density Matrices: Revealing 'Hidden' Non-locality." *Physical Review Letters* 74, no. 14 (April 3, 1995): 2619–22.

Popper, Karl R. "Bell's Theorem: A Note on Locality." In Vol. 1 of *Microphysical Reality and Quantum Formalism*, edited by Alwyn van der Merwe, Franco Selleri, and Gino Tarozzi, 413–17. Proceedings of the Eponymous Conference, Urbino, Italy, September 25 — October 3, 1985. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.

— — . *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Vol. 3 of *The Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, edited by W. W. Bartley III. London: Routledge, 1992.

— — . "Three Views Concerning Human Knowledge." Chap. 3 in *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 97–119. London: Routledge, 1965.

Powers, Thomas. *Heisenberg's War: The Secret History of the German Bomb*. New York: Alfred A. Knopf, 1993.

Prescod-Weinstein, Chanda, and Lee Smolin. "Disordered Locality as an Explanation for the Dark Energy." *Physical Review D* 80, no. 6 (September 3, 2009).

Price, Huw. *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. New York: Oxford University Press, 1996.

Prutchi, David, and Shanni R. Prutchi. *Exploring Quantum Physics Through Hands-On Projects*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2012.

Ramsey, Norman F. *Spectroscopy with Coherent Radiation: Selected Papers of Norman F. Ramsey*. Hackensack, NJ: World Scientific, 1998.

Randall, Lisa, and Raman Sundrum. "A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension." arXiv.org, May 4, 1999.

Rayleigh, Lord. "The Dynamical Theory of Gases and of Radiation." *Nature* 72, no. 1855 (May 18, 1905): 54–55.

Redhead, Michael. *Incompleteness, Nonlocality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: Oxford University Press, 1987.

— — . "More Ado About Nothing." *Foundations of Physics* 25, no. 1 (January 1995): 123–37.

Redner, S. "Citation Statistics from More Than a Century of Physical Review." arXiv.org, July 27, 2004.

Retzker, Alex, J.I. Cirac, and Benni Reznik. "Detecting Vacuum Entanglement in a Linear Ion Trap." *Physical Review Letters* 94, no. 5 (February 2005).

Reznik, Benni. "Distillation of Vacuum Entanglement to EPR Pairs." arXiv.org, August 1, 2000.

Rickles, Dean. "AdS/CFT Duality and the Emergence of Spacetime." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 44, no. 3 (2013): 312–20.

— — . *Symmetry, Structure, and Spacetime*. New York: Elsevier, 2008.

Riemann, Bernhard Georg. "On the Hypotheses Which Lie at the Bases of Geometry." *Nature* 8, nos. 183–84 (May 8, 1873): 14–17, 36–37.

Ritz, Walther. "Recherches critiques sur l'électrodynamique générale." *Annales de chimie et de physique* 13 (1908): 145–275.

Rohrlich, Daniel, and Sandu Popescu. "Nonlocality as an Axiom for Quantum Theory." arXiv.org, August 9, 1995.

Rosenfeld, Léon. "Niels Bohr in the Thirties: Consolidation and Extension of the Conception of Complementarity." In *Niels Bohr: His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues*, edited by Stefan Rozental, 114–36. Amsterdam: North Holland, 1967.

Rossi, Paolo. *Francis Bacon: From Magic to Science*. Translated by Sacha Rabinovitch. Chicago: University of Chicago Press, 1978.

Rovelli, Carlo. "Forget Time." Essay written for the Foundational Questions Institute Essay Contest, The Nature of Time, August 24, 2008.

— — . "Aristotle's Physics: A Physicist's Look." arXiv.org, December 14, 2013.

— — . *Quantum Gravity*. New York: Cambridge University Press, 2004.

Rowling, J. K. *Harry Potter and the Sorcerer's Stone*. New York: Scholastic, 1998.

Rozali, Moshe. "Comments on Background Independence and Gauge Redundancies." arXiv.org, September 23, 2008.

Ruijsenaars, S. N. M. "On Newton-Wigner Localization and Superluminal Propagation Speeds." *Annals of Physics* 137, no. 1 (November 1981): 33–43.

Saari, Donald G., and Zhihong Xia. "Off to Infinity in Finite Time." *Notices of the AMS* 42, no. 5 (May 1995): 538–46.

Sabín, C., J. J. García-Ripoll, E. Solano, and J. León. "Dynamics of Entanglement via Propagating Micro wave Photons." *Physical Review B* 81, no. 18 (May 2010).

Sachdev, Subir. "Strange and Stringy." *Scientific American*, January 2013, 44–51.

Sack, Robert David. "Magic and Space." *Annals of the Association of American Geographers* 66, no. 2 (1976): 309–21.

Safranski, Rüdiger. *Schopenhauer and the Wild Years of Philosophy*. Translated by Ewald Osers. London: Weidenfeld and Nicolson, 1989. Reprint, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1991.

Saint Thomas Aquinas. *The Summa Theologica of Saint Thomas Aquinas*. Vol. 1. Translated by Fathers of the English Dominican Province. Revised by Daniel J. Sullivan. Great Books of the Western World 19. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952.

Salmon, Wesley C. *Causality and Explanation*. New York: Oxford University Press, 1998.

Sarovar, Mohan, Akihito Ishizaki, Graham R. Fleming, and K. Birgitta Whaley. "Quantum Entanglement in Photosynthetic Light-Harvesting Complexes." *Nature Physics* 6 (April 25, 2010): 462–67.

Schachner, Nat. "Ancestral Voices." *Astounding Stories*, December 1933.

Schilpp, Paul Arthur, ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. The Library of Living Philosophers, Vol. 7. Chicago: Northwestern University Press, 1949. Reprint, New York: MJF Books, 2001.

Schlick, Moritz. *General Theory of Knowledge*. Edited by Herbert Feigl. Translated by Albert E. Blumberg. Chicago: Open Court Publishing Company, 2002.

Schlosshauer, Maximilian, Johannes Kofler, and Anton Zeilinger. "A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics." *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 44, no. 3 (August 2013): 222–30.

Schmidt, Maarten. "3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift." *Nature* 197, no. 4872 (March 16, 1963): 1040.

Schrödinger, Erwin. "Discussion of Probability Relations Between Separated Systems." *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31, no. 4 (October 1935): 555–63.

— — . "On Einstein's Gas Theory." *Physikalische Zeitschrift* 27 (1926): 95–101.

— — . "Quantisation as a Problem of Proper Values (Part IV)." In *Collected Papers on Wave Mechanics*, 3rd (augmented) ed., 102–23. AMS Chelsea Publishing. Providence, RI: American Mathematical Society, 2003.

