

Дэвид Дойч

# СТРУКТУРА РЕАЛЬНОСТИ

Наука параллельных вселенных



# Дэвид Дойч

# Структура реальности. Наука параллельных вселенных

*Текст предоставлен правообладателем*

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=8716103](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=8716103)*

*Структура реальности. Наука параллельных вселенных / Дэвид Дойч:*

*Альпина нон-фикшн; Москва; 2015*

*ISBN 978-5-9614-3713-3*

## **Аннотация**

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, которая целостно интерпретируется лишь после признания реальность мультиверса – бесконечного ансамбля параллельных вселенных; 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. Вдумчивый читатель будет поражен сочетанием широты и логической последовательности мысли автора. С его разъяснениями мультиверс перестает казаться фантастикой и становится наиболее естественным описанием той поразительной реальности, которую открыла нам современная наука. За рамками книги остается вопрос о месте и роли человека в столь причудливом мире. Этой теме посвящена другая работа Дэвида Дойча – «Начало бесконечности», которая служит органичным продолжением «Структуры реальности».

# Содержание

Предисловие	7
Благодарности	9
1. Теория Всего	10
Терминология	58
Резюме	60
2. Тени	62
Конец ознакомительного фрагмента.	78

**Дэвид Дойч**  
**Структура реальности.**  
**Наука параллельных**  
**ВСЕЛЕННЫХ**

*Издательство благодарит Russian Quantum Center, Сергея Белоусова и Виктора Орловского за помощь в подготовке издания*

Редактор *Игорь Лисов*

Редактор Russian Quantum Center *Александр Сергеев*

Руководитель проекта *А. Тарасова*

Корректор *М. Миловидова*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайнер обложки *Ю. Буга*

© David Deutsch, 1997

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО  
«Альпина нон-фикшн», 2015

\* \* \*

*Посвящается памяти Карла Поппера, Хью Эверетта и Алана Тьюринга, а также Ричарду*

*Докинзу. В этой книге их идеи восприняты всерьез.*

# Предисловие

Если и существует единая мотивация для взгляда на мир, изложенного в этой книге, она заключена в том, что главным образом благодаря ряду экстраординарных научных открытий мы обладаем сейчас некоторыми чрезвычайно глубокими теориями о структуре реальности. Если мы хотим понять мир не поверхностно, а более глубоко, нам помогут эти теории и разум, а не наши предрассудки, приобретенные мнения, и даже не здравый смысл. Наши лучшие теории не только истиннее здравого смысла, но в них гораздо больше смысла, чем в здравом смысле. Мы должны воспринимать их серьезно: не просто как практическую основу соответствующих областей, а как объяснение мира. Я полагаю, что мы сможем достичь величайшего понимания, если будем рассматривать их не по отдельности, а совместно, поскольку они связаны неразделимым образом.

Может показаться странным, что это предложение – постараться выработать рациональное и самосогласованное мировоззрение на основе наших лучших, наиболее фундаментальных теорий – является совершенно беспрецедентным и вызывает серьезные разногласия. Но на практике получается именно так. Одна из причин заключается в том, что каждая из этих теорий, когда ее воспринимают серьезно, влечет крайне контринтуитивные следствия. Поэтому

предпринимаются всевозможные попытки избежать встречи с этими следствиями: теории *специально* изменяют или дают им иные интерпретации, произвольно сужают область их применимости или просто применяют на практике, не делая далеко идущих выводов. Я буду критиковать некоторые подобные попытки (ни одна из которых, по-моему, и гроша ломаного не стоит), но только в том случае, когда такая критика является удобным способом объяснения самих теорий. Главная цель этой книги – не защищать эти теории, а исследовать, какой была бы структура реальности, если бы эти теории оказались истинными.

# Благодарности

Развитию идей, описанных в этой книге, в значительной степени способствовали беседы с Брайсом ДеВиттом, Артуром Экертом, Майклом Локвудом, Энрико Родриго, Деннисом Сиамой, Фрэнком Типлером, Джоном Уилером и Колей Вулфом.

Я выражаю благодарность своим друзьям и коллегам Рут Чанг, Артуру Экерту, Дэвиду Джонсон-Дэвису, Майклу Локвуду, Энрико Родриго и Коле Вулфу, своей маме Тикве Дойч и своим издателям Кэролайн Найт и Рави Мирчандани (издательство Penguin Books) и Джону Вудраффу, и особенно Саре Лоренс за внимательное и критичное чтение первых черновиков этой книги, а также за множество предложенных ими исправлений и улучшений. Также я признателен всем, кто читал и комментировал части рукописи, включая Харви Брауна, Стива Грэхема, Росселлу Лупаччини, Свейна Олава Нюберга, Оливера и Гарриет Стримпел, а в особенности Ричарда Докинза и Фрэнка Типлера.

# 1. Теория Всего

Помню, когда я был еще ребенком, мне говорили, что в древние времена очень образованный человек мог *знать все, что было известно*. Кроме того, мне говорили, что в наше время известно так много, что ни один человек даже за всю свою жизнь не в состоянии изучить больше крошечной частички этого знания. Последнее удивляло и разочаровывало меня. Я просто отказывался в это поверить. Вместе с тем я не знал, как оправдать свое неверие. Но такое положение вещей меня определенно не устраивало, и я завидовал древним ученым.

Не то чтобы я хотел заучить все факты, перечисленные в энциклопедиях мира: напротив, я ненавидел зубрежку. Не таким способом я надеялся получить возможность узнать все, что только было известно. Даже если бы мне сказали, что ежедневно появляется столько публикаций, сколько человек не сможет прочитать и за целую жизнь, или что науке известно 600 000 видов жуков, это не разочаровало бы меня. Я не горел желанием проследить за полетом каждого воробья. Более того, я никогда не считал, что древний ученый, который, как предполагалось, знал все, что было известно, стал бы занимать себя чем-то подобным. Я иначе представлял себе то, что может считаться известным. Под «известным» я подразумевал *понятое*.

Сама мысль о том, что один человек в состоянии понять все, что понято, может показаться фантастической, однако фантастики в ней куда меньше, чем в мысли о том, что один человек сможет запомнить все известные факты. К примеру, никто не сможет запомнить все известные результаты научных наблюдений даже в такой узкой области, как движения планет, но многие астрономы *понимают* эти движения настолько полно, насколько их можно понять. Это становится возможным, потому что понимание зависит не от знания множества фактов как таковых, а от наличия правильных концепций, объяснений и теорий. Одна сравнительно простая и понятная теория может охватить бесконечно много неудобоваримых фактов. Лучшей теорией планетарного движения является *общая теория относительности* Эйнштейна, которая в самом начале XX века вытеснила теории гравитации и движения Ньютона. Теория Эйнштейна в принципе предсказывает не только все движения планет, но и все остальные эффекты гравитации, и согласуется с нашими самыми точными измерениями. Дело в том, что, когда теория предсказывает что-либо «в принципе», это означает, что предсказание логически следует из теории, даже если на практике для получения некоторых таких предсказаний необходимо произвести больше вычислений, чем мы способны осуществить технически или физически в той вселенной, которую мы знаем.

Способность предсказывать или описывать что-либо, да-

же достаточно точно, совсем не равноценна пониманию этого. В физике предсказания и описания часто выражаются в виде математических формул. Допустим, я запомнил формулу, из которой при наличии времени и желания мог бы вычислить любое положение планет, которое когда-либо было записано в архивах астрономов. Что же я в этом случае выиграл бы по сравнению с непосредственным заучиванием архивов? Формулу проще запомнить, но ведь найти число в архивах может быть даже проще, чем вычислить его из формулы. Истинное преимущество формулы в том, что ее можно использовать в бесконечном множестве случаев помимо архивных данных, например, для предсказания результатов будущих наблюдений. С помощью формулы можно также получить более точное историческое положение планет, потому что архивные данные содержат ошибки наблюдений. И все же несмотря на то, что формула охватывает бесконечно больше фактов, чем архив наблюдений, знать ее не значит понимать движения планет. Факты невозможно понять, попросту собрав их в формулу, так же как нельзя понять их, просто записав или запомнив. Факты можно понять только после объяснения. К счастью, наши лучшие теории наряду с точными предсказаниями содержат глубокие объяснения. Например, общая теория относительности объясняет гравитацию на основе новой четырехмерной геометрии искривленного пространства и времени. Она точно объясняет, каким образом эта геометрия воздействует на материю и под-

вергается воздействию материи. В этом объяснении и заключается полное содержание теории; а предсказания движений планет – это всего лишь некоторые следствия, выводимые из этого объяснения.

Общая теория относительности так важна не потому, что она может чуть более точно предсказать движение планет, чем теория Ньютона, а потому, что она открывает и объясняет такие аспекты действительности, о которых ранее не подозревали – например, искривление пространства и времени. Это типично для научного объяснения. Научные теории объясняют объекты и явления в нашей жизни, опираясь на лежащую в их основе фундаментальную реальность, которую мы не воспринимаем непосредственно. Но способность теории объяснить то, что мы ощущаем, – не самое ценное ее качество. Самое ценное заключается в том, что она объясняет саму структуру реальности. Как мы увидим, одно из самых ценных, значимых и полезных качеств человеческой мысли – ее способность открывать и объяснять структуру реальности.

Однако некоторые философы, и даже ученые, недооценивают роль объяснения в науке. Для них основная цель научной теории заключается не в объяснении чего-либо, а в предсказании результатов экспериментов: все содержание теории заключено в формуле предсказания. Они считают, что годится любое непротиворечивое объяснение, которое теория может дать своим предсказаниям, равно как и отсут-

ствие объяснения, – до тех пор, пока ее предсказания верны. Такой взгляд называется *инструментализмом* (поскольку в этом случае теория – всего лишь «инструмент» для предсказаний). Саму мысль о том, что наука может позволить нам понять скрытую реальность, лежащую в основе наших наблюдений, инструменталисты считают ложной и тщеславной. Они не понимают, каким образом то, о чем говорит научная теория помимо предсказания результатов экспериментов, может быть чем-то бóльшим, чем пустые слова. В частности, объяснения они считают вспомогательными психологическими приспособлениями – чем-то вроде художественных элементов, включаемых в теории, чтобы сделать их занимательнее и облегчить запоминание. Лауреат Нобелевской премии, физик Стивен Вайнберг<sup>1</sup>, явно говорил с позиций инструментализма, сделав следующий невероятный комментарий к объяснению гравитации Эйнштейном:

«Важно иметь возможность сделать предсказания относительно изображений на фотопластинках астрономов, частот спектральных линий и т. п., а то, припишем ли мы эти прогнозы физическому воздействию гравитационных полей на движение планет и фотонов [как это было в физике до Эйнштейна] или искривлению пространства и времени, просто не имеет значения» (*Gravitation and Cosmology*, p. 147).

