

Ли Смолин Возвращение времени

От античной космогонии
к космологии будущего



Смолин превосходно пишет,
нетривиально мыслит и достигает
обобщений вселенского масштаба.

NATURE

CoRpus

http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=8499071
«Ли Смолин. Возвращение времени. От античной космогонии к космологии
будущего»: АСТ: CORPUS; Москва; 2014

Аннотация

Большинство людей считает, что время реально: меняются времена года, идут часы, человек стремится от колыбели к могиле. Большинство физиков, напротив, полагает, что время есть иллюзия – и, возможно, напрасно, как полагает известный канадский физик Ли Смолин. Автор книг “Жизнь космоса” (1997) и “Неприятности с физикой” (2006) напоминает, что все затруднения физиков и космологов (от Большого взрыва до “теории всего”) восходят к проблеме природы времени, а признание его реальности может вывести фундаментальную науку на новый уровень.

Ли Смолин Возвращение времени. От античной космогонии к космологии будущего

Посвящается моим родителям Полине и Майклу

Роберту Мангабейре Унгеру – с благодарностью за совместное путешествие

*Из чего возникают все вещи, в то же самое они и разрешаются
согласно необходимости... в установленное время.*

Анаксимандр

Перевод с английского д-ра физ. – мат. наук Андрея Ростовцева

© Spin Networks, Ltd., 2013

© А. Ростовцев, перевод на русский язык, 2014

© А. Бондаренко, художественное оформление, макет, 2014

© ООО “Издательство АСТ”, 2014

Все права защищены. Никакая часть электронной версии 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, для частного и публичного использования без письменного разрешения владельца авторских прав.

© Электронная версия книги подготовлена компанией ЛитРес (www.litres.ru)

* * *

Один из самых ярких ныне живущих теоретиков... Смолин подвергает сомнению не только теорию относительности Эйнштейна, но даже отношение к законам природы как к вечной, неизменной истине.

THE ECONOMIST

Эта книга (смесь науки, философии и научной фантастики) увлекательная, будоражащая, невероятно смелая – и в той же степени спорная.

Алан Лайтман

Ли Смолин пытается убедить нас, что время – это физическая реальность, а вечность, четырехмерный пространственно-временной континуум – иллюзии. Его аргументы неожиданны и оригинальны. Я давно не читал ничего подобного.

Джеймс Глик

Книгу Смолина следует порекомендовать не только ради ознакомления с главной ее темой, но и из-за пересказа автором некоторых из наиболее экстравагантных современных физических теорий. Положения, которые обосновывает Смолин, глубоки и необычны, и излагает он их ярко и с изяществом.

THE TIMES HIGHER EDUCATION



Предисловие

Что такое время? Этот простой, казалось бы, вопрос затрагивает наиболее важные проблемы, встающие перед наукой. Все загадки природы, волнующие физиков и космологов – от Большого взрыва до будущего Вселенной, от квантов до великого объединения взаимодействий и частиц, – связаны с природой времени.

Прогресс науки неразрывно связан с устранением иллюзий. Ученые разделили материю, казавшуюся однородной, на атомы. А атомы, казавшиеся неделимыми, – на протоны, нейтроны, электроны (сами же протоны и нейтроны, как выяснилось, состоят из кварков). Солнце, казалось, вращается вокруг Земли, – но в действительности все наоборот. И, наконец, все движется относительно всего.

Время – самый заметный аспект обыденного опыта. Все, что мы думаем, чувствуем, делаем, напоминает о существовании времени. Мы воспринимаем мир в виде потока моментов времени. Однако и физики, и философы долго убеждали нас (и многих убедили), что время – это иллюзия.

Когда я спрашиваю своих друзей, не имеющих отношения к науке, что они думают о времени, я часто слышу, что его течение обманчиво и на самом деле реально все: и истина, и справедливость, и божественное, и законы природы – и все это лежит за пределами понятия времени. Идея иллюзорности времени общепринята и в нашей философии, и в религии. Тысячелетиями люди мирились с тем, что жизнь полна трудностей, а человек смертен, и жили верой в возможность бегства в более реальный, вечный мир.

Нереальным время полагали наши выдающиеся мыслители. Платон, величайший философ древности, и Эйнштейн, величайший физик современности, учили, что все реальное в природе существует вне времени. Они рассматривали ощущение человеком хода времени как некоторое случайное обстоятельство, скрывающее от нас истину. Оба они считали, что мы должны избавиться от этой иллюзии.

Я тоже верил в нереальность времени. Я стал физиком потому, что в юности мечтал сбежать из мира людей, уродливого и жестокого, в чистый мир вневременных истин. Позднее я понял, как это прекрасно: быть человеком, и тяга к трансцендентному у меня

прошла.