— — . *Science and the Human Temperament*. Translated by James Murphy. London: George Allen and Unwin, 1935.

Schutz, Bernard. *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity*. New York: Cambridge University Press, 2003.

Schwartz, H. M. "Einstein's Comprehensive 1907 Essay on Relativity, Part 1." *American Journal of Physics* 45, no. 6 (June 1977): 512–17.

Schweber, Silvan S. *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994.

Seiberg, Nathan. "Emergent Spacetime." In *The Quantum Structure of Space and Time: Proceedings of the 23rd Solvay Conference on Physics, Brussels, Belgium, 1–3 December, 2005*, edited by David J. Gross, Marc Henneaux, and Alexander Sevrin, 163–78. Hackensack, NJ: World Scientific, 2007.

Sekino, Yasuhiro, and Leonard Susskind. "Fast Scramblers." *Journal of High Energy Physics* 2008, no. 10 (October 15, 2008).

Shimony, Abner. "Aspects of Nonlocality in Quantum Mechanics." In *Quantum Mechanics at the Crossroads: New Perspectives from History, Philosophy*

and *Physics*, edited by James Evans and Alan S. Thorndike, 107–23. New York: Springer, 2007.

— — . “Conceptual Foundations of Quantum Mechanics.” In *The New Physics*, edited by Paul Davies, 373–95. New York: Cambridge University Press, 1989. Reprint, 1992.

Simplicius. *On Aristotle’s Physics 6*. Ancient Commentators on Aristotle, edited by David Konstan. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1989.

Sivers, Derek. “How to Start a Movement.” TED Conference, Long Beach, CA, February 2010.

Slowik, Edward. “The Deep Metaphysics of Quantum Gravity: The Seventeenth Century Legacy and an Alternative Ontology Beyond Substantivalism and Relationism.” *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 44, no. 4 (November 2013): 490–99.

— — . “The ‘Properties’ of Leibnizian Space: Whither Relationism?” *Intellectual History Review* 22, no. 1 (March 2012): 107–29.

Smerlak, Matteo, and Carlo Rovelli. “Relational EPR.” *Foundations of Physics* 37, no. 3 (March 2007): 427–45.

Smith, D. Eric, and Duncan K. Foley. “Classical Thermodynamics and Economic General Equilibrium Theory.” *Journal of Economic Dynamics and Control* 32, no. 1 (January 2008): 7–65.

Smolin, Lee. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press, 1997.

— — . “The Case for Background Independence.” In *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, edited by Dean Rickles, Steven French, and Juha T. Saatsi, 196–239. New York: Oxford University Press, 2006.

— — . *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

Sorkin, Rafael D. “Does Locality Fail at Intermediate Length-Scales?” In Oriti, *Approaches to Quantum Gravity*, 26–43.

Spekkens, Robert W. “The Paradigm of Kinematics and Dynamics Must Yield to Causal Structure.” arXiv.org, August 31, 2012.

Stachel, John. *Einstein from ‘B’ to ‘Z.’* Einstein Studies 9. The Center for Einstein Studies, Boston University. Boston: Birkhäuser, 2002.

Stamatellos, Giannis. *Plotinus and the Presocratics: A Philosophical Study of Presocratic Influences in Plotinus’ Enneads*. Albany: State University of New York Press, 2007.

Stanley, H. E., L. A. N. Amaral, P. Gopikrishnan, P. Ch. Ivanov, T. H. Keitt, and V. Plerou. “Scale Invariance and Universality: Organizing Principles in Complex Systems.” *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 281, nos. 1–4 (June 15, 2000): 60–68.

Stapp, Henry. “Space and Time in S-Matrix Theory.” *Physical Review* 139, no. 1 (July 12, 1965): B257–70.

Stauffer, Robert C. “Speculation and Experiment in the Background of Oersted’s Discovery of Electromagnetism.” *Isis* 48, no. 1 (March 1957): 33–50.

Steinhardt, Paul J. “The Inflation Debate.” *Scientific American*, April 2011.

Stone, A. Douglas. *Einstein and the Quantum: The Quest of the Valiant Swabian*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013.

Strocchi, F. "Gauss' Law in Local Quantum Field Theory." In *Field Theory, Quantization and Statistical Physics: In Memory of Bernard Jauvet*, edited by E. Tirapegui, 227–36. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1981.

— —. "Relativistic Quantum Mechanics and Field Theory." *Foundations of Physics* 34, no. 3 (March 2004): 501–27.

Strominger, Andrew. "Inflation and the dS/CFT Correspondence." *Journal of High Energy Physics* 2001, no. 11 (November 2001).

Stuewer, Roger H. "The Experimental Challenge of Light Quanta." In *The Cambridge Companion to Einstein*, edited by Michel Janssen and Christoph Lehner, 143–66. New York: Cambridge University Press, 2014.

Stump, Eleonore, and Norman Kretzmann. "Eternity." *The Journal of Philosophy* 78, no. 8 (August 1981): 429–58.

Summers, Stephen J., and Reinhard Werner. "The Vacuum Violates Bell's Inequalities." *Physics Letters A* 110, no. 5 (July 29, 1985): 257–59.

Sundrum, Raman. "From Fixed Points to the Fifth Dimension." *Physical Review D* 86, no. 8 (October 2012).

Suppes, Patrick. "Descartes and the Problem of Action at a Distance." *Journal of the History of Ideas* 15, no. 1 (January 1954): 146–52.

Surowiecki, James. *The Wisdom of Crowds: Why the Many Are Smarter Than the Few and How Collective Wisdom Shapes Business, Economies, Societies, and Nations*. New York: Doubleday, 2004.

Susskind, Leonard. *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*. New York: Little, Brown, 2005.

Susskind, Leonard, and Edward Witten. "The Holographic Bound in Anti — de Sitter Space." arXiv.org, May 19, 1998.

Swingle, Brian. "Constructing Holographic Spacetimes Using Entanglement Renormalization." arXiv.org, September 14, 2012.

Tait, Peter Guthrie. *Properties of Matter*. Edinburgh, 1885.

Taylor, A. E. "Parmenides, Zeno, and Socrates." *Proceedings of the Aristotelian Society* 16 (1915): 234–89.

Taylor, Paul, Rich Morin, D'Vera Cohn, and Wendy Wang. "American Mobility: Who Moves? Who Stays Put? Where's Home?" Pew Research Center, December 29, 2008.

Tegmark, Max. "Parallel Universes." *Scientific American*, May 2003.

Teller, Paul. *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994.