---

<sup>1</sup> Стивен Вайнберг (род. 1933) – американский физик и популяризатор науки. Один из авторов теории электрослабого взаимодействия, за которую в 1979 г. вместе с Шелдоном Глэшоу и Абдусом Саламом был удостоен Нобелевской премии. – *Прим. ред.*

Вайнберг и другие инструменталисты ошибаются. То, что мы приписываем изображениям на астрономических фото-пластинках, *имеет* значение, и не только для физиков-теоретиков вроде меня, у которых мотивацией для написания формул и изучения теорий как раз и является лучше понять мир. (Я уверен, что эта мотивация присуща и Вайнбергу: вряд ли его стимулирует одно лишь желание предсказывать изображения и спектры!) Дело в том, что даже для чисто практического применения прежде всего важна объяснительная сила теории, а уж потом, в качестве дополнения, – ее предсказательные возможности. Если это вас удивляет, представьте, что на земле появился инопланетный ученый и преподнес нам ультравысокотехнологичный «оракул», который может предсказать результат любого эксперимента, но без каких-либо объяснений. Если верить инструменталистам, то как только мы получим этот оракул, или предсказатель, наши научные теории нам будут нужны разве что для развлечения. Но так ли это? Каким образом оракул можно было бы использовать практически? В некотором смысле он содержал бы знания, необходимые для того, чтобы построить, скажем, межзвездный корабль. Но как именно он бы пригодился нам при строительстве такого корабля, или при создании другого подобного предсказателя, или даже при усовершенствовании мышшеловки? Оракул всего лишь предсказывает результаты экспериментов. Следовательно, чтобы вообще использовать его, нам сначала нужно знать, о ка-

ких экспериментах его можно спрашивать. Если бы мы дали предсказателю проект космического корабля и информацию о предполагаемом испытательном полете, он мог бы сказать нам, как поведет себя корабль во время этого полета. Но спроектировать космический корабль предсказатель не смог бы. И даже если бы он сообщил нам, что спроектированный нами космический корабль взорвется при запуске, он не смог бы сказать нам, как предотвратить этот взрыв. Эту проблему снова пришлось бы решать нам. А прежде чем ее решить, прежде чем приступить хоть к какому-то усовершенствованию конструкции, нам пришлось бы *понять*, кроме всего прочего, принцип работы космического корабля. И только тогда у нас появилась бы возможность узнать, почему он может взорваться при запуске. Предсказание – пусть даже самое совершенное, универсальное предсказание – не способно заменить объяснение.

Сходным образом и в научных исследованиях оракул не может дать нам ни одной новой теории. Только в том случае, если у нас уже есть теория и мы придумали эксперимент для ее проверки, можно было бы спросить его, что произойдет, если подвергнуть эту теорию данному испытанию. Таким образом, предсказатель заменил бы вовсе не теории – он заменил бы эксперименты. Он избавил бы нас от затрат на испытательные лаборатории и ускорители частиц. Вместо того чтобы строить опытные образцы космических кораблей и рисковать жизнью летчиков-испытателей, все испытания мы

могли бы проводить на земле, посадив летчиков в пилотажные тренажеры, поведение которых определялось бы предсказаниями оракула.

Предсказатель мог бы быть весьма полезен во многих ситуациях, но его полезность всегда будет зависеть от способности людей решать научные проблемы точно так же, как они вынуждены делать это сейчас, а именно – изобретая объяснительные теории. Он даже не может заменить все эксперименты, поскольку на практике его способность предсказать результат какого-то частного эксперимента зависит от того, что проще: достаточно точно описать этот эксперимент, чтобы оракул дал полезный ответ, или провести эксперимент в действительности. Таким образом, для связи с предсказателем нужен своего рода «пользовательский интерфейс». Возможно, описание эксперимента придется вводить на каком-то стандартном языке, причем одни эксперименты было бы труднее описать, чем другие. На практике описание многих экспериментов оказалось бы слишком сложным для ввода. Таким образом, предсказатель имел бы те же основные достоинства и недостатки, что и любой другой источник экспериментальных данных, и был бы полезен только в тех случаях, когда обращение к нему оказывалось бы удобнее, чем к другим источникам.

Можно посмотреть на ситуацию и другим способом: такой оракул уже существует рядом с нами, и это – физический мир. Он сообщает нам результат любого возможного экспе-

римента, если мы спрашиваем его на правильном языке (т. е. если мы проводим эксперимент), хотя в некоторых случаях нам не очень удобно «вводить описание эксперимента» в требуемой форме (т. е. создавать некий прибор и управлять им). И он тоже не дает никаких объяснений.

В немногих практических случаях, например, при прогнозе погоды, оракул, обладающий исключительно предсказательной функцией, устроил бы нас почти в той же степени, как и объяснительная теория. Но даже в этом случае это справедливо лишь при условии, что сделанный оракулом прогноз погоды является полным и совершенным. На практике прогнозы погоды неполны и несовершенны, и, чтобы скомпенсировать неточность, в них включают объяснения того, как метеорологи получили тот или иной прогноз. Объяснения позволяют нам судить о надежности прогноза и вывести дальнейшие предсказания с учетом нашего месторасположения и наших нужд. К примеру, для меня есть разница, чем будет вызвана ветреная погода, которую прогнозируют на завтра: ожидаемой близостью района с высоким атмосферным давлением или более отдаленным ураганом. В последнем случае я был бы более осторожным. Метеорологам самим необходимы объяснительные теории о погоде, чтобы они могли угадать, какие приближения можно допустить при компьютерном моделировании погоды, какие дополнительные наблюдения обеспечат более точный и своевременный прогноз погоды и т. п.

Таким образом, идеал инструменталистов, олицетворяемый нашим воображаемым оракулом, а именно – научная теория, лишенная своего объяснительного содержания, будет иметь очень ограниченную полезность. Так будем благодарны, что реальные научные теории не похожи на этот идеал и что ученые в действительности к нему не стремятся.

Крайняя форма инструментализма, называемая *позитивизмом* (или логическим позитивизмом), утверждает, что все положения, отличные от тех, которые описывают или предсказывают наблюдения, не только излишни, но и бессмысленны. И хотя в соответствии с этим критерием в самой доктрине отсутствует смысл, она тем не менее господствовала в науке всю первую половину XX столетия! Идеи инструменталистов и позитивистов широко распространены даже сегодня. Причина такой их внешней убедительности заключается в том, что, хотя предсказание не является целью науки, оно является характерной чертой научного *метода*. Этот научный метод включает выдвижение новой теории для объяснения некоторого класса явлений, затем проведение *решающей экспериментальной проверки* – такого эксперимента, для которого старая теория предсказывает один видимый результат, а новая теория – другой. Затем теория, предсказания которой оказались ложными, отвергается. Таким образом, результат решающего эксперимента, который позволяет сделать выбор между двумя теориями, зависит от предсказаний теорий, а не напрямую от их объяснений. Именно отсю-

да истекает ошибочное представление, что в научной теории нет ничего, кроме предсказаний. Однако экспериментальная проверка – это далеко не единственный процесс, обеспечивающий рост научного знания. Подавляющее большинство теорий отвергли не потому, что они не прошли проверку экспериментом, а потому, что они давали плохие объяснения. Мы отвергаем такие теории, даже не проверяя их. Например, рассмотрим следующую теорию: съев килограмм травы, можно вылечиться от простуды. Эта теория делает предсказание, которое можно проверить на опыте: если люди попробуют лечиться травой и найдут это неэффективным, будет доказана ее ложность. Но эту теорию никогда не проверяли экспериментально и, возможно, никогда не будут проверять, потому что она не дает объяснений: она не объясняет ни механизм лечения, ни что бы то ни было еще. Поэтому мы справедливо полагаем, что она ложная. Всегда есть бесконечно много возможных теорий такого рода, совместимых с существующими наблюдениями и предлагающих новые предсказания, и у нас не хватило бы ни времени, ни средств, чтобы проверить их все. Мы проверяем те новые теории, которые выглядят более обещающими для объяснения вещей, чем доминирующие сегодня.

Утверждать, что предсказание – цель научной теории, значит путать средства и цели. Точно так же можно сказать, что цель космического корабля – сжигать топливо. На самом деле горение топлива – это лишь один из многих процессов, ко-

торые корабль должен выполнить для достижения своей действительной цели, то есть для транспортировки полезного груза из одной точки космического пространства в другую. Успешная экспериментальная проверка – это лишь один из многих шагов, которые теория должна пройти для достижения истинной цели науки, состоящей в объяснении мира.

Как я уже сказал, объяснения неизбежно включают то, чего мы не наблюдаем непосредственно: атомы и силы; внутреннее строение звезд и вращение галактик; прошлое и будущее; законы природы. Чем глубже объяснение, тем к более отдаленным от непосредственного опыта сущностям оно должно обращаться. Однако эти сущности не являются вымышленными: напротив, они часть самой структуры реальности.

Объяснения часто порождают предсказания, по крайней мере, в принципе. В самом деле, если что-то вообще можно предсказать, то достаточно полное объяснение должно обеспечивать столь же полное предсказание (помимо всего прочего). Однако можно объяснить и понять многие очевидным образом непредсказуемые вещи. Например, вы не можете предсказать, какие номера выдаст хорошая, симметричная рулетка. Но если вы понимаете, что именно в конструкции и действии рулетки делает ее беспристрастной, то вы сможете объяснить, почему невозможно предсказать номера. И опять: знание о том, что рулетка является честной, не равноценно пониманию того, что делает ее таковой.

И я говорю именно о понимании, а не просто о знании (или описании, или предсказании). Поскольку понимание приходит через объяснительные теории, и благодаря высокой общности таких теорий, быстрый рост числа зафиксированных фактов не обязательно усложняет понимание всего, что понято. Тем не менее большинство людей считает (и именно так мне говорили в детстве), что с ошеломляющей скоростью растет не только количество записанных фактов, но также количество и сложность теорий, через которые мы познаем мир. Следовательно, говорят они, не важно, было или нет такое время, когда один человек мог понять все, что было понято, в наше время это точно невозможно, и это становится все более и более невозможным по мере роста нашего знания. Может показаться, что каждый раз, когда появляется новое объяснение или методика, существенная для данного предмета, приходится добавлять еще одну теорию к списку, который должен выучить любой, кто желает понять предмет. Когда же количество таких теорий в любом предмете становится слишком большим, появляются специализации. Физика, к примеру, разделилась на астрофизику, термодинамику, физику элементарных частиц, квантовую теорию поля и многие другие части. Теоретическая основа каждой из них по крайней мере столь же обширна, как вся физика была сто лет назад, и многие уже распадаются на подспециализации. Кажется, что, чем больше открытий мы делаем, тем дальше и тем более безвозвратно нас уносит в век

узких специалистов, и тем более далекими становятся те гипотетические древние времена, когда понимание обычного человека могло охватить все, что только было понято.