Я перестал верить в то, что время нереально, и перешел в противоположный лагерь. Время не просто реально: мы не знаем ничего, что в той же степени, как время, приближало бы нас к пониманию природы. Теперь я убежден, что время – это ключ к квантовой теории и объединению последней с категориями пространства, времени, гравитации, а также с космологией. Мне кажется, чтобы придать смысл картине мироздания, складывающейся из результатов наблюдений, нам следует переосмыслить реальность времени. Это я и имею в виду под *возвращением времени*.

В этой книге изложены научные доводы в пользу реальности времени. Если вы считаете, что время иллюзорно, я намерен переубедить вас. А если верите, что время реально, я надеюсь укрепить вас в этом убеждении.

Это книга для всех: нет ни одного человека, мировидение которого формируется без учета времени. Даже если вы не задумывались над этим вопросом, мышление и язык, на котором вы выражаете мысли, окрашены древними метафизическими представлениями о времени.

Если мы принимаем революционную точку зрения (время реально, а не иллюзорно), как изменятся наши представления обо всем остальном? Мы, кроме прочего, по-новому увидим и возможности, и опасности, подстерегающие человечество.

Небольшая часть этой книги связана с личным опытом. “Папа, – спросил меня однажды сын, – когда ты был таким же маленьким, тебя звали так же, как меня?” Ребенок понял, что время было и до него, и теперь искал возможность связать свой короткий жизненный путь с долгой историей мира.

Любое путешествие преподает нам урок. Я, например, понял, насколько радикальны идеи, содержащиеся в простом утверждении о том, что время реально. Начав свою жизнь в науке с поисков уравнивания, не учитывающего времени, я уверился в том, что величайшая тайна Вселенной есть то, как она разворачивается перед нами *во времени*.

Хотя мы воспринимаем себя живущими во времени, мы часто представляем, что лучший мир лежит за его границами. Мы верим, что истина существует не сейчас, а всегда, что она была прежде нас и останется после нас. Что мораль абсолютна. Мы, кажется, прочно усвоили, что если и есть нечто ценное, то оно пребывает вне времени. Мы стремимся к *вечной* любви, рассуждаем о *вечных* истине и справедливости. Бог, математические законы, законы природы и так далее не подвластны времени. Мы живем во времени, однако поверяем свои поступки мерилom вечности.

И – оказываемся отчужденными от того, что имеет наибольшую ценность. Научные эксперименты и их анализ привязаны к времени, как и все наши наблюдения за природой, однако мы считаем, что нашли указание на существование вневременных законов. Этот парадокс затрагивает нас как личности, как членов семьи, как граждан, потому что то, как мы оцениваем будущее, обусловлено нашим отношением к времени.

В этой книге я надеюсь по-новому взглянуть на парадокс жизни во времени. Я считаю, что время и его ход реальны и носят фундаментальный характер, а вечность и вечные истины – просто мифология.

Новый подход к понятию времени предполагает, что реальность состоит лишь из того, что реально в каждый момент. Это радикальная идея. Она отрицает какое-либо вневременное существование или истины (будь то в сфере науки, этики, математики или государственного управления). Все они должны быть привязаны к времени.

Принятие времени также означает: наше видение того, как Вселенная устроена на базовом уровне, неполно. Утверждая, что время реально, я имею в виду следующее:

Все, что реально в нашей Вселенной, реально в определенный момент, один из ряда следующих друг за другом.

Прошлое было реальным, но теперь уже нет. Мы можем, однако, интерпретировать и анализировать прошлое, поскольку находим его следы в

настоящем.

Будущего еще не существует, и оно открыто для нас. Можно делать обоснованные прогнозы, но точно предсказать будущее мы не в состоянии.

Ничто не подвластно времени, даже законы природы. Они не вечны. Как и вообще все, они реальны в настоящий момент и с течением времени развиваются.

Эти гипотезы указывают новое направление развития фундаментальной физики. Я собираюсь доказать, что это единственный способ преодолеть нынешний кризис в теоретической физике и космологии. Они влияют и на восприятие нами собственной жизни, и на наше отношение к глобальным проблемам.

Чтобы объяснить, почему реальность времени важна в науке и вне ее, я противопоставлю мышление во времени мышлению вне времени. Мнение, будто истина вечна и надмирна, настолько широко распространено, что бразильский философ Роберту Мангабейра Унгер назвал его “вечной философией”. Это суть платоновской мысли, наглядно переданная в рассказе (фрагмент диалога “Менон”) о мальчике-рабе и геометрии квадрата: там Сократ утверждает, что все открытия – лишь припоминание.

Если мы считаем, что ответ на любой вопрос (как быть хорошими родителями, супругами, гражданами, какой общественный строй наилучший и так далее) лежит в вечном царстве истины, то мы мыслим без привязки ко времени. Ученые мыслят во времени, когда речь идет о новых идеях, требующихся для объяснения открываемых явлений, и о новом математическом аппарате для их описания. Если мы мыслим вне времени, то считаем, что эти идеи существовали до того, как мы пришли к ним. Но если мы мыслим во времени, полагать это нет оснований.