't Hooft, Gerard. "Dimensional Reduction in Quantum Gravity." In *Salamfestschrift: A Collection of Talks From the Conference on Highlights of Particle and Condensed Matter Physics, ICTP, Trieste, Italy, 8–12 March 1993*, edited by Ahmed Ali, John Ellis, and S. Randjbar-Daemi, 284–96. Hackensack, NJ: World Scientific, 1994.

— —. "Discreteness and Determinism in Superstrings." arXiv.org, July 16, 2012.

— — . “The Future of Quantum Mechanics.” Opening event, Emergent Quantum Mechanics 2013, 2nd International Symposium About Quantum Mechanics Based on a “Deeper Level Theory,” Vienna, Austria, October 3–6, 2013.

Thucydides. *History of the Peloponnesian War*. Translated by Rex Warner. London: Penguin Books, 1954.

Thurschwell, Pamela. *Literature, Technology and Magical Thinking, 1880–1920*. New York: Cambridge University Press, 2001.

Tollaksen, Jeff, Yakir Aharonov, Aharon Casher, Tirzah Kaufherr, and Shmuel Nussinov. “Quantum Interference Experiments, Modular Variables and Weak Measurements.” *New Journal of Physics* 12, no. 1 (January 2010).

Traweek, Sharon. *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988. Reprint, 1992.

Trimmer, John D. “The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger’s ‘Cat Paradox’ Paper.” *Proceedings of the American Philosophical Society* 124, no. 5 (October 10, 1980): 323–38.

Unruh, William G. “Minkowski Space-Time and Quantum Mechanics.” In *Minkowski Spacetime: A Hundred Years Later*, edited by Vesselin Petkov, 133–48. New York: Springer, 2010.

— — . “Time, Gravity, and Quantum Mechanics.” In Savitt, *Time’s Arrows Today*, 23–65.

Ursin, Rupert, F. Tiefenbacher, T. Schmitt-Manderbach, H. Weier, Thomas Scheidl, M. Lindenthal, B. Blauensteiner, et al. “Entanglement-Based Quantum Communication Over 144 Km.” *Nature Physics* 3 (July 2007): 481–86.

Vachaspati, Tanmay, and Mark Trodden. “Causality and Cosmic Inflation.” *Physical Review D* 61, no. 2 (December 16, 1999).

Valentini, Antony. “Beyond the Quantum.” *Physics World* 22, no. 11 (November 2009): 32–37.

van Fraassen, Bas C. *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. New York: Oxford University Press, 1991.

van Lunteren, Frans H. “Framing Hypotheses: Conceptions of Gravity in the 18th and 19th Centuries.” PhD diss., Utrecht University, 1991.

— — . “Gravitational and Nineteenth-Century Physical Worldviews.” In *Newton’s Scientific and Philosophical Legacy*, edited by Paul B. Scheurer and G. Debrock. New York: Springer, 1988.

— — . “Nicolas Fatio de Duillier on the Mechanical Cause of Universal Gravitation.” In *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage’s Theory of Gravitation*, edited by Matthew R. Edwards, 41–59. Montréal: Apeiron, 2002.

Van Raamsdonk, Mark. “Building Up Spacetime with Quantum Entanglement.” *General Relativity and Gravitation* 42, no. 10 (June 19, 2010): 2323–29.

Vedral, Vlatko. “High-Temperature Macroscopic Entanglement.” *New Journal of Physics* 6 (August 9, 2004).

Verlinde, Erik P. “The Dark Phase Space of de Sitter,” Bits, Branes, Black Holes, Santa Barbara, CA, April 3, 2012.

Von Plato, Jan. *Creating Modern Probability: Its Mathematics, Physics and Philosophy in Historical Perspective*. New York: Cambridge University Press, 1994.

Wald, Robert M. "Correlations and Causality in Quantum Field Theory." In *Quantum Concepts in Space and Time*, edited by Roger Penrose and C. J. Isham, 293–301. New York: Oxford University Press, 1986.

Wallace, David. *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*. New York: Oxford University Press, 2012.

Weatherall, James Owen. "The Scope and Generality of Bell's Theorem." *Foundations of Physics* 43, no. 9 (September 2013): 1153–69.

Weinberg, Steven. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. New York: John Wiley and Sons, 1972.

—. "The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field Theory." *Daedalus* 106, no. 4 (Autumn 1977): 17–35.

Wen, Xiao-Gang. "Topological Order: From Long-Range Entangled Quantum Matter to a Unified Origin of Light and Electrons." *ISRN Condensed Matter Physics* 2013 (2013).

Westfall, Richard Samuel. "Newton and Alchemy." In *Occult and Scientific Mentalities in the Renaissance*, edited by Brian Vickers, 315–35. New York: Cambridge University Press, 1984.

—. "Newton and the Hermetic Tradition." In *Science, Medicine, and Society in the Renaissance: Essays to Honor Walter Pagel*, edited by Allen G. Debus, 2:183–98. New York: Science History Publications, 1972.

—. *The Construction of Modern Science: Mechanisms and Mechanics*. New York: Cambridge University Press, 1971.

—. *The Life of Isaac Newton*. New York: Cambridge University Press, 1993.

Wheeler, John Archibald, and Richard P. Feynman. "Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action." *Reviews of Modern Physics* 21, no. 3 (July — September 1949): 425–33.

Whitaker, Andrew. "John Bell in Belfast: Early Years and Education." In *Quantum (Un) Speakables: From Bell to Quantum Information*, edited by R. A. Bertlmann and A. Zeilinger, 7–20. New York: Springer, 2002.

Wijsman, Ellen M., and Luigi Luca Cavalli-Sforza. "Migration and Genetic Population Structure with Special Reference to Humans." *Annual Review of Ecology and Systematics* 15 (November 1984): 279–301.

Wilczek, Frank. "Quantum Field Theory." *Reviews of Modern Physics* 71, no. 2 (March 1999): S85 — S95.

Williams, Leslie Pearce. *Michael Faraday: A Biography*. New York: Da Capo Press, 1971.

—. *The Origins of Field Theory*. Lanham, MD: University Press of America, 1980.

Wilson, Robert Woodrow. "The Cosmic Microwave Background Radiation." Nobel Lecture, Stockholm, December 8, 1978.

Wiseman, Howard M., S. J. Jones, and A. C. Doherty. "Steering, Entanglement, Non-locality, and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox." *Physical Review Letters* 98, no. 14 (April 6, 2007).

Witten, Edward. "Anti — de Sitter Space, Thermal Phase Transition, and Confinement in Gauge Theories." *Advances in Theoretical and Mathematical Physics* 2, no. 3 (1998): 505–32.

— — . "An Interpretation of Classical Yang-Mills Theory." *Physics Letters B* 77, nos. 4–5 (August 28, 1978): 394–98.