Человека, столкнувшегося с этим огромным и быстро растущим списком теорий, созданных человеческой расой, можно простить за его сомнения в том, что один индивидуум способен за свою жизнь отведать каждое блюдо и самостоятельно, как это могло быть когда-то, оценить все известные рецепты. Однако объяснение – необычная пища: большую порцию не обязательно труднее проглотить. Теорию может вытеснить новая теория, более точная, с бóльшим количеством объяснений, но и более простая для понимания. В этом случае старая теория становится лишней, и мы понимаем больше, а учим меньше. Именно это и произошло, когда теория Николая Коперника о том, что Земля движется вокруг Солнца, вытеснила сложную систему Птолемея, которая помещала Землю в центр вселенной. Иногда новая теория может упрощать существующую, как в случае, когда арабские (десятичные) цифры заменили римские. (В данном случае теория выражена неявно. Каждая система записи делает определенные операции, высказывания и мысли о числах проще, чем другие системы, и, следовательно, воплощает некую теорию о том, какие отношения между числами являются полезными или интересными.) Новая теория может также объединять две старые теории, давая нам больше понимания, чем при их использовании по отдельности,

как это произошло, когда Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл объединили теории электричества и магнетизма в одну теорию электромагнетизма. Более удачные объяснения любого предмета обычно косвенным образом ведут к совершенствованию методологии, концепций и языка, с помощью которых мы пытаемся понять другие предметы, а следовательно, по мере возрастания нашего знания в целом его структура может становиться более доступной для понимания.

Часто бывает так, что даже после того, как старые теории включаются в новые, они не забываются полностью. Даже римские цифры все еще используются сегодня в определенных случаях. Те громоздкие методы, с помощью которых люди когда-то вычисляли, что XIX, умноженное на XVII, равно CCCXXIII, уже не применяются всерьез, но даже сейчас они несомненно известны и понятны кому-то, например, историкам математики. Означает ли это, что человек не может понять «все, что понято», не зная римских цифр и их загадочной арифметики? Совсем нет. Современный математик, который по какой-то причине никогда не слышал о римских цифрах, тем не менее уже обладает полным пониманием связанной с ними математики. Узнав о римских цифрах, этот математик приобретет не новое понимание, а всего лишь новые факты – исторические факты, факты о свойствах некоторых произвольно определенных символов, но не новое знание о самих числах. Он уподобится зоологу, который учится

переводить названия видов на иностранный язык, или астрофизику, который узнает, каким образом люди различных культур группируют звезды в созвездия.

Необходимо ли знание арифметики римских цифр для понимания *истории* – отдельный вопрос. Можно допустить, что какая-то историческая теория – какое-то объяснение – зависит от определенных методов, которые древние римляне использовали для умножения. Ведь есть же предположение о том, например, что их особые методы строительства водопроводов из свинцовых труб, отравлявших питьевую воду, внесли свой вклад в падение Римской империи! Если так, то нам следует узнать, какие это были методы, если мы хотим понять историю, а следовательно, и понять все, что понято. Но ни одно современное объяснение истории не связано с методикой умножения чисел, так что наши сведения относительно этих методов – не более чем констатация фактов. Все, что понятно, может быть понято и без заучивания этих фактов. Мы в любое время можем посмотреть в справочник, если, например, расшифровываем древний текст, в котором эти методы упоминаются.

Постоянно разграничивая понимание и «просто» знание, я не хочу преуменьшить важность зафиксированной, но не объясняющей информации. Такая информация безусловно важна для всего: от воспроизводства микроорганизма (который содержит такую информацию в молекулах ДНК) до самого абстрактного человеческого мышления. Чем же то-

гда отличается понимание от простого знания? Что есть объяснение, если противопоставить его констатации факта, такой как точное описание или предсказание? На практике мы обычно легко видим разницу. Мы знаем, когда чего-то не понимаем, даже если мы можем точно описать и предсказать это (например, течение известной болезни неизвестного происхождения), и также мы знаем, когда объяснение улучшает наше понимание. Но дать точное определение понятий «объяснение» или «понимание» сложно. Грубо говоря, они скорее отвечают на вопрос «почему», чем на вопрос «что»; затрагивают внутреннюю суть вещей; описывают их реальное, а не кажущееся состояние; говорят о том, что должно быть, а не просто что случается; определяют законы природы, а не эмпирические правила. Эти понятия также связаны с согласованностью, красотой и простотой в противоположность произвольному и сложному, хотя ни одному из этих понятий тоже нельзя дать простого определения. Но в любом случае понимание – это одна из высших функций человеческого мозга и разума, и эта функция уникальна. Многие другие физические системы, например, мозг животных, компьютеры и другие машины, способны усваивать факты и действовать в соответствии с ними. Но в настоящее время мы не знаем ничего, кроме человеческого разума, что было бы способно понять объяснение и, главное, желало бы его получить. Каждое открытие нового объяснения и каждый акт понимания существующего объяснения зависит от уникаль-

ной человеческой способности мыслить творчески.

То, что произошло с римскими цифрами, можно рассматривать как процесс «разжалования» объяснительной теории до простого описания фактов. Подобное снижение статуса теорий происходит постоянно по мере роста нашего знания. Изначально римская система цифр действительно формировала часть концептуальной и теоретической системы взглядов, посредством которой люди, использовавшие их, понимали мир. Но сейчас то понимание, которое когда-то достиглось таким образом, – не более чем крошечный аспект гораздо более глубокого понимания, воплощенного в современных математических теориях и неявно – в современной записи чисел.

Это иллюстрирует еще одно свойство понимания. Можно понимать что-то, не осознавая, что понимаешь, и даже не будучи знакомым с предметом. Возможно, это звучит парадоксально, но весь смысл глубоких, общих объяснений состоит в том, что они охватывают не только знакомые ситуации, но и незнакомые. Если бы вы были современным математиком и впервые столкнулись с римскими цифрами, возможно, вы бы сразу не осознали, что уже понимаете их. Сначала вам бы пришлось узнать определенные факты о том, что это такое, а потом поразмышлять над этими фактами в свете имеющегося у вас понимания математики. Но сделав это, вы могли бы, оглядываясь, сказать: «Да, в римской системе цифр для меня нет ничего нового, кроме фактов». Именно это мы име-

ем в виду, когда говорим, что объяснительная роль римских цифр полностью устарела.

Точно так же, когда я говорю, что понимаю, каким образом кривизна пространства и времени влияет на движение планет, в том числе и в других солнечных системах, о которых я, возможно, никогда и не слышал, я не утверждаю, что могу вспомнить без дальнейших размышлений объяснение всех особенностей формы и возмущений орбиты любой планеты. Я имею в виду, что понимаю теорию, содержащую все эти объяснения, и поэтому могу вывести любое из них, если получу некоторые факты о конкретной планете. Сделав это, я могу, оглянувшись в прошлое, сказать: «Да, за исключением фактов, я не вижу в движении этой планеты ничего, что не объясняла бы общая теория относительности». Мы понимаем структуру реальности, только понимая объясняющие ее теории. А поскольку они объясняют больше, чем непосредственно осознаем, мы можем понимать больше того, в чем непосредственно отдаем себе отчет.

Я не утверждаю, что если мы понимаем теорию, то мы *обязательно* понимаем и все, что она может объяснить. В очень глубокой теории осознание того, что она объясняет данное явление, само по себе может быть значительным открытием, требующим независимого объяснения. Например, квазары – чрезвычайно яркие источники излучения в центре некоторых галактик – в течение многих лет были одной из загадок астрофизики. Некоторое время полагали даже, что

для их объяснения потребуется новая физика, но сейчас мы считаем, что их объясняет общая теория относительности и другие теории, которые были известны еще до открытия квазаров. Мы полагаем, что квазары состоят из горячего вещества, находящегося в процессе падения в черную дыру (сколлапсировавшие звезды, со столь сильным гравитационным полем, что из него невозможно вырваться<sup>2</sup>). Однако потребовались многие годы наблюдений и теоретических исследований, прежде чем мы пришли к этому выводу.

Теперь, когда мы считаем, что достигли определенной степени понимания квазаров, ясно, что раньше мы этим пониманием не обладали. Хотя мы и объяснили квазары через существующие теории, мы получили абсолютно новое понимание. Насколько сложно дать определение объяснению, настолько же сложно определить, когда следует считать такое дополнительное объяснение независимой составляющей того, что понято, а когда рассматривать его как относящееся к более глубокой теории. Это сложно определить, но не так сложно осознать: как и с объяснениями в целом, на практике мы опознаем новое объяснение, когда получаем его. И снова: разница связана с творческой способностью. Объяснить движение конкретной планеты человеку, который уже понимает общую теорию относительности, – чисто механи-

---

<sup>2</sup> Черные дыры в квазарах в миллионы раз массивнее звезд. Они возникли либо в результате длительной аккумуляции массы сколлапсировавшими звездами, либо непосредственно за счет коллапса огромных газовых облаков. – *Прим. ред.*

ческая задача, хотя она может оказаться очень сложной. Но чтобы использовать существующую теорию для объяснения квазаров, необходимо творческое мышление. Таким образом, чтобы понять все, что понято в астрофизике на сегодняшний день, вам придется явным образом изучить теорию квазаров. А вот знать орбиту какой-то определенной планеты не обязательно.

Таким образом, хотя количество известных нам теорий, да и зафиксированных фактов, растет как снежный ком, из этого еще не следует, что сама структура становится более сложной для понимания. Дело в том, что, становясь более подробными и многочисленными, отдельные теории постоянно «теряют актуальность», так как понимание, которое они содержат, переходит к глубоким, более общим теориям. Количество последних все время уменьшается, но они становятся более глубокими и более общими. Под «большой общностью» я подразумеваю то, что каждая из этих теорий больше говорит о большем количестве ситуаций, чем несколько отдельных теорий ранее. Под «большой глубиной» я понимаю то, что каждая из них объясняет больше (заклучает в себе большее понимание), чем ее предшественники, вместе взятые.

Если бы вы захотели построить большое сооружение, мост или собор несколько веков назад, вам понадобился бы опытный мастер. Он бы имел некоторые знания о том, как придать прочность и устойчивость конструкции с минимально

возможными усилиями и затратами, но не смог бы выразить большую часть этого знания на языке математики и физики, как мы можем сделать это сегодня. Вместо этого он полагался бы главным образом на сложное сочетание интуиции, навыков и эмпирических правил, которые узнал во времена своего ученичества, а впоследствии, возможно, усовершенствовал, руководствуясь догадками и долгим опытом работы. Тем не менее эта интуиция, эти навыки и эмпирические правила на самом деле были явными и неявными *теориями*, и они содержали реальное знание о предметах, которые сегодня мы называем инженерным делом и архитектурой. Именно из-за знания этих теорий, пусть очень неточных по сравнению с существующими сегодня и применимых в небольшом числе случаев, вы и наняли бы этого мастера. Восхищаясь строениями, простоявшими века, люди часто забывают, что видят лишь то, что уцелело. Подавляющее большинство сооружений, построенных в средние века и раньше, давно развалилось, и зачастую вскоре после постройки. Особенно это касалось новаторских сооружений. Считалось очевидным, что любое нововведение несет риск катастрофы, и строители редко отступали от традиционных конструкций и методов. В наши дни, напротив, большая редкость, если какое-то строение (пусть даже не похожее ни на что из построенного раньше) развалится из-за негодного проекта. Все, что мог построить квалифицированный строитель древности, его современные коллеги могут построить

лучше и с намного меньшими усилиями. Они также могут соорудить такие строения, о которых он вряд ли мечтал, например, небоскребы или космические станции. Они могут использовать такие материалы, как стекловолокно или железобетон, о которых он никогда не слышал и которые вряд ли смог бы использовать, даже если бы они каким-то образом у него появились, так как он имел весьма смутные и неточные представления о поведении материалов.