Контраст между мышлением во времени и вне времени очевиден во многих сферах. Мы мыслим вне времени, если, столкнувшись с технической или социальной проблемой, предполагаем, что возможные подходы к ее решению уже определены. Тот, кто считает, что верная экономическая либо политическая теория создана в позапрошлом веке, мыслит вне времени. Когда мы вместо этого видим цель политики в отыскании новых решений проблем, возникающих по мере развития общества, мы мыслим во времени. Мы мыслим во времени и если считаем, что прогресс в технике, общественном устройстве и науке заключается в предложении новых идей, стратегий и форм социальной организации.

Если мы беспрекословно принимаем жесткие требования, обычаи и структуру управления различных организаций и сообществ, как если бы это были абсолютные категории, мы ставим себя вне времени. Мы возвращаемся во время, когда понимаем, что любая функция социальной организации есть продукт исторического развития, предмет договоренностей и постоянного совершенствования.

Если мы считаем, что задача физики – это открытие математических уравнений, отражающих жизнь Вселенной, то мы верим, что истинное знание о Вселенной лежит за ее пределами. Это настолько привычная мысль, что мы не замечаем ее абсурдности. Если Вселенная – это все, что существует, то как может что-либо лежать вне нее? А если мы принимаем реальность времени, то не может существовать уравнений, исчерпывающе описывающих мир. У него есть свойство, которое не поддается такому описанию: всегда наличествует некоторый момент времени.

Дарвинизм является примером мышления во времени. В его основе лежит осознание того, что природные процессы, протекающие во времени, могут привести к рождению качественно новых структур. Могут даже возникнуть новые законы природы – как только явятся на свет те структуры, к которым они применяются. Половой отбор, например, не мог возникнуть прежде, чем появилось разделение полов. Эволюционная динамика не нуждается в обширных абстрактных пространствах, как и все жизнеспособные особи, последовательности ДНК, наборы белков и законы биологии. Биолог-теоретик Стюарт А. Кауфман считает, что эволюционную динамику вернее представлять так: биосфера ведет исследование во времени, постоянно отвечая на вопрос, что случится при следующем шаге. То же касается развития техники, экономики и социума.

Мыслить во времени – это не релятивизм, а форма *реляционизма*, утверждающего, что истинное описание чего-либо состоит из указания его отношений с другими элементами данной системы. Истина может быть и временной, и объективной – когда речь идет об объектах, изобретенных либо появившихся в ходе эволюции или развития человеческой мысли.

На личностном уровне мыслить во времени – значит принимать неопределенность как неизбежную цену того, что мы живы. Бороться с нестабильностью, отрицать неопределенность, не принимать риск, представлять, что жизнь можно организовать так, чтобы исключить опасность, – значит мыслить вне времени. Быть человеком – значит жить в опасности.

Мы стараемся преуспеть в переменчивом мире, мы заботимся о тех, кого любим, и получаем от всего этого удовольствие. Мы строим планы, но не можем точно предугадать все, что нас ждет. Буддисты говорят: мы живем в доме, в котором начался пожар, только еще не заметили этого. В первобытные времена опасность ждала людей повсюду. В современном обществе опасность грозит нам сравнительно редко. Жизнь требует от нас мудрости при выборе из множества опасностей таких, которых действительно стоит побережиться. Речь идет и о выборе возможностей, которые нам дарит каждый момент. Мы выбираем, чему посвятить свои энергию и внимание, и делаем это всегда в условиях неполного знания о последствиях своего выбора.

Можем ли мы улучшить ситуацию? Можем ли справиться с капризами бытия и достичь состояния, в котором мы знали бы пусть не все, но достаточно для исчерпывающей оценки последствий своего выбора? Можем ли мы вести по-настоящему разумную жизнь? Да, это было бы возможно, если время было бы иллюзией: ведь в мире, в котором время не играет никакой роли, не было бы принципиальной разницы между знанием о настоящем и о будущем. Просто нам потребовалось бы больше вычислений. Некоторые числа и формулы – вот и все, что понадобилось бы для достаточно точного предсказания.

Но если время реально, то будущее нельзя вывести из знания о настоящем. В такой ситуации сюрпризы неизбежны: они следуют из нашего неведения о последствиях своих поступков. Сюрприз – неотъемлемая часть бытия. Природа может преподнести сюрпризы, для которых у нас нет достаточного количества знаний. Новое реально. С помощью воображения мы можем создавать нечто, для предсказаний чего нам недостаточно накопленных знаний. Именно поэтому для каждого важно, реально время или нет. Ответ на этот вопрос может изменить наше восприятие своего положения внутри во многих отношениях неизвестной Вселенной. (Я вернусь к этому вопросу в эпилоге: полагаю, что признание реальности времени может помочь решить такие проблемы, как изменение климата и экономический кризис.)