— — . "Perturbative Gauge Theory as a String Theory in Twistor Space." *Communications in Mathematical Physics* 252, nos. 1–3 (December 2004): 189–258.

— — . "Reflections on the Fate of Spacetime." *Physics Today* 49, no. 4 (April 1996): 24–30.

Wright, Jessey. "Quantum Field Theory: Motivating the Axiom of Microcausality." Master's thesis, University of Waterloo, 2012.

Wu, Tai Tsun, and Chen Ning Yang. "Concept of Nonintegrable Phase Factors and Global Formulation of Gauge Fields." *Physical Review D* 12, no. 12 (December 15, 1975): 3845–57.

Yates, Frances A. *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*. Chicago: University of Chicago Press, 1964. Reprint, 1991.

Zahar, Elie. "Why did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II)." *British Journal for the Philosophy of Science* 24, no. 3 (September 1973): 223–62.

Zee, Anthony. *Quantum Field Theory in a Nutshell*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2010.

Zeilinger, Anton. "On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics." In *Vastakohtien Todellisuus: Festschrift for Professor K. V. Laurikainen*, edited by Urho Ketvel et al., 167–78. Helsinki: Helsinki University Press, 1996.

— — . "Testing Concepts of Reality with Entangled Photons in the Laboratory and Outside." *Intersectional Symposium: The Concept of Reality in Physics*, Dresden, Germany, March 16, 2011.

Zel'dovich, Yakov B. "Particle Production in Cosmology." *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 12, no. 9 (November 10, 1970): 307–11.

Zimbardo, Philip. *The Lucifer Effect: Understanding How Good People Turn Evil*. New York: Random House, 2008.

Благодарности

Одной из причин, по которым мне нравится писать о физике, является то, что физики и философы-физики не жалеют времени на разговоры и благосклонно относятся к бесконечным вопросам. Многим я благодарен за проработку моей рукописи, среди них Нима Аркани-Хамед, Джон Баеэс, Джулиан Барбур, Рафаэль Буссо, Шон Кэрролл, Артур Экерт, Энрике Гальвез, Алан Гут, Ханс Халворсон, Алиосия Хамма, Джон Хенри, Сабин Хоссенфельдер, Дон Ховард, Ник Хаггетт, Дженанн Исмаэль, Дэвид Кайзер, Мейнард Кульман, Фитини Маркопоулоу, Дональд Маролф, Эмиль Мартинек, Лайонель Мейсон, Тим Модлин, Чед Орцел, Джо Полчински, Хью Прайс, Дин Риклес, Карло Ровелли, Моше Розали, Костас Скендерис, Брайан Свингл, Джефф Толлаксен, Дэвид Тонг, Ярослав Трнка, Марк Ван Раамсдонк и Дэвид Уоллес.

Мне посчастливилось провести осень 2011 г. в Центре квантовых технологий Национального университете Сингапура по приглашению его директора Артура Экерта и менеджера по просветительской работе Дженни Хоган. Институт фундаментальных вопросов предоставил мини-грант для поездки, а компания Theiss Research предоставила транспорт. Институт теоретической физики Кавли принимал меня весной 2012 г. по приглашению тогдашнего директора Дэвида Гросса. Я бесконечно благодарен моему руководству в журнале *Scientific*

American в лице Мариетт Ди Кристины, Фреда Гутерла и Рики Растина за то, что они не спустили на меня всех собак в ответ на просьбу о небольшом творческом отпуске. Совершенно неожиданно они отнеслись с пониманием к этой идее, хотя мое отсутствие в офисе вряд ли сделало их работу легче.

Я также благодарю ряд других организаций за финансирование моих поездок, в частности Скандинавский институт теоретической физики и Институт фундаментальных вопросов, за поездку на семинар «Нелокальность: аспекты и последствия» в Стокгольме в июне 2012 г.; фонд Фетцера Франклина за поездку на симпозиум «Эмерджентная квантовая механика» в Вене в октябре 2013 г.; Отделение логики и философии науки Калифорнийского университета за поездку на конференцию «Фундаментальные аспекты калибровочных теорий» в Ирвайне в марте 2014 г.

Я не добрался бы даже до середины моего проекта, если бы не моральная поддержка со стороны Дэвида Биелла, Ли Биллинса, Стива Колайера, Аманды Гефтер, Дэвида Гринспуна, Лесли Муллена и Любы Осташевски. Они ободряли меня на протяжении всей работы.

Джен Кристиансен, коллега по *Scientific American* и друг, подготовила многие рисунки. Эйдриан Матиоветц сделала фото на суперобложку после долгих поисков наилучшего ракурса в кампусе Массачусетского технологического института.

Аманда Мун — редактор, о котором мечтает каждый писатель: внимательная и готовая прийти на помощь, полная энтузиазма в отношении проекта и идей по его улучшению. Ее помощники Лэрд Галлахер и Скотт Борчерт, выпускающая команда, Элизабет Гордон и Нина Фриман, а также Дебра Хелфанд работали четко, как часовой механизм. Ну а за обложку мне нужно благодарить дизайнера Дженнифер Карроу. Энни Готтлиб, должно быть, видит все насквозь, если судить по ее литературной редакции. Брайн Джиттис проделал большую работу при подготовке списка литературы, я должен также поблагодарить оформителя книги Джонатана Липпинкотта.

Мне повезло, что обстоятельства, сложившиеся в результате Большого взрыва, свели меня с литературным агентом Сьюзан Рабинер.

Особая благодарность кафе Le Petit Parisien и Trend Coffee and Tea House в городке Монклер, штат Нью-Джерси, в которых я провел немало времени, занимаясь преобразованием кофеина и круассанов с миндалем в сочинение на тему физики.

Моя дочь Элиана здорово поддерживала меня, когда я сидел дома и писал. Когда я падал духом, она точно знала, что встряхнет меня и восстановит уверенность. И конечно, никто больше не мог дать мне такого глубокого чувства пространства и времени, как моя жена Талия. Я ощущал каждую милю, разделяющую нас, и каждое мгновение, проведенное порознь. К тому же она просто ходячая энциклопедия. Я посвящаю эту книгу ей и Элиане.





Об авторе

ДЖОРДЖ МАССЕР — известный журналист, пишущий редактор журнала *Scientific American* и автор книги «Руководство по теории струн для полного идиота» (*The Complete Idiot's Guide to String Theory*). Как популяризатор науки Массер получил премию Джонатана Эберхарта от Американского астрономического общества, а также премию Американского института физики в 2011 г. В 2014–2015 гг. он был участником программы Knight Science Journalism в Массачусетском технологическом институте. Его выступления можно увидеть в телешоу Today, на каналах CNN, NPR и BBC. Массер живет в Глен-Ридже, штат Нью-Джерси, с женой и дочерью. Следите за его постами в Twitter @gmusser и посетите веб-сайт www.georgemusser.com.