Мы достигли нынешнего уровня знаний не потому, что собрали много теорий, подобных тем, что были известны древнему мастеру. Наше знание, явное и неявное, не просто намного больше – оно отличается по своей структуре. Как я уже сказал, современных теорий меньше, но они более общие и более глубокие. В каждой ситуации, с которой сталкивался древний мастер, выполняя какую-то работу (к примеру, выбирая толщину несущей стены), он пользовался довольно специфической интуицией или эмпирической зависимостью, которые применительно к нестандартным случаям могли дать безнадежно неправильные ответы. В наше время проектировщик принимает такие решения, используя настолько общую теорию, что ее можно применить к стенам, сделанным из любых материалов, в любой среде: на Луне, под водой и где угодно еще. Причина ее общности в том, что теория основана на достаточно глубоких объяснениях принципов поведения материалов и конструкций. Чтобы найти правильную толщину стены из незнакомого материала, ис-

пользуют ту же теорию, для обычной стены, но приступая к расчетам, берут другой набор фактов – другие числовые значения различных параметров. Конечно, приходится искать в справочнике такие факты, как предел прочности на разрыв и упругость материала, но в дополнительном понимании нет необходимости.

Вот почему современный архитектор не нуждается в более длительной или трудоемкой подготовке, понимая гораздо больше, чем древний строитель. Возможно, типичную теорию из учебной программы современного студента понять сложнее, чем любую из эмпирических зависимостей древнего строителя; но современных теорий гораздо меньше, а их объяснительная сила придает им и другие качества, такие как красота, внутренняя логика и связь с другими предметами, благодаря которым эти теории проще изучать. Сейчас мы знаем, что некоторые древние эмпирические правила были ошибочными, другие – истинными или близкими к истине, и мы знаем причины этого. Некоторыми эмпирическими правилами мы до сих пор пользуемся, но ни одно из них уже не является основой для понимания того, почему конструкции не рушатся.

Я, конечно, не отрицаю того, что специализация происходит во многих предметах, где увеличивается знание, включая и архитектуру. Однако это не однонаправленный процесс, так как специализации часто исчезают: колеса уже не проектируют и не изготавливают колесные мастера, плуги –

мастера по плугам, а письма уже не пишут писцы. Тем не менее достаточно очевидно, что тенденция углубления и объединения, которую я описывал, не единственная: параллельно с ней происходит непрерывное *расширение*. Поясню: новые идеи часто не просто вытесняют, упрощают или объединяют существующие. Они также расширяют человеческое понимание на области, которые раньше не были понятны совсем или о существовании которых даже не догадывались. Они могут открывать новые возможности, ставить новые задачи, порождать новые специализации и даже новые предметы. И когда такое происходит, нам может потребоваться, по крайней мере на время, изучать больше информации, чтобы понять все это.

Медицинская наука, возможно, является наиболее распространенным примером растущей специализации, которая кажется неизбежным следствием роста знания по мере того, как открываются новые лекарства и способы лечения многих болезней. Но даже в медицине присутствует противоположная тенденция объединения, которая непрерывно усиливается. Общеизвестно, что многие функции тела, как, впрочем, и механизмы многих болезней, еще мало изучены. Следовательно, некоторые области медицинского знания все еще состоят, главным образом, из собрания записанных фактов, навыков и интуиции врачей, имеющих опыт в лечении определенных болезней и передающих эти навыки и интуицию из поколения в поколение. Другими словами, большая

часть медицины все еще не вышла из эпохи эмпирических правил, и вновь обнаруженные такие правила стимулируют появление специализаций. Но когда в результате медицинских и биохимических исследований появляются более глубокие объяснения процессов болезни (и здоровых процессов) в теле, увеличивается и понимание. Когда в различных частях тела, в основе разных болезней обнаруживают общие молекулярные механизмы, на смену узким теориям приходят более общие. Как только болезнь понимают настолько, что могут вписать ее в общую структуру, роль специалиста уменьшается. Вместо этого врачи, столкнувшись с незнакомой болезнью или редким осложнением, могут все в большей степени полагаться на объяснительные теории. Они могут посмотреть известные факты в справочнике, но затем применить обобщенную теорию, чтобы разработать необходимое лечение и ожидать, что оно будет эффективным, даже если никогда раньше оно не применялось.

Таким образом, вопрос о том, сложнее или проще становится понять все, что понято, зависит от баланса двух противоположных результатов роста знания: *расширения* и *углубления* наших теорий. Из-за расширения понять их сложнее, из-за углубления – проще. Один из тезисов этой книги состоит в том, что углубление медленно, но уверенно побеждает. Другими словами, утверждение, в которое я отказывался поверить, будучи ребенком, и в самом деле ложно, а практически истинно противоположное. Мы не удаляемся от со-

стояния, когда один человек способен понять все, что понято, мы приближаемся к нему.

Я не утверждаю, что скоро мы поймем *всё*. Это совсем другой вопрос. Я не верю, что сейчас мы близки или когда-то приблизимся к пониманию *всего, что существует*. Я говорю о возможности понимания *всего, что понято*. Это, скорее, зависит не от содержания нашего знания, а от его структуры. Но структура нашего знания – независимо от возможности его выражения в теориях, составляющих понятное целое – безусловно, зависит от того, на что похожа структура реальности в целом. Если свободный рост знания будет продолжаться бесконечно, и если мы, несмотря ни на что, приближаемся к тому состоянию, когда один человек сможет понять все, что понято, значит, глубина наших теорий должна увеличиваться достаточно быстро, чтобы обеспечить эту возможность. Это может произойти, если только сама структура реальности настолько едина, что по мере роста нашего знания мы сможем понимать ее все больше и больше. Если так и будет продолжаться, то в конечном итоге наши теории станут настолько общими, глубокими и составляющими друг с другом единое целое, что превратятся в единственную теорию единой структуры реальности. Такая теория не объяснит каждый аспект реальности: это недостижимо. Но она охватит все известные объяснения и будет применима ко всей структуре реальности настолько, насколько последняя будет понята. В то время как все предыдущие теории

относились к конкретным предметам, это будет теория всех предметов: *Теория Всего*.

Эта теория, безусловно, не будет последней в своем роде, она будет первой. В науке считается очевидным, что даже наши лучшие теории обречены быть в некотором роде несовершенными и проблематичными, и мы ожидаем, что в свое время их вытеснят более глубокие и точные теории. И этот прогресс не остановится, когда мы откроем универсальную теорию. Например, Ньютон дал нам первую универсальную теорию тяготения и объединил, помимо всего прочего, небесную и земную механику. Но его теории вытеснила общая теория относительности Эйнштейна, которая помимо этого включила в физику геометрию (которую раньше считали разделом математики) и за счет этого дает более глубокие объяснения и является более точной. Первая действительно универсальная теория – которую я буду называть Теорией Всего – подобно всем нашим теориям, которые существовали до нее и появятся после нее, не будет ни абсолютно истинной, ни бесконечно глубокой, а потому, в конечном итоге, ее заменит другая теория. Но она не будет превзойдена за счет объединения с теориями других предметов, ибо она сама будет теорией всех предметов. В прошлом значительный прогресс в понимании порой достигался за счет объединения теорий. В других случаях прогресс был вызван структурными изменениями в понимании конкретного предмета, как, например, когда мы перестали считать Землю центром

Вселенной. После первой Теории Всего уже не будет значительных объединений. Все последующие великие открытия будут переменами в понимании мира в целом, то есть изменениями в нашем мировоззрении. Создание Теории Всего будет последним большим объединением и в то же время первым шагом к возникновению нового мировоззрения. Я считаю, что именно такое объединение и переход происходят сейчас. Соответствующий взгляд на мир и является темой этой книги.

Считаю своей обязанностью сразу подчеркнуть, что я говорю не просто о «теории всего», которую в скором будущем надеются открыть некоторые специалисты в области физики элементарных частиц. Их «теория всего» должна стать объединенной теорией всех основных взаимодействий, известных физике, а именно: гравитации, электромагнетизма и ядерных сил. Она также должна описать все типы существующих субатомных частиц, их массы, спины, электрические заряды и другие свойства, а также их взаимодействия. При наличии достаточно точного описания начального состояния любой изолированной физической системы такая теория в принципе могла бы предсказать будущее поведение системы. Если точное поведение системы в силу устройства природы непредсказуемо, то теория должна описать все возможные варианты поведения системы и назвать их вероятности. На практике часто невозможно определить с высокой точностью начальное состояние интересующих нас систем,

и в любом случае расчет предсказаний может быть слишком сложным во всех ситуациях, кроме простейших. Тем не менее такая объединенная теория частиц и взаимодействий вместе с указанием начального состояния Вселенной в момент Большого взрыва (события, с которого и началась наша Вселенная) в принципе будет содержать всю информацию, необходимую для предсказания всего, что можно предсказать (рис. 1.1).