Прежде чем перейти к главному, позволю себе несколько советов. Я пытался изложить свои соображения для читателя, не имеющего ни специального физического, ни математического образования. В книге нет уравнений, и основные вопросы я иллюстрирую простейшими примерами. Когда мы перейдем к более сложным вещам, я рекомендую читателям, потерявшим нить рассуждений, делать то, что научились делать ученые: перейти к месту в книге, где текст снова становится ясен. Те, кто желает больше узнать обо всем этом, может воспользоваться интерактивными приложениями на сайте: www.timereborn.com. Примечания в конце книги, надеюсь, окажутся полезными и специалистам, и широкой публике.

Путь к возвращению времени занял у меня более 20 лет. Он начался с осознания того, что законы природы должны эволюционировать. Я боролся с теорией относительности, квантовой теорией и теорией квантовой гравитации, которые привели меня к изложенным здесь выводам. Сотрудничество и дискуссии с друзьями и коллегами оказались очень важны для меня (см. раздел “Благодарности”, а также примечания), но плодотворнее всего

оказалось сотрудничество с Роберту Мангабейрой Унгером¹.

Напоминаю, что есть много точек зрения на природу времени, квантовую теорию, космологию и многое другое, что здесь не обсуждается. Существует обширная литература по физике, космологии и философии, касающаяся вопросов, затронутых в моей книге. Просто я решил показать читателям, которые, может быть, впервые столкнулись с этой областью знаний, путь через сложный ландшафт². Например, сочинения о взглядах Канта на пространство и время занимают целые полки. Я также не излагаю взгляды некоторых современных философов. Прошу прощения у моих ученых друзей за эти упущения и отсылаю читателя к библиографическому списку.

Торонто, август 2012 года

Введение

В общепринятой научной картине мира время иллюзорно. И, если принять гипотезу об его реальности, последствия окажутся революционными.

Наше представление о времени вытекает из понимания физических законов. Общеизвестно, что все происходящее во Вселенной определяется законами природы, объясняющими, как прошлое превращается в будущее. Законы природы непреложны, и если условия в данный момент полностью определены, у нас нет свободы выбора. Мы всегда знаем, как будут развиваться события.

Томасина Каверли, не по годам умная героиня пьесы Стоппарда “Аркадия”, заявляет учителю Септимусу Ходжу:

Если остановить каждый атом, определить его положение и направление его движения и постигнуть все события, которые не произошли благодаря этой остановке, то можно – очень-очень хорошо зная алгебру – вывести формулу будущего. Конечно, сделать это по-настоящему ни у кого ума не хватит, но формула такая наверняка существует³.

Я считаю, что цель моей работы как физика-теоретика состоит в выведении такой формулы. Хотя моя вера в ее существование имеет под собой скорее мистические основания, чем научные.

Если бы Стоппард писал о современной героине, она сравнила бы Вселенную с компьютером, а законы физики – с программами. Если программе задать положение всех элементарных частиц во Вселенной, то компьютер определит положение всех элементарных

¹ Эту книгу можно рассматривать как введение к серьезной работе по естествознанию (или ее популярное изложение), которую я готовлю вместе с Роберту Мангабейрой Унгером. В книге с рабочим заглавием “Сингулярная Вселенная и реальность времени” мы приводим доводы в пользу реальности времени и эволюции законов природы, а также рассматриваем варианты решения *дилеммы метазаконов* (см. главу 19).

² См.: Smolin, Lee *A Perspective on the Landscape Problem* / arXiv:1202.3373v1 [physics.hist-ph] (2012); Smolin, Lee *The Unique Universe* // Phys. World, June 2, 21–26 (2009); Smolin, Lee *The Case for Background Independence* / In: *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, ed. Rickles, Dean, et al. New York: Oxford University Press, 2007; Smolin, Lee *The Present Moment in Quantum Cosmology: Challenges for the Argument for the Elimination of Time* / In: *Time and the Instant*, ed. Durie, Robin. Manchester, U. K.: Clinamen Press, 2000; Smolin, Lee *Thinking in Time Versus Thinking Outside of Time* / In: *This Will Make You Smarter*. Ed. Brockman, John. New York: Harper Perennial, 2012; Kauffman, Stuart, and Lee Smolin *A Possible Solution to the Problem of Time in Quantum Cosmology* / arXiv: gr-qc/9703026v1 (1997).

³ Пер. О. Варшавер. – Прим. пер.

частиц в некоторый момент в будущем. С этой точки зрения в природе не происходит ничего, кроме перегруппировки в пространстве элементарных частиц в соответствии с неизменными во времени законами. Таким образом, прошлое целиком определяет настоящее, а настоящее определяет будущее.

Этот подход преуменьшает роль времени⁴. Поскольку все сводится к перемещению атомов, существование любых неожиданностей, по-настоящему новых явлений отрицается. Свойства атомов не зависят от времени, как, впрочем, и законы природы, которым подчиняются атомы. Любое действие в будущем можно рассчитать, исходя из конфигурации настоящего. Таким образом, течение времени может быть заменено на вычисление, а будущее логически вытекает из настоящего.