Предметно-именной указатель

А

Ааронов, Якир 195, 197, 198
Агриппа, Корнелиус 79, 80
Аквинский, Фома 74
Альберт, Дэвид 158, 231
Амплитуэдр 276, 277
Аристотель 12, 71–76, 80, 95,
227, 232
Аркини-Хамед, Нима 56–60,
190, 193, 228, 229, 273,
275–277, 279
Атомисты 68, 69, 72, 73, 83, 84,
117, 119, 199, 227, 232

Б

Баак, Дэвид ван 24
Барбур, Джулиан 230, 235, 238
Белл, Джон Стюарт 28, 32, 33,
34, 133, 138–143, 146, 150,
153, 155, 156, 158, 159,
162, 166, 169, 197
Берг, Мо 269
Берн, Цви 54–56, 58, 275
Бозон Хиггса 180
Большой адронный коллайдер
(БАК) 54, 55, 113

Большой взрыв 42, 142, 146,
165, 166, 228, 262, 263,
268
Бом, Дэвид 141, 156, 164, 165,
169, 170, 195, 197, 198,
244
Бор, Нильс 31, 32, 80, 117, 120–
124, 127, 128, 130–132,
135, 155, 269
Брана 250, 252–255, 262, 264
Бройль, Луи де 127, 139, 141
Бэкон, Фрэнсис 81, 84

В

Вигнер, Юджин 184
Виттен, Эдвард 39, 56, 274, 275
Волновая пластинка 26, 27
Волновая функция 122, 126, 129
Вольта, Алессандро 93

Г

Галилей, Галилео 82
Гальвани, Луиджи 93
Гальвез, Энрике 21–24, 26–29,
35, 43, 47, 53, 143

Гейзенберг, Вернер 122–124,
127, 128, 130, 131, 155,
183, 214, 269, 270

Геон 44

Герберт, Ник 144, 145

Герц, Генрих 177, 194

Гиббонс, Гари 208

Гиддингс, Стив 38–41, 51, 56,
60, 116, 145, 175, 176, 178,
218

Гильберт, Уильям 74, 84

Глюон 55

Гоббс, Томас 83

Горизонт событий 37, 40, 41

Граф 241, 263, 269

Гринблатт, Стивен 70

Грин, Брайан 17

Д

Даукер, Фэй 67

Декарт, Рене 75, 76, 80, 81, 83,
84, 91, 95

Демокрит 12, 68, 70, 72, 76, 80,
84, 91, 95, 118, 226

Джаррет, Джон 158

Диаграммы Фейнмана 54, 57,
185

Дирак, Поль 31, 179, 194

Доукер, Фэй 235

Дюильер, Никола Фатио де 89

Ж

Жизан, Николя 162, 169, 172, 173

З

Запутанность 21, 23, 24, 30, 33,
34, 41, 42, 52, 60, 62, 131,
143, 145, 146, 149, 150,
154, 161, 163, 167, 169,
171, 188, 190, 197, 218,
219, 231, 257, 260, 278

Зельдович, Яков 47

Зенон 65–67, 71, 214

И

Излучение

инфракрасное 36

микроволнового фонового 45

Изменение климата 19

Интерференция 97

Инфляция 49, 50

Исмаэль, Дженанн 171, 225, 226

К

Кабат, Дэниел 222

Калибровочная инвариантность
191, 192, 194, 195, 197,
206, 211, 223

Кант, Иммануил 14, 90–92, 94,
99, 107, 154

Качасо, Фредди 275

Квазар 44, 45

Квантовая гравитация 51, 52, 216

Квантовая механика 7, 8, 14, 15,
31, 33, 50, 57, 60, 70, 118,
122, 123, 125–127, 130,
132, 136–138, 142, 145,
146, 152, 157, 158, 162,
164, 169, 172, 176, 179,
182, 184, 187, 214, 217,
231, 249, 259, 281

Квантовое граффити 245, 250,
251, 262, 264, 265, 267

Квантовые монеты 24, 140, 143,
151, 169, 259

Кеплер, Иоганн 82, 84

Кифер, Клаус 245

Кларк, Сэмюел 85, 89

Копенгагенская интерпретация
124, 126, 129, 130, 132,
154

Коперник, Николай 58, 75, 84

Котс, Роджер 90

Крамер, Джон 119
Кротовые норы 44, 202–204,
259, 260, 262

Л

Лейбниц, Готтфрид 84–86,
89–91, 99, 112, 123, 228,
234, 236, 267
Леннон, Джон 81
Лоренц, Хендрик 104–106
Лукреций 68, 70, 75, 80
Люнтерен, Франс ван 63, 64

М

Магнетизм 73, 74, 77, 80, 82, 91,
94, 95, 97, 126, 196
Максвелл, Джеймс Клерк 100,
102, 103, 107, 181, 186,
191, 193, 198
Малдасена, Хуан 178, 222, 223,
259, 260
Маркопоулоу, Фотини 50, 51,
216, 245, 246, 248, 250,
259, 260, 263, 264, 273
Маролф, Дон 178, 199, 204–207,
210, 211
Мартинек, Эмиль 253, 264, 265,
268
Масштаб Планка 215
Матричная модель 250–254, 264
Мах, Эрнст 92, 93, 236
Мейсон, Лайонель 272, 273, 275
Мизнер, Чарльз 43, 44, 47, 48
Микропричинность 181, 189
Мирандола, Джованни Пико
делла 81
Митчелл, Эдвард Пейдж 115
Млечный Путь 36
Модлин, Тим 18, 19, 30, 32, 34,
35, 64, 135, 145, 149, 154,
156–159, 172, 233
Монада 89

Мотивированное суждение 142

Н

Нараян, Рамеш 35–37, 40
Натурфилософия 94
Некоммутативность 253
Ньютон, Исаак 15, 63, 65, 77,
82–90, 92–94, 96–98, 102–
104, 107–109, 111–113,
115, 116, 123, 141, 162,
170, 184, 201, 207, 229

О

Обратная причинно-
следственная связь 150,
157, 166
Обратная проблема 233
Операциональное мышление
108, 113