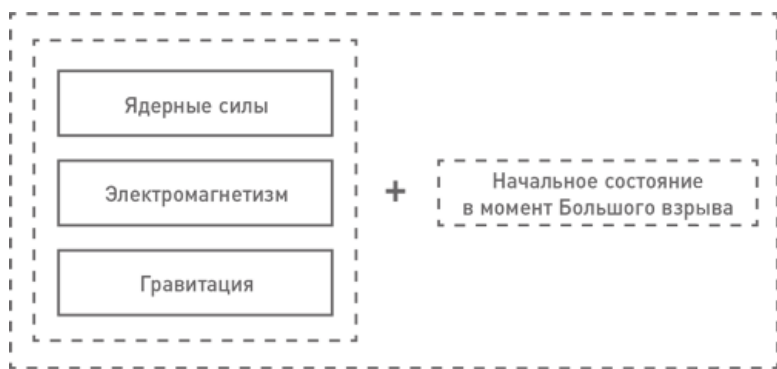


Рис. 1.1. Неадекватная концепция «теории всего»

Но предсказание – еще не объяснение. Та «теория всего», на которую так надеются физики, даже совместно с теорией начального состояния, в лучшем случае представит лишь крошечную грань истинной Теории Всего. Эта теория сможет (в принципе) *предсказать* все. Но нельзя ожидать, что она *объяснит* намного больше, чем существующие теории,

за исключением немногих явлений, определяемых особенностями субатомных взаимодействий, таких как столкновения внутри ускорителей элементарных частиц или нетривиальная история взаимопревращения частиц во время Большого взрыва. Что же побуждает ученых использовать термин «теория всего» для столь узкой, хотя и захватывающей части знания? Я полагаю – еще один ошибочный взгляд на природу науки, который осуждают многие критики науки, но (увы!) одобряют многие ученые: представление о том, что наука по существу является *редукционистской*. Да, наука как будто объясняет все путем редукции, раскладывая вещи на составляющие. Например, сопротивление стены проникновению или опрокидыванию объясняется тем, что стена – это огромный набор взаимодействующих молекул. Свойства этих молекул, в свою очередь, объясняют через составляющие их атомы и взаимодействие этих атомов друг с другом и так далее до мельчайших частиц и самых фундаментальных взаимодействий. Редукционисты считают, что все научные объяснения и, возможно, любые достаточно глубокие объяснения принимают именно такую форму.

Редукционистское мировоззрение естественным образом ведет к созданию иерархии предметов и теорий в соответствии с тем, насколько они близки к самым «низкоуровневым» из известных нам предсказательных теорий. В этой иерархии логика и математика образуют незыблемую основу, на которой строится система научных взглядов. Фун-

даментом должна стать редукционистская «теория всего» – универсальная теория частиц, взаимодействий, пространства и времени вместе с некоторой теорией о том, каково было начальное состояние Вселенной. Остальная физика образует первые несколько этажей. Астрофизика и химия займут более высокий уровень, геология – еще более высокий и т. д. Затем здание разделится на множество башен – предметов еще более высокого уровня, таких как биохимия, биология и генетика. На колеблющихся вершинах, уходящих в стратосферу, примостятся такие предметы, как теория эволюции, экономика, психология и информатика, которые в этой картине являются производными в почти невыносимой степени.

В настоящее время мы располагаем только приближениями к редукционистской «теории всего». Они уже достаточно точно могут предсказывать законы движения отдельных субатомных частиц. Используя эти законы, современные компьютеры могут рассчитать до определенного уровня детализации движение любой изолированной группы из нескольких взаимодействующих частиц, если известно их начальное состояние. Но даже мельчайшая крупинка вещества, видимая невооруженным глазом, содержит триллионы атомов, каждый из которых состоит из множества субатомных частиц и непрерывно взаимодействует с внешним миром, так что предсказать поведение этой крупинки через поведение образующих ее частиц не представляется возможным. Дополняя точные законы движения различными при-

ближенными схемами, мы можем предсказать некоторые аспекты общего поведения достаточно крупных объектов, например, температуру плавления или кипения данного химического соединения. Большая часть химии сводится таким образом к физике. Но для наук более высокого уровня программа редуccionистов – всего лишь дело принципа. Никто на самом деле не собирается выводить многочисленные принципы биологии, психологии или политики из принципов физики. Причина, по которой предметы более высокого уровня вообще поддаются изучению, состоит в том, что в определенных условиях непостижимо сложное поведение огромного количества частиц становится основой простоты и понятности. Это называется *эмерджентностью*, то есть проявлением: высокоуровневая простота как бы проявляется из низкоуровневой сложности. Явления высокого уровня, относительно которых мы имеем понятные факты и не можем просто вывести их из низкоуровневых теорий, называются *эмерджентными явлениями*. Например, стена могла быть крепкой, потому что ее строители боялись, что их враги могут попытаться проломить эту стену. Это высокоуровневое объяснение прочности стены невыводимо из низкоуровневого объяснения, которое я привел выше (хотя и не является несовместимым с ним). «Строители», «враги», «боялись», «попытаться» – это эмерджентные явления. Цель высокоуровневых наук – дать нам возможность понять эмерджентные явления, самыми важными из которых, как мы

увидим, являются *жизнь, мысль и вычисление*.

Кстати, противоположностью редукционизма является *холизм* – идея о том, что единственно законными являются объяснения через системы высокого уровня, – и она еще более ошибочна, чем редукционизм. Чего ожидают от нас холисты? Того, что мы прекратим наши поиски молекулярного происхождения болезней? Или станем отрицать, что люди состоят из субатомных частиц? Там, где существуют редукционистские объяснения, они столь же желанны, как любые другие. Там, где целые научные дисциплины удается свести к низкоуровневым теориям, мы, ученые, в той же мере обязаны найти эти упрощения, как и обязаны открывать любое другое знание.

Редукционист считает, что цель науки – разложить все на составляющие. По мнению инструменталиста, все дело в способности предсказывать события. Для каждого из них существование наук высокого уровня – лишь вопрос удобства. Сложность мешает нам использовать элементарную физику для получения высокоуровневых предсказаний, и вместо этого мы угадываем, каковы были бы эти предсказания, если бы мы могли их получить, и эмерджентность дает нам шанс на успех. Утверждается, что именно в этом заключается смысл высокоуровневых наук. Таким образом, для редукционистов и инструменталистов, которые игнорируют как истинное устройство, так и истинную цель научного знания, основой предсказательной иерархии физики является,

по определению, «теория всего». Но для всех остальных научное знание состоит из объяснений, а структура научного объяснения не отражает иерархию редукционистов. Объяснения существуют на каждом уровне иерархии. Многие из них автономны и относятся только к понятиям данного уровня (например, «медведь съел мед, потому что был голоден»). Многие содержат дедуктивные выводы, направление которых противоположно направлению редукционистских объяснений. То есть они объясняют вещи, не разделяя их на меньшие и более простые, а рассматривают их как составляющие более крупных и сложных вещей, для которых у нас, тем не менее, есть объяснительные теории. Например, рассмотрим конкретный атом меди на кончике носа статуи сэра Уинстона Черчилля, которая находится на Парламентской площади в Лондоне. Я попытаюсь объяснить, почему этот атом меди находится там. Это произошло потому, что Черчилль был премьер-министром в Палате общин, которая расположена неподалеку; и потому, что его идеи и лидерство способствовали победе союзных сил во Второй мировой войне; и потому, что принято чествовать таких людей, ставя им памятники; и потому, что бронза, традиционный материал для таких памятников, содержит медь и т. д. Таким образом, мы объясним физическое низкоуровневое наблюдение – присутствие атома меди в определенном месте – через теории чрезвычайно высокого уровня о таких эмерджентных явлениях, как идеи, руководство, война и традиция.

Нет никакой причины, по которой, пусть даже в принципе, должно существовать какое-либо более низкоуровневое *объяснение* появления этого атома меди в этом месте, чем то, которое я только что привел. По-видимому, редукционистская «теория всего» в принципе могла бы дать низкоуровневое *предсказание* вероятности, что такая статуя будет существовать, если известно состояние (скажем) Солнечной системы в какое-то более раннее время. Точно так же эта теория в принципе описала бы, как эта статуя могла туда попасть. Но такие описания и предсказания (конечно же, абсолютно нереальные) ничего бы не объясняли. Они просто описывали бы траекторию движения каждого атома меди от медного рудника через плавильную печь, мастерскую скульптора и т. д. Они также могли бы указать, какое влияние на эти траектории оказывают силы, действующие со стороны окружающих атомов, например, тех, из которых состоят тела шахтеров и скульптора, и предсказать таким образом существование и форму статуи. В действительности в такое предсказание пришлось бы включить атомы по всей планете, вовлеченные, кроме всего прочего, в сложное движение, которое мы называем Второй мировой войной. Но даже если бы вы обладали сверхчеловеческой способностью проследить такие пространственные предсказания нахождения атома меди в том месте, вы все равно не смогли бы сказать: «Да, теперь я понимаю, почему он там находится». Вы просто знали бы, что его попадание туда таким образом неизбежно

(или вероятно, или как угодно еще), если известны начальные конфигурации атомов и законы физики. Если бы вы захотели понять, почему он там находится, у вас по-прежнему не было бы другого выбора, кроме как сделать следующий шаг. Вам пришлось бы выяснить все, что касается этой конфигурации атомов и тех траекторий, которые способствуют попаданию атома меди именно в это место. Такое исследование стало бы творческой задачей, какой всегда является открытие новых объяснений. Вы бы обнаружили, что определенные конфигурации атомов обеспечивают такие эмерджентные явления, как лидерство и война, связанные друг с другом высокоуровневыми объяснительными теориями. И только узнав все эти теории, вы смогли бы полностью понять, почему этот атом меди находится именно там.

В редукционистском мировоззрении законы, управляющие взаимодействием субатомных частиц, имеют первостепенную значимость, поскольку они являются основой иерархии всего знания. Но в реальной структуре научного знания и в структуре нашего знания в целом такие законы играют гораздо более скромную роль.

Какова же эта роль? Мне кажется, что ни одна из рассматривавшихся до сих пор теорий-кандидатов на звание «теории всего» не содержит большой новизны в способе объяснения. Возможно, самый передовой подход с объяснительной точки зрения – это *теория суперструн*, в которой элементарными строительными блоками материи являются протя-

женные объекты, «струны», а не точечные частицы. Но ни один существующий подход не предлагает нового способа объяснения – нового в том смысле, в каком новым было объяснение Эйнштейном сил притяжения на основе искривленного пространства и времени. На самом деле ожидается, что «теория всего» унаследует практически всю объяснительную структуру существующих теорий электромагнетизма, ядерных сил и гравитации: их физические концепции, их язык, их математическое описание и форму их объяснений. Поэтому мы видим в этой базовой структуре, которая нам уже известна из существующих теорий, вклад фундаментальной физики в наше общее понимание.

В физике существует две теории, значительно более глубокие, чем остальные. Первая – это общая теория относительности, которая, как я уже говорил, является нашей лучшей теорией пространства, времени и гравитации. Вторая – еще более глубокая – это *квантовая теория*. Эти две теории (но никакая из существующих или ожидаемых теорий субатомных частиц) создают подробную объяснительную и формальную концептуальную основу, в рамках которой выражаются все остальные теории современной физики, и содержат основные физические принципы, которым подчиняются все прочие теории. Объединение общей теории относительности и квантовой теории – с целью получения *квантовой теории гравитации* – было на протяжении нескольких десятилетий основным предметом поисков физиков-теоре-

тиков. Оно должно было стать частью любой теории всего, как в узком, так и в широком смысле этого термина. Как мы увидим в следующей главе, квантовая теория, как и теория относительности, дает революционно новый способ объяснения физической реальности. Причина, по которой квантовая теория глубже теории относительности, лежит большей частью не в физике, а вне ее, поскольку ее следствия простираются далеко за пределы физики и даже за пределы самой науки в привычном ее понимании. Квантовая теория является одной из *четырех основных нитей*, образующих наше современное понимание структуры реальности.