Альберт Эйнштейн (см. главу 6) делает еще более сильное заявление: понятие времени несущественно для фундаментального описания мира. Принцип относительности гласит, что в истории Вселенной время не играет никакой роли, а настоящее, прошлое и будущее имеют смысл лишь в субъективном восприятии мира. Время – дополнительное измерение пространства, а наше представление о течении времени – иллюзия восприятия реальности вне времени.

Такой взгляд может испугать любого, кто верит в свободу воли. Но это не тот довод, к которому я собираюсь здесь прибегнуть. Мои аргументы основаны на науке. Моя задача – объяснить, почему расхожие доказательства предопределенности будущего неверны с научной точки зрения.

В части I книги я представлю доводы в пользу иллюзорности понятия времени, а в части II опровергну их и докажу, что фундаментальная физика и космология смогут преодолеть нынешний кризис, если примут время как реальность. В части I я прослежу развитие концепции времени в физике со времен Аристотеля и Птолемея до наших дней и покажу, как с развитием физики роль времени уменьшалась. В части II мы коснемся более современных физических представлений, поскольку довод в пользу возвращения времени в центр внимания ученых подтверждается новейшими исследованиями.

Успех научных теорий со времен Ньютона основывался на представлении о мире, принесенном Ньютоном: природа состоит из частиц с неизменными свойствами, чье движение и взаимодействие подчиняются неизменным законам природы. Такие свойства частиц, как масса и электрический заряд, не изменяются, как и законы природы. Этот подход идеально годится для описания небольших частей Вселенной, однако если мы попробуем с его помощью описать Вселенную в целом, результат оставит желать лучшего.

Все основные теории рассматривают какую-либо небольшую часть Вселенной: радио, летящий мяч, клетку, Землю, Галактику. Когда мы имеем дело с частью Вселенной, мы помещаем себя и инструменты наблюдения за ее пределы. Мы не выбираем и не подготавливаем исследуемую систему. Мы не принимаем во внимание системы отсчета, служащие для определения местоположения системы, и, что наиболее важно, не пользуемся часами для наблюдения за развитием системы.

Расширение физической теории до космологического масштаба требует нового подхода. В космологической теории ничего нельзя поместить вне исследуемой системы. Если теория полна, то она включает все, что ни есть во Вселенной, и даже нас как наблюдателей. Она должна учитывать наши инструменты и часы. Но в космологии мы сталкиваемся с затруднением: когда рассматриваешь Вселенную, невозможно оставаться

⁴ И не только время: он преуменьшает все аспекты нашего восприятия (цветной, сенсорный, музыка, эмоции, сложные мысли), сводя их к перегруппировке атомов. В этом суть атомистического взгляд на мир, предложенного Демокритом и Лукрецием, выраженного Локком в теории первичных и вторичных качеств и, похоже, целиком подтвержденного наукой. С этой точки зрения реально движение – в современном понимании (квантовые переходы). Все прочее – до некоторой степени иллюзия. Я не собираюсь ни оспаривать эти воззрения (они в основном истинны), ни подкреплять их наукой. Моя цель – оспорить утверждение, будто время иллюзорно.

внешним наблюдателем. Более того, космология должна обходиться без двух важных методологических аспектов, присущих другим наукам. В науке, как правило, эксперимент многократно повторяется. Опыт с Вселенной мы не в состоянии повторить, как не можем подготовить систему. Это существенно затрудняет изучение мира в масштабах Вселенной.

И все же мы хотели бы распространить физическую теорию до космологических масштабов. На первый взгляд теории, хорошо работающие в части Вселенной, легко распространить на Вселенную. Но это не так (см. главы 8 и 9). Ньютонова картина мира с неизменными свойствами частиц и законами не годится для описания Вселенной в целом: этому препятствует сама теория.

Я понимаю, что этот подход идет вразрез с представлениями и опытом многих моих коллег, но я лишь прошу читателя уделить внимание части II. Я продемонстрирую (в общих чертах и на конкретных экспериментах), что при любой попытке расширить стандартную теорию до космологического масштаба природа щедро одаривает нас парадоксами, противоречиями и вопросами, на которые нет ответов. Среди них – неспособность стандартной теории учитывать выбор, сделанный природой на ранней стадии жизни Вселенной: выбор начальных условий и выбор самих законов природы.

Некоторые современные книги по космологии представляют собой попытки весьма умных людей преодолеть указанные противоречия. Популярно представление, будто наша Вселенная – лишь одна из огромного (или бесконечного) множества подобных ей. Это представление основано на методологической ошибке. Наши теории подтверждаются на уровне Вселенной, лишь если она есть часть чего-либо большего. Таким образом, мы придумали мир, который наполнили другими Вселенными. Этот подход ненаучен: мы не можем ни доказать, ни опровергнуть существование других Вселенных, не связанных причинно-следственной связью с нашей собственной⁵.