П

Парадокс абсолютной
делимости 66
пузыря 119, 126
Парменид 65–67, 78
Паули, Вольфганг 180
Пенлеве, Поль 115, 116
Пенроуз, Роджер 244, 272–275
Петлевая квантовая гравитация
177, 178, 245
Платон 65, 70, 78
Подольский, Борис 131
Поле
гравитационное 111, 210
направляющее 120, 141,
164, 165
Полчински, Джо 182, 216, 220
Поляризационный фильтр 26,
27, 29
Попеску, Санду 163, 164

- Принцип
голографический 221–223,
268
локальности 8, 16, 32, 37, 41,
62, 74, 76, 100, 118, 158,
183, 202, 246, 247, 255
неопределенности 128, 130,
131, 183
отделимости 69, 117, 169,
170
- Причинностное множество 234,
235
- Пространство-время 57, 60,
110, 112, 127, 172, 173,
200–202, 204–207, 209,
210, 216, 217, 228, 229,
233–235, 258, 259, 262,
264, 266, 272, 277
- Р**
- Раамсдонк, Марк Ван 258
Розали, Моше 233, 266
Розен, Натан 131
Рорлих, Даниэль 163, 164
- С**
- Самовзаимодействие 251–253
Сандрам, Раман 256
Сасскинд, Леонард 250, 252, 280
Сверхплотное кодирование 160
Сверхсветовая скорость 40, 41,
113, 115, 129, 165, 166
Свингл, Брайан 259, 260
Симметрия 9, 58, 123, 193, 225,
251, 252, 270
Сингулярность 115, 116, 209,
218, 231
Скрытый параметр 127
Смолин, Ли 232, 233, 259
Сократ 65, 66, 67
Сольве, Эрнест 126
- Статья ЭПР 131, 138, 145, 166
Стрельца созвездие 36, 37
Супердетерминизм 147, 148,
157, 165
Суперзапутанность 188, 218
Суперквантовая частица 163
- Т**
- Телепортация 23
Телескоп Hubble 43
Теория
гравитации 43, 44, 47, 51,
63, 84, 123, 176, 178, 207
квантовая 16, 30, 31, 33, 34,
37, 41, 51, 125, 127, 129,
135, 176, 178, 180–182,
184, 185, 187, 190, 191,
199, 212–214, 219, 245,
270–272
множественных миров 152
относительности 10, 14, 29,
31, 33, 34, 69, 110–113,
116, 119, 122, 123, 126,
149, 154, 166, 176, 177,
179–184, 199, 202, 204,
208, 209, 212–214, 218,
219, 223, 234, 259, 267
поля 177, 179, 180, 182, 187,
188, 190, 199, 214, 218,
223, 271
струн 39, 40, 51, 177, 178,
215, 233, 245, 250, 253,
256, 259, 273, 274, 275
твисторная 272–274
электромагнетизма 108, 177
Трнка, Ярослав 276, 277
- У**
- Уилер, Джон 44, 149, 229, 244
Ультралокальность 262

Унру, Билл 18, 19

Ф

Файн, Артур 118, 132, 136, 137,
148, 168–170

Фалес 66, 72

Фарадей, Майкл 97, 98, 100, 117,
132, 181, 191, 195

Фейнман, Ричард 54, 67, 78,
145, 179

Финкельштейн, Дэвид 244

Франклин, Бенджамин 91

Фрезер, Джеймс 79

Х

Халворсон, Ханс 182, 184–186,
188, 189, 273

Хеллер, Майкл 227, 260

Хили, Ричард 196–199

Ходжес, Эндрю 272, 276

Хокинг, Стивен 39–41, 43, 208,
218, 219, 265

Хофт'т, Герард 148, 165

Ц

Цайлингер, Антон 23, 29, 35,
154–161

Ч

Черная дыра 8, 16, 35–37, 39–44,
52, 59, 60, 62, 105, 116,
145, 175, 178, 208, 209,

217–221, 227, 228, 244,
259, 264, 265, 267

Чу, Джеффри 271

Ш

Шлик, Мориц 283

Шрёдингер, Эрвин 122–125,
127, 131, 151, 163, 215,
249, 281

Э

Эйнштейн, Альберт 8–10, 12,
14–21, 31–35, 42, 44, 47,
51, 59, 64, 69, 80, 90,
107–113, 115, 117–120,
122, 123, 125–133, 135,
138, 139, 141, 142, 146,
149, 150, 153–156, 158,
159, 162, 166, 167, 169–
171, 173, 176, 177, 179,
180, 184, 197, 200, 202,
204, 205, 207, 214, 229,
259, 268, 283

Экерт, Артур 34

Эмерджентность 268, 272

Энтропия 220

Эренфест, Пауль 128

Эрстед, Ханс Кристиан 94, 95,
97, 98

Ю

Юнг, Томас 95, 97, 118

Массер Джордж

Нелокальность

Феномен, меняющий представление
о пространстве и времени,
и его значение для черных дыр,
Большого взрыва и теорий всего

Руководитель проекта *И. Серёгина*
Корректоры *М. Миловидова, С. Чупахина*
Компьютерная верстка *А. Фоминов*
Дизайн обложки *Ю. Буга*

Иллюстрация на обложке *Shutterstock.com*

Подписано в печать 29.01.2018. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.
Объем 23 печ. л. Тираж 3000 экз. Заказ № .

ООО «Альпина нон-фикшн»
123007, ул. 4-я Магистральная, д. 5,
строение 1, офис 13
Тел. +7 (495) 980-5354
www.nonfiction.ru

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

16+



Все эти миры — ваши Научные поиски внеземной жизни Джон Уиллис, пер. с англ., 2018, 286 с.

Где и как искать инопланетян? Идея внеземной жизни заворожила человечество задолго до начала освоения космического пространства. Джон Уиллис, астроном и популяризатор науки, приводит пять наиболее реалистичных сценариев поиска инопланетных живых существ в нашей Галактике. Описывая последние достижения в изучении космоса — результаты космического телескопа «Кеплер», исследование Марса с помощью марсохода «Кьюриосити», пролет около Плутона зонда «Новые горизонты» и многие другие, — Уиллис предоставляет читателям возможность самим выбрать подходящий способ обнаружения внеземной жизни. Он предлагает нам поразмышлять о ее существовании под марсианским льдом, на спутнике Юпитера Европе и спутниках Сатурна Энцеладе и Титане, причем нынешние условия на Титане автор рассматривает через призму далекого прошлого нашей собственной планеты. Уиллис бросает взгляд и за пределы Солнечной системы, обсуждая шансы найти «вторую Землю» среди миллиардов экзопланет, вероятно, существующих в нашей Галактике, а также вслушивается в далекий космос в надежде услышать инопланетные радиосигналы.



Одинок ли мы во Вселенной? Ведущие ученые мира о поисках инопланетной жизни

Под ред. Джима Аль-Халили, пер. с англ.,
2018, 284 с.