Прежде чем назвать три другие нити, я должен упомянуть еще один способ искажения редукционизмом структуры научного знания. Редукционизм предполагает не только то, что объяснение всегда состоит в разделении системы на меньшие и более простые системы, но и то, что все поздние события объясняются через более ранние; другими словами, единственный способ что-то объяснить – это указать причины. А это подразумевает, что, чем раньше произошли события, на основе которых мы что-то объясняем, тем лучше объяснение, так что в конечном счете все лучше объяснять на основе первоначального состояния Вселенной.

«Теория всего», исключая характеристику первоначального состояния Вселенной, не является полным описанием физической реальности, потому что она дает только законы движения; а законы движения сами по себе порождают

лишь условные предсказания. То есть они никогда не дают однозначных утверждений о том, что происходит, а лишь о том, что произойдет в заданный момент времени, если известно, что происходило раньше. Только если известна полная характеристика начального состояния, в принципе можно вывести полное описание физической реальности. Существующие космологические теории не дают полной характеристики начального состояния даже в принципе, но они утверждают, что изначально Вселенная была очень маленькой, очень горячей и очень однородной по своей структуре. Но мы также знаем, что Вселенная не могла иметь абсолютно однородную структуру, потому что это будет несовместимо (в соответствии с теорией) с тем распределением галактик, которые мы наблюдаем сегодня на небе. Первоначальные вариации плотности, или «комковатость» материи, должны были значительно усилиться под действием гравитации – относительно более плотные участки собирали больше материи и становились более плотными, так что сначала эти вариации могли быть очень слабыми. Но какими бы маленькими они ни были, они имеют огромное значение для любого редукционистского описания реальности, потому что почти все, что мы наблюдаем вокруг, – от распределения звезд и галактик в небе до появления бронзовых статуй на планете Земля – с точки зрения фундаментальной физики является следствием этих вариаций. Если наше редукционистское описание стремится охватить нечто большее, чем са-

мые важные свойства наблюдаемой вселенной, нам нужна теория, которая описывает эти исключительно важные первоначальные отклонения от однородности.

Я попытаюсь заново сформулировать последнее требование без редуccionистского уклона. Законы движения любой физической системы дают только условные предсказания и, следовательно, совместимы со многими возможными историями этой системы. (Этот вопрос не имеет отношения к ограничениям на предсказуемость, которые накладывает квантовая теория и о которых я расскажу в следующей главе). Например, законы движения, которым подчиняется ядро, выпущенное из пушки, совместимы со многими возможными траекториями, каждая из которых соответствует одному из возможных направлений и углов наклона ствола пушки при выстреле (рис. 1.2). Математически законы движения можно выразить системой уравнений, которые называют *уравнениями движения*. Существует много различных решений этих уравнений, каждое из которых описывает какую-то возможную траекторию. Чтобы определить, какое решение описывает фактическую траекторию, необходимо предоставить *дополнительные данные* – некоторую информацию о том, что происходит в действительности. Один из способов осуществить это заключается в описании начального состояния, в данном случае направления ствола пушки. Однако существуют и другие способы. Например, мы точно так же могли бы определить конечное состояние – положение и на-

правление движения пушечного ядра в момент его приземления. Или мы могли бы определить положение самой высокой точки траектории. Неважно, какие именно дополнительные данные мы даем, если они позволяют выбрать одно конкретное решение системы уравнений движения. Объединение любых дополнительных данных такого рода с законами движения и дает теорию, которая описывает все, что происходит с пушечным ядром между моментами выстрела до падения.

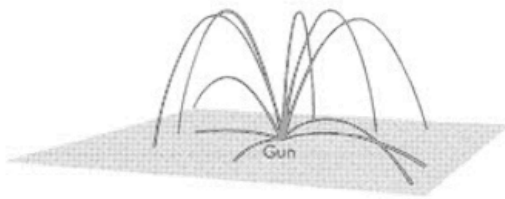


Рис. 1.2. Некоторые возможные траектории движения пушечного ядра. Каждая траектория совместима с законами движения, но только одна из них относится к некоторому конкретному случаю.

Сходным образом законы движения для физической реальности в целом будут иметь много решений, каждое из которых соответствует конкретной истории. Для завершения описания нам придется указать, какой вариант истории произошел в действительности, предоставив достаточно дополнительных данных для выбора одного из многих реше-

ний уравнений движения. В простых космологических моделях одним из способов указать такие данные является определение начального состояния Вселенной. Но мы могли бы вместо этого определить конечное состояние или состояние в любой другой момент времени; или мы могли бы предоставить некоторую информацию о начальном состоянии, какую-то информацию о конечном состоянии и сообщить кое-что о промежуточных состояниях. В общем, объединив достаточное количество дополнительных данных разного рода с законами движения, мы получили бы, в принципе, описание физической реальности.

Для пушечного ядра, как только мы определим, скажем, его конечное состояние, мы сможем легко вычислить его начальное состояние, и наоборот, поэтому между различными методами указания дополнительных данных не существует практической разницы. Однако для Вселенной в целом большая часть таких вычислений очень трудна. Я уже говорил, что мы предполагаем существование «комковатости» материи в начальных состояниях на основании сегодняшних наблюдений неоднородности Вселенной. Но это исключение: большая часть нашего знания о дополнительных данных – о том, что именно происходит, – существует в форме высокоуровневых теорий эмерджентных явлений и, следовательно, по определению не поддается практическому выражению в виде утверждений о начальном состоянии. Например, в большей части решений уравнений движения Вселенная в

своём начальном состоянии не обладает свойствами, необходимыми для появления жизни. Следовательно, наше знание того, что жизнь *появилась*, – это значительная часть дополнительных данных. Возможно, мы никогда не узнаем, что конкретно означает это ограничение для детальной структуры Большого взрыва, но мы можем делать выводы непосредственно из него. Например, первая точная оценка возраста Земли была сделана на основе биологической теории эволюции, и она противоречила лучшим физическим теориям того времени. Только редуccionистское предубеждение могло заставить нас считать, что эти рассуждения были почему-то менее обоснованными или что в общем случае теоретизирование о начальном состоянии является более «фундаментальным», чем об эмерджентных чертах реальности.

Даже в области фундаментальной физики идея о том, что теории начального состояния содержат наши самые глубокие знания, является серьезным заблуждением. Одна из причин этого состоит в том, что она логически исключает возможность объяснения самого начального состояния: почему начальное состояние было таким, каким оно было, – однако в действительности у нас есть объяснения многих аспектов начального состояния. В еще более общей форме: никакая теория *времени*, по-видимому, не может объяснить это через то, что было «раньше»; тем не менее у нас есть глубокие объяснения природы времени, вытекающие из общей теории относительности и в еще большей мере из квантовой теории

(см. главу 11).

Таким образом, характер многих наших описаний, предсказаний и объяснений реальности не имеет ничего общего с картиной «начальное состояние плюс законы движения», к которой приводит редукционизм. Не существует причины рассматривать теории высокого уровня как «граждан второго сорта». Наши теории субатомной физики и даже квантовая теория или теория относительности вовсе не являются привилегированными по отношению к теориям, описывающим эмерджентные свойства. Вероятно, ни одна из этих областей знания не сможет включить все остальные. Каждая из них содержит логические следствия для остальных, однако не все эти выводы можно сформулировать, поскольку они являются эмерджентными свойствами из области действия других теорий. В действительности неправильно употреблять сами термины «высокий уровень» и «низкий уровень». Законы биологии, например, являются высокоуровневыми эмерджентными следствиями законов физики. Но логически некоторые законы физики являются «эмерджентными» следствиями законов биологии. Могло быть даже и так, что законы, которым подчиняются биологические и другие эмерджентные явления, полностью определяли бы законы фундаментальной физики. В любом случае, когда две теории логически связаны между собой, логика не диктует нам, какую из них рассматривать как определяющую для второй в целом или частично. Это зависит от объяснительных от-

ношений между теориями. Особое положение занимают не те теории, которые ссылаются на конкретную шкалу размеров или сложности, и не те, которые расположены на определенном уровне предсказательной иерархии, а те, которые содержат самые глубокие объяснения. Структура реальности состоит не только из редукционистских ингредиентов, таких как пространство, время и субатомные частицы, – но и из жизни, мысли, вычислений и многого другого, к чему относятся эти объяснения. Теория становится более фундаментальной и менее производной не из-за своей близости к якобы существующей предсказательной базе физики, а из-за своей близости к нашим самым глубоким объяснительным теориям.

Квантовая теория, как я уже говорил, является одной из таких теорий. Три другие основные нити объяснения, через которые мы стремимся понять структуру реальности, относятся к «высокому уровню» с точки зрения квантовой теории. Это *теория эволюции* (главным образом эволюции живых организмов), *эпистемология* (теория познания) и *теория вычисления* (о вычислительных машинах и о том, что они могут вычислить, а чего не могут). Как вы увидите, между основными принципами этих четырех, на первый взгляд, независимых предметов были обнаружены такие глубокие и разнообразные связи, что уже невозможно наилучшим образом понять один из них, не понимая три оставшихся. Все четыре формируют связную объяснительную структуру, кото-

рая имеет настолько обширную сферу применимости и охватывает столь значительную часть нашего понимания мира, что, на мой взгляд, ее уже можно справедливо назвать первой настоящей Теорией Всего. Таким образом, мы подошли к знаменательному моменту в истории идей – моменту, когда масштаб нашего понимания становится в полной мере универсальным. До настоящего времени все понимаемое нами касалось того или иного аспекта реальности, не характерного для целого. В будущем понимание охватит общую концепцию реальности: все объяснения будут пониматься на фоне универсальности, а каждая новая идея будет автоматически стремиться освещать не только конкретный предмет, но в различной степени все предметы. Углубление понимания, которое мы в конечном итоге получим от этого последнего великого объединения, может значительно превзойти то, что принесло любое из предыдущих объяснений. Мы увидим, что здесь объединяется и объясняется не только физика и не только наука, но и, в потенциале, весьма далекие области философии, логики и математики, этики, политики и эстетики – возможно, все, что мы понимаем в настоящее время, а может быть, и многое из того, что мы еще не понимаем.

Какой же тогда вывод я адресую себе-ребенку, который отвергал идею о том, что рост знания делает мир менее понятным? Я соглашусь с ним, хотя сейчас я считаю, что важно не то, может ли *одна* из особей нашего конкретного вида понять все то, что понимает весь вид. Важно то, действитель-

но ли едина и понятна сама структура реальности. Есть веская причина считать, что это так. Будучи ребенком, я просто знал это: сейчас я могу это объяснить.

# Терминология

*Эпистемология* – учение о природе знания и процессах, которые его создают.

*Объяснение* – (грубо) утверждение о природе и причинах вещей.

*Инструментализм* – система взглядов, в соответствии с которой целью научной теории является предсказание результатов экспериментов.