Я собираюсь предложить альтернативный подход: следует искать новую теорию, применимую к Вселенной в целом, свободную от парадоксов, способную дать ответы на вопросы, пока остающиеся без ответов, и сделать предсказания для космологических наблюдений. Пока у меня нет такой теории, но я хочу предложить ряд принципов, которые помогут ее создать (см. главу 10). Я продемонстрирую, как эти принципы могут привести к новым гипотезам и моделям Вселенной, указывающим путь к истинной космологической теории. Центральным ее принципом является реальность времени и гипотеза об эволюции законов природы.

Мысль о меняющихся законах природы не нова⁶. Американский философ Чарльз С. Пирс писал еще в 1891 году⁷:

Предполагать, что универсальные законы природы могут быть поняты разумом и однако же не иметь никакого обоснования своим особым формам, оставаясь необъяснимыми и иррациональными, – позиция вряд ли оправданная. Единообразия – это и есть те самые факты, которые необходимо объяснять... Закон – это *par excellence* [преимущественно] вещь, требующая объяснений... Единственно возможный путь объяснить законы природы и единообразие в целом – предположить, что они являются результатом эволюции⁸.

⁵ Единственное исключение (см. главу 11) – если наша Вселенная – типичный представитель коллекции Вселенных.

⁶ Некоторые читатели сразу спросят, должны ли быть законы, управляющие эволюцией законов. О проблеме метазакон см. главу 19.

⁷ Пер. К. Голубович. – *Прим. пер.*

⁸ Peirce, Charles Sanders *The Architecture of Theories* // *The Monist*, 1:2, 161–176 (1891).

А современный философ Роберту Мангабейра Унгер отметил:

Вы можете проследить, как изменялись свойства Вселенной от ее рождения до нашего времени. Но вы не можете доказать, что этот набор свойств – единственный из возможных... Раньше или позже во Вселенной могут появиться совсем другие законы... Установить законы природы – это не то же, что описать или объяснить все возможные пути развития всех возможных Вселенных. Существует лишь относительное различие между законообразным объяснением и описанием отдельной исторической последовательности⁹.

Поль Дирак (вместе с Эйнштейном и Бором принадлежащий к числу тех, кто наиболее сильно повлиял в XX веке на физику) рассуждал: “В самом начале законы природы, вероятно, сильно отличались от нынешних... Следует предположить, что законы природы со временем меняются, а не остаются одинаковыми в пространстве-времени”¹⁰. Великий американский физик Джон А. Уилер также полагал, что законы эволюционируют. Он считал Большой взрыв одним из событий, преобразовавших законы природы: “Нет никаких законов, кроме закона, утверждающего отсутствие законов”¹¹. Даже ученик Уилера, великий Ричард Фейнман, в интервью как-то заявил: “Единственной отраслью науки, не допускающей вопросов об эволюции, является физика. Мы говорим о законах природы... но как они стали такими, какие есть? Может статься... это вопрос исторического развития, эволюции”¹².

В книге “Жизнь космоса” (1997) я описал механизм эволюции законов природы, моделью для которого послужила биологическая эволюция¹³. Я предположил, что Вселенные могут образовывать зародыши внутри черных дыр и что всякий раз, когда это происходит, законы физики слегка изменяются. В этой теории законы играют роль генов, а Вселенная отражает выбор законов при ее рождении точно так, как организм воплощает генома. Как и гены, законы природы могут подвергаться случайным мутациям. Вдохновленный достижениями теории струн, я представил, что поиск универсальной теории приведет нас не к “теории всего”, а к большому набору возможных законов природы. Я назвал это ландшафтом теорий (по аналогии с адаптивным ландшафтом в генетике). Этой теме я посвятил главу 11 данной книги (а здесь прибавлю лишь, что теория естественного космологического отбора делает несколько предсказаний, которые пока никто не опроверг, несмотря на неоднократно представлявшиеся возможности).

В последнее десятилетие многие физики-теоретики, занимающиеся теорией струн, восприняли концепцию ландшафта теорий, и вопрос о том, как Вселенная выбирает законы, обрел актуальность. Ответ (ниже я постараюсь это доказать) можно получить лишь в рамках космологической модели, в которой время реально, а законы природы эволюционируют со временем.

Законы не даются Вселенной извне. Ни один внешний объект, сверхъестественный

⁹ Unger, Roberto Mangabeira *Social Theory: Its Situation and Its Task*, vol. 2 of *Politics*. New York: Verso, 2004. Pp. 179–180.

¹⁰ Dirac, Paul A. M. *The Relation Between Mathematics and Physics* // Proc. Roy. Soc. (Edinburgh) 59: 122–129 (1939).

¹¹ Цит по: Gleick, James *Genius: the Life and Science of Richard Feynman*. New York: Pantheon, 1992. P. 93.