Если наша планета не уникальна, то вероятность повсеместного существования разумной жизни огромна. Более того, за всю историю человечества у инопланетян было достаточно времени, чтобы дать о себе знать. Так где же они? Какие они? И если мы найдем их, то чем это обернется? Ответы на эти вопросы ищут ученые самых разных профессий — астрономы, физики, космологи, биологи, антропологи, исследуя все аспекты проблемы. Это и поиск планет и спутников, на которых вероятно жизнь, и возможное устройство чужого сознания, и истории с похищениями инопланетянами, и изображение «чужих» в научной фантастике и кино. Для написания книги профессор Джим Аль-Халили собрал команду ученых и мыслителей, мировых лидеров в своих областях, в числе которых такие звезды, как Мартин Рис, Иэн Стюарт, Сет Шостак, Ник Лейн и Адам Резерфорд. Вместе они представляют весь комплекс вопросов и достижений современной науки в этом поиске, и каждый из них вносит свой уникальный вклад.



Голубая точка

Космическое будущее
человечества

Карл Саган, пер. с англ., 3-е изд., 2018,
406 с.

Выдающийся популяризатор науки, прекрасный рассказчик, страстный пропагандист космоса, провидец, Карл Саган считает, что стремление странствовать и расширять границы знаний свойственно природе человека и связано с нашим выживанием как вида. В его искренней, захватывающей книге философские размышления переплетаются с восторженными описаниями триумфальных исследований планет и спутников как с участием человека, посещавшего Луну, так и роботизированных миссий. Знакомя нас с нашими соседями по космосу, Саган не просто просвещает и восхищает читателя, он и помогает понять, как защитить Землю.



Мир, полный демонов

Наука — как свеча во тьме

Карл Саган, пер. с англ., 4-е изд., 2017,
537 с.

«Мир, полный демонов» — последняя книга Карла Сагана, астронома, астрофизика и выдающегося популяризатора науки, вышедшая уже после его смерти. Эта книга, посвященная одной из его любимых тем — человеческому разуму и борьбе с псевдонаучной глупостью, — своего рода итог всей его работы. Мифы об Атлантиде и Лемурии, лица на Марсе и встречи с инопланетянами, магия и реинкарнация, ясновидение и снежный человек, креационизм и астрология — Саган последовательно и беспощадно разоблачает мифы, созданные невежеством, страхом и корыстью. Эта книга — манифест скептика, учебник здравого смысла и научного метода. Яркий, глубоко личный текст — не только битва с псевдонаукой, но и удивительная картина становления научного мировоззрения, величайших открытий и подвижников.

ALPINA
NON-FICTION



Квантовые вычисления со времен Демокрита

Скотт Ааронсон, пер. с англ., 2018, 494 с.

Написанная известным теоретиком в области квантовых вычислений Скоттом Ааронсоном, эта книга проведет вас через поразительное разнообразие тем, исследуя самые глубокие идеи математики, информатики и физики — от теории множеств, вычислительной сложности, квантовых вычислений до интерпретации квантовой механики. Кроме того, вы познакомитесь с дискуссиями относительно путешествий во времени, парадокса Ньюкома, антропного принципа и взглядов британского физика и математика Роджера Пенроуза. Неформальный стиль Ааронсона делает эту поразительную книгу доступной для читателей с научной подготовкой, а также для студентов и исследователей, работающих в области физики, информатики, математики и философии.

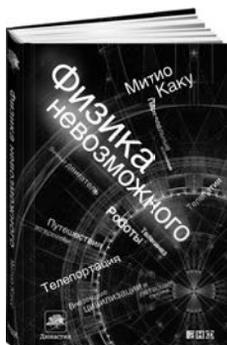


Квантовая случайность

Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса

Николя Жизан, пер. с фр., 2-е изд., 2017, 202 с.

Играет ли Бог в кости? И во что играют физики? Николя Жизан, автор прорывного женевого эксперимента по передаче квантовой запутанности фотонных пар по оптоволокну, излагает свои взгляды на фундаментальные вопросы квантовой физики через призму игры Белла — воображаемого эксперимента, в котором рассматривается теоретическая возможность сверхсветовой передачи информации с использованием запутанных частиц. Реальные эксперименты с ними доказали нелокальную природу мира — вопреки интуитивному желанию ученых, события в удаленных точках Вселенной могут непосредственно зависеть друг от друга. Истинная природа этих явлений и вытекающие из них следствия в последнее время стали горячей темой физики.



Физика невозможного

Митио Каку, пер. с англ., 7-е изд., 2017, 456 с.

Еще совсем недавно нам трудно было даже вообразить сегодняшний мир привычных вещей. Какие самые смелые прогнозы писателей-фантастов и авторов фильмов о будущем имеют шанс сбыться у нас на глазах? На этот вопрос пытается ответить Митио Каку, американский физик японского происхождения и один из авторов теории струн. Из книги вы узнаете, что уже в XXI веке, возможно, будут реализованы силовые поля, невидимость, чтение мыслей, связь с взвездными цивилизациями и даже телепортация и межзвездные путешествия.



Будущее разума

Митио Каку, пер. с англ., 3-е изд., 2017, 502 с.

Прямое мысленное общение с компьютером, телекинез, имплантация новых навыков непосредственно в мозг, видеозапись образов, воспоминаний и снов, телепатия, аватары и суррогаты как помощники человечества, экзоскелеты, управляемые мыслью, и искусственный интеллект. Это все наше недалекое будущее. В ближайшие десятилетия мы научимся форсировать свой интеллект при помощи генной терапии, лекарств и магнитных приборов. Наука в этом направлении развивается стремительно. Изменится характер работы и общения в социальных сетях, процесс обучения и в целом человеческое развитие. Будут побеждены многие неизлечимые болезни, мы станем другими. Готов ли наш разум к будущему? Что там его ждет? На эти вопросы, опираясь на последние исследования в области нейробиологии и физики, отвечает Митио Каку, футуролог, популяризатор науки и автор научно-популярных бестселлеров.



Физика будущего

Митио Каку, пер. с англ., 5-е изд., 2017, 584 с.

Кому, как не ученым-физикам, рассуждать о том, что будет представлять собой мир в 2100 году? Как одним усилием воли будут управляться компьютеры, как силой мысли человек сможет двигать предметы, как мы будем подключаться к мировому информационному полю? Возможно ли это? Оказывается, возможно и не такое. Искусственные органы; парящие в воздухе автомобили; невероятная продолжительность жизни и молодости — все эти чудеса не фантастика, а научно обоснованные прогнозы серьезных ученых, интервью с которыми обобщил в своей книге Митио Каку.