*Позитивизм* – крайняя форма инструментализма, строящаяся на тезисе, что все утверждения, за исключением тех, которые что-либо описывают или предсказывают, не имеют смысла. (Этот взгляд сам не имеет смысла по своим же критериям.)

*Редуктивное объяснение* – это объяснение, которое раскладывает все вещи на составляющие более низкого уровня.

*Редукционизм* – система взглядов, в соответствии с которой научные объяснения по природе своей являются редуктивными.

*Холизм* – идея о том, что обоснованными являются только объяснения, сделанные на основе систем более высокого уровня; противоположность редукционизма.

*Эмерджентность* – эмерджентным называется такое явление (например, жизнь, мысль или вычисление), относительно которого существуют понятные факты или объясне-

ния, которое не выводится просто из низкоуровневой теорий низкого уровня, но которое можно объяснить или предсказать на базе высокоуровневой теории, относящейся непосредственно к этому явлению.

# Резюме

Научное знание, как и все человеческое знание, состоит главным образом из объяснений. Факты можно посмотреть в справочнике, предсказания важны только при проведении решающих экспериментов для выбора между конкурирующими научными теориями, каждая из которых уже прошла проверку в качестве хорошего объяснения. По мере того, как новые теории вытесняют старые, наше знание становится как шире (когда появляются новые предметы), так и глубже (когда наши фундаментальные теории объясняют больше и становятся более обобщенными), причем глубина побеждает. Таким образом, мы не удаляемся от того состояния, когда один человек сможет понять все, что понято, а приближаемся к нему. Наши самые глубокие теории настолько переплетаются друг с другом, что их можно понять только совместно, как единую теорию объединенной структуры реальности. Эта Теория Всего имеет гораздо больший масштаб, чем та «теория всего», которую ищут специалисты в области физики элементарных частиц, потому что структура реальности состоит не только из таких редуccionистских ингредиентов, как пространство, время и субатомные частицы, но также, например, из жизни, мысли и вычисления. *Четыре основные нити объяснения*, которые могут составить первую Теорию Всего, – это:

*квантовая физика* – см. главы 2, 9, 11–14;  
*эпистемология* – см. главы 3, 4, 7, 10, 13, 14;  
*теория вычислений* – см. главы 5, 6, 9, 10, 13, 14;  
*теория эволюции* – см. главы 8, 13, 14.

*Следующая глава посвящена первой и самой важной из четырех нитей* – квантовой физике.

## 2. Тени

*Рассмотрение физических явлений, происходящих при горении свечи, представляет собой самый широкий путь, которым можно подойти к изучению естествознания.*

*Майкл Фарадей. Курс из шести лекций по химической истории свечи<sup>3</sup>*

В своих знаменитых научных лекциях в Королевском институте Майкл Фарадей всегда побуждал своих слушателей изучать мир, рассматривая, что происходит при горении свечи. Я заменяю свечу электрическим фонариком. Это правомерно, поскольку устройство электрического фонарика во многом основано на открытиях Фарадея.

Я опишу несколько экспериментов, которые демонстрируют явления, лежащие в основе квантовой физики. Такого рода эксперименты со множеством вариантов и уточнений уже многие годы остаются основой существования квантовой оптики. Об их результатах не спорят, однако даже сейчас в некоторые из них трудно поверить. Базовые эксперименты удивительно просты. Они в сущности не требуют ни специализированных научных инструментов, ни больших познаний в математике или физике, потому что они заключаются всего лишь в отбрасывании теней. Обычный электриче-

---

<sup>3</sup> Цит. по: Фарадей М. История свечи. – М.: Наука, 1980. – Прим. ред.

ский фонарик может производить весьма странные картины света и тени. Если о них как следует подумать, обнаруживаются исключительной важности следствия. Чтобы объяснить их, нужны не просто новые физические законы, а новый *уровень* описания и объяснения, выходящий за пределы того, что раньше считали сферой науки. Прежде всего, эти картины открывают существование параллельных вселенных. Как это возможно? Какая мыслимая картина теней может повлечь за собой подобные выводы?

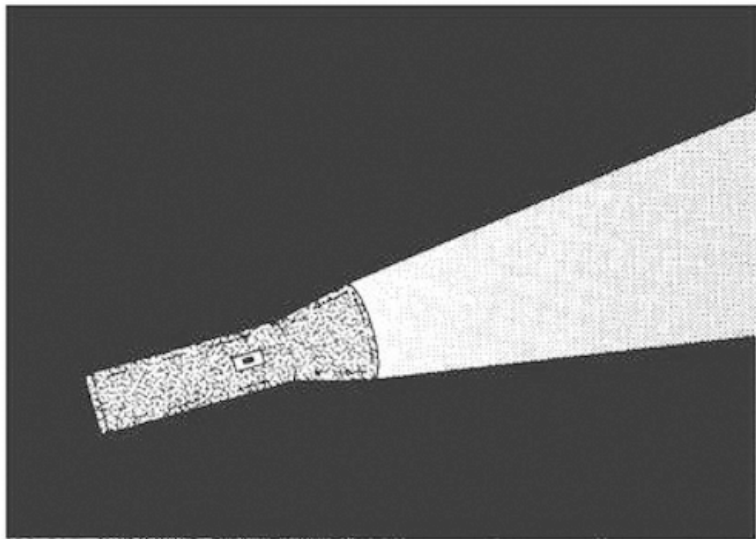


Рис. 2.1. Свет от электрического фонарика

Представьте себе, что в темной комнате, где нет других источников света, включили электрический фонарик. Нить накала лампочки испускает свет, который расширяется, образуя конус. Чтобы не усложнять эксперимент отраженным светом, стены комнаты должны быть матово-черными, полностью поглощающими свет. Или, поскольку мы проводим эти эксперименты только в своем воображении, можно представить себе комнату астрономических размеров, чтобы свет не успевал достичь стен и вернуться до завершения эксперимента. Рис. 2.1 иллюстрирует данный опыт. Но этот рисунок кое в чем не соответствует действительности: если бы мы смотрели на фонарик со стороны, то не увидели бы ни его самого, ни испускаемого им света. Невидимость – одно из наиболее понятных свойств света. Мы видим свет лишь тогда, когда он попадает в наши глаза (хотя мы обычно говорим о том, что видим объект, находящийся на линии нашего зрения, который последним повлиял на этот свет).

Мы не можем увидеть свет, который просто проходит мимо. Если бы в луче оказался отражающий объект или даже пыль или капельки воды, чтобы рассеять свет, мы увидели бы, где он проходил. Но поскольку в луче ничего нет и мы смотрим на него извне, никакая часть его света нас не достигает. Точным представлением того, что мы должны увидеть, была бы абсолютно черная картинка. Если бы там был второй источник света, мы могли бы увидеть фонарик, но опять же не его свет. Лучи света, даже самого интенсивного света,

который мы можем получить (с помощью лазеров), проходят друг сквозь друга, как если бы на их пути вовсе ничего не было.

На рис. 2.1 видно, что около фонарика свет наиболее яркий, а по мере удаления от него свет тускнеет, так как луч расширяется, чтобы осветить все бóльшую площадь. Наблюдателю, находящемуся внутри луча и удаляющемуся от фонарика спиной вперед, рефлектор будет казаться все меньше, а затем, когда он станет выглядеть точкой – все слабее. Но нет ли тут подвоха? Действительно ли свет способен распространяться беспредельно все более и более тонкими лучами? Ответ: нет. На расстоянии примерно 10 000 км свет фонарика станет слишком слабым, чтобы человеческий глаз мог его различить, и наблюдатель ничего не увидит. То есть человек не увидит ничего; а животное с более чувствительным зрением? Глаз лягушки в несколько раз чувствительнее человеческого: этого как раз достаточно, чтобы эксперимент принес существенно иной результат. Если наблюдателем будет лягушка и она будет удаляться от электрического фонарика, момент, когда она полностью потеряет его из вида, никогда не наступит. Вместо этого лягушка увидит, что фонарик начал мигать. Вспышки будут видны через неравные промежутки времени, которые будут увеличиваться по мере удаления лягушки от фонарика. А вот яркость каждой отдельной вспышки не будет меньше. На расстоянии 100 млн км от фонарика лягушка будет видеть в среднем только одну

вспышку света в день, но эта вспышка будет столь же яркой, как и наблюдаемая с любого другого расстояния.

К сожалению, лягушки не могут рассказать нам, что они видят. Поэтому при проведении реальных экспериментов мы используем фотоумножители (датчики света, чувствительность которых превышает чувствительность глаз лягушки), а вместо того, чтобы смотреть с расстояния в 100 млн км, ослабляем свет, пропуская его через темные фильтры. Однако принцип остается тем же самым, как и результат: не полная темнота и не однородный тусклый свет, а мигание, причем вспышки – одинаково яркие, независимо от того, насколько темный фильтр мы используем. Это мерцание показывает, что существует предел равномерного «растягивания» света. Пользуясь терминологией ювелиров, можно сказать, что свет не является бесконечно «ковким». Подобно золоту, небольшое количество света можно равномерно распределить по очень большой площади, но в конечном итоге, если попытаться растянуть его еще сильнее, он станет комковатым. Даже если можно как-нибудь предотвратить группирование атомов золота в отдельные комки, существует предел, за которым атомы уже нельзя разделить без того, чтобы золото не перестало быть золотом. Поэтому единственный способ сделать золотой лист толщиной в один атом еще тоньше – расположить атомы дальше друг от друга, чтобы между ними было пустое пространство. Но когда эти атомы окажутся достаточно далеко друг от друга, уже нельзя будет

считать, что они образуют сплошной лист. Например, если каждый атом золота будет находиться в среднем на расстоянии нескольких сантиметров от своего ближайшего соседа, можно будет провести рукой через этот «лист», не прикасаясь к золоту вообще.

Точно так же существует минимальный кусочек или «атом» света – *фотон*. Каждая вспышка, которую видит лягушка, вызвана фотоном, воздействующим на сетчатку ее глаза. Когда луч света становится слабее, фотоны сами по себе не ослабевают, но они отдаляются друг от друга, и между ними появляется пустое пространство (рис. 2.2). Очень слабый луч уже неправомерно называть «лучом», поскольку он не является непрерывным. Когда лягушка ничего не видит, это происходит не потому, что свет, попадающий в ее глаза, слишком слаб, чтобы воздействовать на сетчатку, а потому, что никакого света в ее глаза не попадает.