¹² *Richard Feynman – Take the World from another Point of View* / NOVA (PBS, 1973). Транскрипт можно найти здесь: <http://calteches.library.caltech.edu/35/2/PointofView.htm>.

¹³ См.: Smolin, Lee *Did the Universe Evolve?* // Class. Quantum. Grav. 9: 173–191 (1992).

либо математический, не указывает заранее, какими должны быть законы природы. Они не изъяты из времени и не ждут рождения Вселенной, а появляются и эволюционируют вместе с ней. Возможно даже, что новые законы физики, как в биологии, могут возникать из упорядочения нового явления в ходе эволюции Вселенной.

Кто-то усмотрит в отрицании вечных законов отступление от целей самой науки. Я же вижу здесь сбрасывание за борт метафизического балласта, мешающего поискам истины. Ниже я приведу примеры того, как мысль об эволюционирующих законах ведет к такой космологии, которая способна делать проверяемые в эксперименте предсказания.

Насколько мне известно, первым ученым эпохи научной революции, размышлявшим о теории всей Вселенной, был Готфрид Вильгельм Лейбниц. (Между прочим он оспаривал у Ньютона приоритет открытия дифференциального исчисления, предвосхитил современную логику, разработал систему двоичного исчисления и много чего еще. Его называли умнейшим человеком в истории.) Лейбниц сформулировал принцип, ставший базисным для космологии – *принцип достаточного основания* : при истолковании Вселенной любой выбор должен иметь рациональное объяснение. То есть должен иметься ответ на любой вопрос вида: “Почему Вселенная обладает характеристикой x , а не y ?” Если Бог создал мир, то у него, вероятно, не было альтернативного плана. Принцип Лейбница оказал огромное влияние на физику и продолжает служить подспорьем при выстраивании космологической теории.

В картине мира Лейбница все сущее находится не в пространстве, а погружено в сеть взаимосвязей. Эти связи определяют пространство (а не наоборот). Сегодня идея Вселенной, представляющей собою сеть, пропитывает современную физику, биологию и компьютерные науки.

В реляционном мире (где связи первичны по отношению к пространству) нет пустоты. Ньютон, напротив, считал пространство первичным и абсолютным (это означало, что атомы определяются исходя из их положения в пространстве, однако на пространство они никак не влияют). В мире связей нет такой асимметрии. Субъекты могут быть частично автономны, но их возможности определяются связями, соединяющими их в вечно меняющуюся динамическую сеть.

Из принципа Лейбница следует (см. главу 3) отсутствие абсолютного времени, слепо метящего события. Время – следствие изменений. В неизменном мире нет времени. Философы утверждают, что время относительно, что оно – свойство отношений, таких как причинная зависимость. Аналогично и пространство может быть относительным. В самом деле, любое свойство объекта в природе должно быть отражением динамических¹⁴ отношений между этим и другими объектами.

Принципы Лейбница противоречат ньютоновой физике, и ученое сообщество их приняло не сразу. Эйнштейн использовал принципы Лейбница в качестве обоснования теории относительности, заменившей ньютонову физику. Принципы Лейбница также реализованы в квантовой механике. Я называю революцию в физике XX века *реляционной* . Задача объединения физики и, в частности, объединение квантовой теории с общей теорией относительности – в широком смысле задача по завершению реляционной революции.

Реляционная революция идет полным ходом. Пример – дарвинистская революция в биологии: понятие биологического вида определено через отношение к остальным организмам, а гены рассматриваются в контексте набора связанных генов. Все сводится к передаче информации, и нет аналогии ближе, чем связь между передатчиком и приемником посредством канала передачи данных.

Либеральной концепции общества, состоящего из свободных, равных и независимых людей (предложенной философом Джоном Локком в качестве отражения физической

¹⁴ Я часто использую слово “динамический”, то есть “неустойчивый”, “изменчивый”, “подчиняющийся закону”.

картины мира его друга Исаака Ньютона), сейчас противопоставляется образ общества связанных друг с другом людей, чья жизнь имеет смысл лишь внутри сети этих взаимоотношений. Идею социальных сетей общество усвоило настолько прочно, что о них говорят все – от политологов-феминисток до гуру делового управления. Интересно, сколько пользователей “Фейсбука” понимает, что их социальная жизнь построена на многообещающем научном принципе?

Реляционная революция зашла уже далеко. В то же время она, очевидно, переживает кризис и в некоторых областях остановилась. Несмотря на кризис, идут споры о том, что такое индивид, как возникают новые системы и объекты, а также как понимать Вселенную.

Но ни индивид, ни система, ни Вселенная не могут рассматриваться просто как существующие. Они вовлечены в процессы, протекающие во времени. Элементом, без которого мы не ответим на поставленные вопросы, является соображение о том, что индивид, система, Вселенная представляют собой разворачивающиеся во времени процессы. Я постараюсь убедить вас, что реляционная революция должна воспринять понятия времени и текущего момента как фундаментальные свойства реальности.