Гиперпространство

Научная одиссея через параллельные миры, дыры во времени и десятое измерение
Митио Каку, пер. с англ., 4-е изд., 2017, 502 с.

Инстинкт говорит нам, что наш мир трехмерный. Исходя из этого представления, веками строились и научные гипотезы. По мнению выдающегося физика Митио Каку, это такой же предрассудок, каким было убеждение древних египтян в том, что Земля — плоская. Эта книга посвящена теории гиперпространства. Идея многомерности пространства вызвала скепсис, высмеивалась, но теперь признается многими авторитетными учеными. Значение этой теории заключается в том, что она способна объединять все известные физические феномены в поразительно простую конструкцию и привести ученых к так называемой теории всего. Однако серьезной и доступной литературы для неспециалистов почти нет. Этот пробел и восполняет Митио Каку, объясняя с научной точки зрения и происхождение Земли, и существование параллельных вселенных, и путешествия во времени, и многие другие кажущиеся фантастическими явления.



Структура реальности

Наука параллельных вселенных

Дэвид Дойч, пер. с англ., 2-е изд., 2017, 430 с.

Книга британского физика и философа Дэвида Дойча, одного из создателей концепции квантовых вычислений, наглядно демонстрирует, что эпоха великих философских систем вовсе не осталась в прошлом. Автор выстраивает целостный и согласующийся с научными знаниями ответ на один из самых фундаментальных философских вопросов: какова подлинная природа реальности?

По Дойчу ткань реальности, каковой она открывается любому носителю разума, сплетается из четырех основных нитей. Это эпистемология Карла Поппера, раскрывающая путь научного знания; это квантовая механика; это основанная Тьюрингом теория вычислений, без которой не понять природу математических объектов; и, наконец, это универсальная теория эволюции, объясняющая развитие не только жизни, но и цивилизации.



Начало бесконечности

Объяснения, которые меняют мир

Дэвид Дойч, пер. с англ., 4-е изд., 2017, 581 с.

Британский физик Дэвид Дойч — не только один из основоположников теории квантовых вычислений, но и философ, стремящийся осмыслить «вечные вопросы» человечества в контексте, заданном развитием науки. Стержневой вопрос данной книги: есть ли предел для человеческого прогресса? Ответ выражен в заглавии: мы стоим у начала бесконечного пути, по которому поведет нас, выдвигая догадки и подвергая их критике, наш универсальный разум. Мы встали на этот путь в эпоху Просвещения, но с него легко сбиться под влиянием ошибочных философских идей, к которым автор причисляет многие течения мысли — от позитивизма до постмодернизма, не говоря уже о религии. Примером отступления от пути разума в науке предстает у него копенгагенская интерпретация квантовой механики. Разумную альтернативу ей Дойч видит в интерпретации Эверетта, из которой вытекает картина мира как мульти-вселенной. Но сфера интересов автора не ограничивается наукой.



Красота физики

Постигая устройство природы

Фрэнк Вильчек, пер. с англ., 2-е изд., 2017, 604 с.

Верно ли, что красота правит миром? Этим вопросом на протяжении всей истории человечества задавались и мыслители, и художники, и ученые. На страницах великолепно иллюстрированной книги своими размышлениями о красоте Вселенной и научных идей делится Нобелевский лауреат Фрэнк Вильчек. Шаг за шагом, начиная с представлений греческих философов и заканчивая современной главной теорией объединения взаимодействий и направлениями ее вероятного развития, автор показывает лежащие в основе физических концепций идеи красоты и симметрии. Герои его исследования — и Пифагор, и Платон, и Ньютон, и Максвелл, и Эйнштейн. Наконец, это Эмми Нётер, которая вывела из симметрий законы сохранения, и великая плеяда физиков XX в. В отличие от многих популяризаторов, Фрэнк Вильчек не боится формул и умеет «на пальцах» показать самые сложные вещи, заражая нас юмором и ощущением чуда.



Темная материя и динозавры

Удивительная взаимосвязь событий во Вселенной

Лиза Рэндалл, пер. с англ., 2017, 506 с.

Что общего между темной материей и динозаврами, которые господствовали на Земле многие миллионы лет, а потом неожиданно вымерли? Считается, что причиной их гибели стало столкновение с кометой, однако никто не знает, почему она сошла со своей обычной орбиты. В этом шедевре научно-популярной литературы известный физик-теоретик Лиза Рэндалл предлагает свое объяснение. Именно темная материя, по ее мнению, могла направить роковую для динозавров комету к Земле. Хитросплетения астрономии и биологии в книге читаются как детективная история, в которой новые представления о темной материи помогают раскрыть не только тайны пяти массовых вымираний, но и истоки нашего существования.

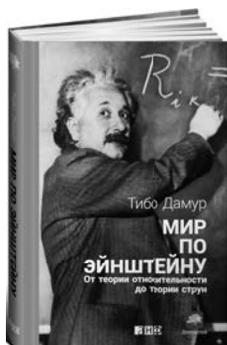


Происхождение жизни

От туманности до клетки

Михаил Никитин, 2-е изд., 2017, 542 с.

Поражаясь красоте и многообразию окружающего мира, люди на протяжении веков гадали: как он появился? Каким образом сформировались планеты, на одной из которых зародилась жизнь? Почему земная жизнь основана на углероде и использует четыре типа звеньев в ДНК? Где во Вселенной стоит искать другие формы жизни и чем они могут отличаться от нас? В этой книге собраны самые свежие ответы ученых на эти вопросы. И хотя на переднем крае науки не всегда есть простые пути, автор честно постарался сделать все возможное, чтобы книга была понятна читателям, далеким от биологии. Он логично и четко формулирует свои идеи и с увлечением рассказывает о том, каким образом из космической пыли и метеоритов через горячие источники у подножия вулканов возникла живая клетка, чтобы заселить и преобразить всю планету.



Мир по Эйнштейну

От теории относительности до теории струн

Тибо Дамур, пер. с фр., 2016, 268 с.

Как зарождалась теория относительности? Как повлияли революционные идеи Эйнштейна на представления о пространстве и времени, на науку и технику? Каково их место и значение в современной науке? Книга дает читателю возможность проникнуть в мир Эйнштейна, разделить те особые моменты, когда ему удавалось приподнимать краешек большой завесы, постигая скрытые механизмы Вселенной. Автор шаг за шагом скрупулезно, но занимательно и доступно рассказывает об истоках и формировании идей Эйнштейна, показывает их борьбу с устоявшимися представлениями, непростой путь внедрения этих идей в головы физиков и философов и значение для нашего времени.