Рис. 2.2. Лягушки могут видеть отдельные фотоны

Это свойство – появляться лишь в виде кусочков дискретных размеров – называется *квантованием*. Отдельный комочек, например фотон, называется *квантом*. Квантовая теория получила свое название от этого свойства, которое она приписывает всем измеримым физическим величинам, а не только таким, которые, подобно количеству света или массе золота, квантуются из-за того, что соответствующие сущно-

сти на самом деле состоят из частиц, хотя и выглядят непрерывными. Даже для такой величины, как расстояние (например, между двумя атомами), представление о непрерывном диапазоне возможных значений оказывается идеализацией. В физике не существует измеримых непрерывных величин. В квантовой физике появляется множество новых эффектов, и, как мы увидим, квантование среди них является одним из простейших. Однако в некотором смысле оно остается ключом ко всем остальным явлениям, поскольку, если все квантуется, каким образом некая величина изменяет свое значение с одного на другое? Как объект попадает из одного *места* в другое, если не существует непрерывного диапазона промежуточных положений, где он может находиться по пути? В главе 9 я объясню, как это происходит, но сейчас позвольте мне отложить этот вопрос на некоторое время и вернуться в окрестности нашего фонарика, где луч выглядит непрерывным, потому что каждую секунду он направляет около  $10^{14}$  ( $10$  трлн) фотонов в глаз, который на него смотрит.

Является ли граница между светом и тенью резкой, или существует некая «серая зона»? Обычно существует довольно широкая серая область, и одна из причин ее существования показана на рис. 2.3. Есть темная область (называемая *полной тенью*), куда вообще не доходит свет от нити накала. Есть также полностью освещенная область, которая может получать свет от любого участка нити накала. Но поскольку

ку нить накала не является геометрической точкой, а имеет определенные размеры, между освещенной и неосвещенной областью также присутствует *полутень* – область, которая может получать свет только от некоторых участков нити накала. Если смотреть из области полутени, то видна лишь часть нити накала, и освещенность окажется меньше, чем в полностью освещенной области.

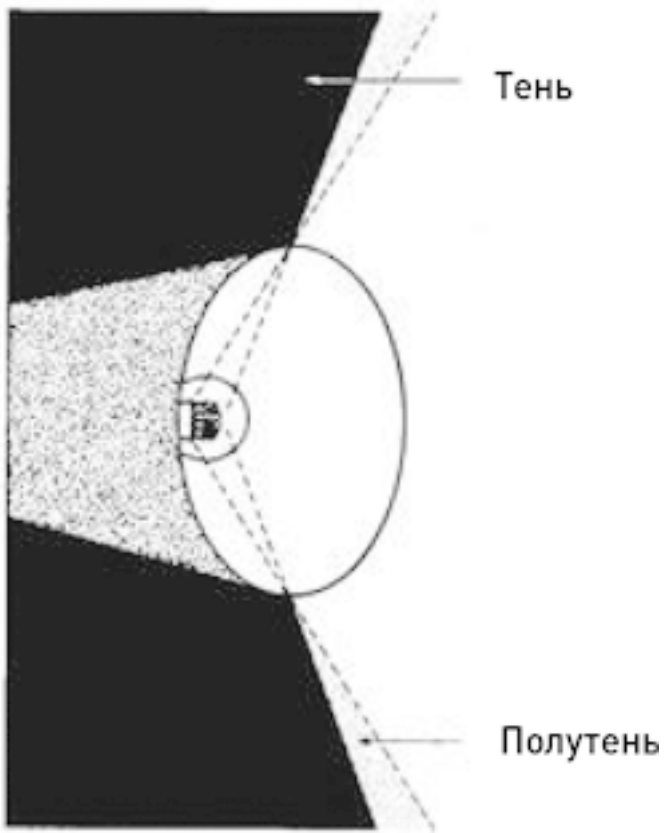


Рис. 2.3. Полная тень и полутень

Однако размер нити накала – не единственная причи-

на того, почему фонарик отбрасывает полутени. Различное влияние на свет оказывают рефлектор, расположенный позади лампочки, стеклянный колпак фонарика, разные швы и дефекты и т. д. Так что мы ожидаем появления сложной светотеневой картины просто потому, что сам фонарик сложен. Но случайные особенности фонариков не являются предметом наших экспериментов. За вопросом о свете фонарика скрывается более фундаментальный вопрос о свете вообще: существует ли, в принципе, некий предел того, сколь резкой может быть тень (другими словами, насколько узкой может быть полутень)? Например, если фонарик сделать из абсолютно черного (неотражающего) материала и использовать все меньшего размера нити накала, возможно ли сужать полутень беспредельно?

Глядя на рис. 2.3, кажется, что это возможно: если бы нить накала не имела размера, не было бы полутени. Но на рисунке я сделал некоторое допущение относительно света, а именно, что свет распространяется только прямолинейно. Из повседневного опыта нам известно, что это так и есть, поскольку заглядывать за угол мы не умеем. Однако тщательные эксперименты показывают, что свет не всегда движется по прямой. При некоторых обстоятельствах он искривляется.

Это трудно продемонстрировать с помощью одного лишь фонарика, потому что сложно делать крошечные нити накала и очень черные поверхности. Эти практические слож-

ности скрывают те пределы, которые фундаментальная физика накладывает на резкость теней. К счастью, искривление света можно продемонстрировать и иначе. Предположим, что свет фонарика проходит через два последовательных маленьких отверстия в светонепроницаемых экранах, как показано на рис. 2.4, и что свет падает затем на третий экран. Вопрос состоит в следующем: если этот эксперимент повторять, уменьшая диаметр отверстий и увеличивая расстояние между первым и вторым экранами, будет ли полная тень (область абсолютной темноты) сужаться безгранично, пока не превратится в прямую линию между центрами двух отверстий? Может ли освещенная область между вторым и третьим экраном быть ограничена произвольно узким конусом? Говоря языком ювелиров, сейчас мы спрашиваем что-то вроде того, «насколько пластичен свет», насколько тонка нить, в которую можно его растянуть. (Из золота можно получить нити толщиной в 0,0001 мм.)

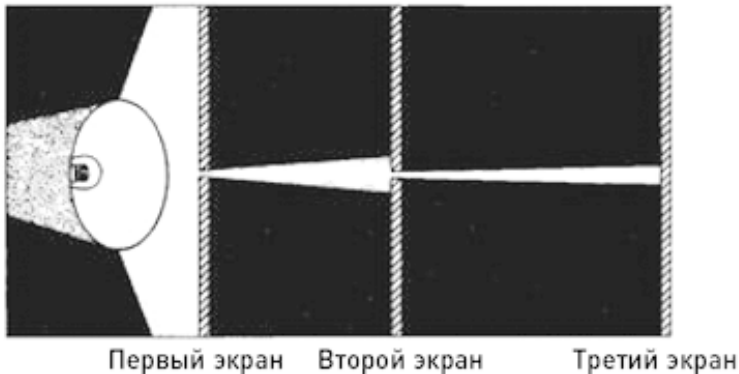


Рис. 2.4. Получение узкого луча света, проходящего через два последовательных отверстия

Оказывается, что свет не так пластичен, как золото! Задолго до того, как диаметр отверстий приблизится к десяти тысячной доле миллиметра, а в действительности уже при диаметре отверстий около одного миллиметра свет начинает заметно возмущаться. Вместо того чтобы проходить через отверстия по прямым линиям, свет не желает оставаться в ограниченном пространстве и расползается позади каждого отверстия. И, расползаясь, он «растрепывается». Чем меньше диаметр отверстия, тем сильнее свет уклоняется от прямолинейного пути. Появляются сложные картины света и тени. На третьем экране мы уже видим не освещенную и темную области с полутенью между ними, а концентриче-

ские кольца разной толщины и яркости. Кроме того, там присутствует цвет, так как белый свет является смесью фотонов разных цветов, каждый из которых распространяется и рассеивается немного по-своему. На рис. 2.5 показана типичная картина, которую может образовать на третьем экране белый свет, пройдя через отверстия в первых двух экранах. Напоминаю, здесь не происходит ничего, кроме отбрасывания тени! Рис. 2.5 – это всего лишь тень, отброшенная вторым экраном, изображенным на рис. 2.4. Если бы свет распространялся только прямолинейно, появилась бы только крошечная белая точка (гораздо меньше, чем яркое пятно в центре рис. 2.5), окруженная очень узкой полутенью. Все остальное было бы полной тенью – совершенной темнотой.

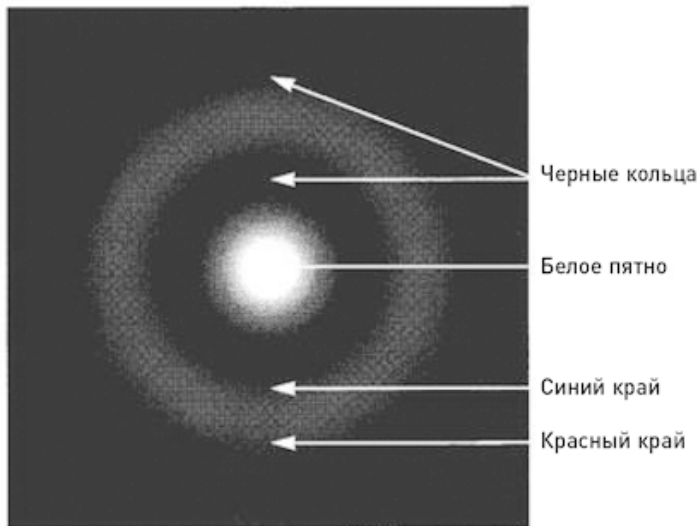


Рис. 2.5. Картина света и тени, образованная белым светом после прохождения через маленькое круглое отверстие

Как бы ни озадачивало искривление лучей света при прохождении через маленькие отверстия, я не вижу в этом фундаментальной проблемы. В любом случае для наших настоящих целей важно то, что свет действительно искривляется. Это означает, что тени не должны выглядеть как силуэты предметов, которые их отбрасывают. Более того, дело даже не в размывании изображения, вызванном полутенью. Оказывается, перегородка со сложной картиной отверстий может отбрасывать тень совершенно другой формы!

На рис. 2.6 показана примерно в натуральную величину часть картины теней, создаваемой на расстоянии 3 м двумя прямыми параллельными щелями в светонепроницаемой перегородке. Щели находятся на расстоянии 0,2 мм друг от друга и освещаются нерасходящимся красным лучом лазера, расположенного по другую сторону перегородки. Почему используется свет лазера, а не электрического фонарика? Только потому, что точная форма тени также зависит и от цвета света, который ее производит. Белый свет фонарика содержит весь спектр видимых цветов, поэтому он может отбрасывать тени с многоцветными краями. Поэтому для экспериментов, смысл которых в получении точной формы тени, лучше использовать свет одного цвета. Можно поместить перед фонариком цветной фильтр (например, пластину из цветного стекла), чтобы через него проходил свет только одного цвета. Это помогло бы, но фильтры выделяют его не слишком аккуратно. Лучше воспользоваться светом лазера, поскольку лазер можно очень точно настроить на испускание света совершенно конкретного цвета почти без примеси других<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Такой свет называется монохроматическим. Длина его волны зависит от активного вещества данного лазера. – *Прим. ред.*

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

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

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