В прежней картине мира индивиды – наиболее мелкие элементы системы: желая узнать, как работает система, вы выделяете одну из частей и изучаете ее. Но как можно выявить свойства самой элементарной части системы? У нее нет составных частей, и, следовательно, редукционизм здесь неприменим. Здесь обширное поле возможностей для зарождающихся программ. Они могут и должны искать объяснение свойств элементарных частиц через сеть их взаимодействий.

Это уже происходит. В стандартной модели физики частиц (самой успешной теории элементарных частиц) масса электрона определяется динамически в результате его взаимодействия с другими частицами. Масса – это наиболее фундаментальное свойство элементарной частицы, определяющее силу, которая необходима для изменения движения частицы. В стандартной модели массы всех частиц возникают в результате взаимодействия с другими частицами и определяются в основном одной из них – бозоном Хиггса. Нет абсолютно элементарных частиц: любая представляет собой следствие сети взаимодействий.

Возникновение – важное понятие в мире отношений. Свойство чего-либо, собранного из частей, возникает тогда, когда оно не имеет смысла для каждой из частей отдельно. Камень твердый, а вода текуча, но атомы, из которых они состоят, не обладают ни твердостью, ни текучестью. Возникающее свойство часто сохраняется лишь приблизительно, так как оно связано с усреднением или описанием с высоким уровнем абстракции.

По мере прогресса науки свойства природы, считавшиеся фундаментальными, оказываются возникшими и приближенными. Мы прежде думали, что твердые тела, жидкости и газы – это фундаментальные состояния, а сегодня знаем, что эти свойства обусловлены различным расположением атомов. Большинство законов, считавшихся фундаментальными, оказываются вытекающими из еще более фундаментальных и приближенными. Температура – усредненная энергия хаотично двигающихся атомов, и поэтому законы термодинамики выполняются приблизительно. Я склонен думать, что все, считающееся фундаментальным, будет переосмыслено как вытекающее из еще более фундаментального: гравитация и описывающие ее законы Ньютона и Эйнштейна, законы квантовой механики, даже само пространство.

Фундаментальная физическая теория, поиском которой мы заняты, не будет описывать движение материи в пространстве, не будет постулировать гравитационные и электромагнитные взаимодействия как фундаментальные и не будет квантовой. Все эти свойства возникли на сравнительно поздних этапах расширения Вселенной.

Но если пространство – возникающее, значит ли это, что и время тоже возникающее? Исчезнет ли оно, если мы пойдем вглубь? В прошлом столетии многие ученые считали, что время возникает из некоего фундаментального свойства природы, при описании которого понятие времени неприменимо. Я уверен (насколько это позволительно ученому), что они ошиблись. Время – вот единственное фундаментальное понятие.

Часть I

Гравитация: устранение времени

Глава 1

Падение

Прежде чем начать наше путешествие, прислушаемся к совету древнегреческого философа Гераклита: “Природа любит прятаться”. Возьмем, например, частицы и взаимодействия, которые в современной науке считаются фундаментальными: еще 100 лет назад они скрывались внутри атома. Некоторые из современников Гераклита рассуждали об атомах, однако не знали, существуют ли те вообще. Лишь после Эйнштейна (1905) в науке укрепилось представление, что материя состоит из атомов. А спустя еще шесть лет ученые расщепили атом. Так началось путешествие внутрь атома.

Самым значимым исключением из правила Гераклита является гравитация. Это единственная фундаментальная сила, действие которой мы наблюдаем ежедневно. Наш первый жизненный опыт – борьба с силой тяжести. Гравитация стала одним из первых природных явлений, с которым познакомился человек. Тем не менее, свойства падения во многом скрыты и по сей день, и один из таинственных аспектов гравитации – ее связь со временем.

– Папа, почему я не могу летать?

Мы стояли на третьем этаже и смотрели вниз, на сад позади дома.

– Я прыгну и полечу в садик, к маме – вот как эти птицы.

“Птица” – это было первое произнесенное моим сыном слово. Обычный ментальный конфликт: с одной стороны, родители желают детям больше свободы, с другой – боятся за них. Я строго сказал, что люди не умеют летать и чтобы он даже не пытался. Сын расплакался. Желая отвлечь его, я рассказал о гравитации – силе, которая удерживает нас на земле, заставляет нас и все предметы падать. Неудивительно, что следом я услышал: “Почему?” Даже трехлетний ребенок знает, что дать название явлению еще не значит объяснить его. Мы затеяли игру: стали бросать игрушки в садик, производя “сперименты” и наблюдая, все ли они падают одинаково. Я задумался над вопросом, который выходит за рамки понимания трехлетнего ребенка. По какой траектории падают предметы?

Неудивительно, что этим вопросом не задается трехлетний ребенок – тысячелетиями он, кажется, не возникал вообще ни у кого. Им, вероятно, не задавались ни Аристотель, ни Платон, ни другие античные философы.

Первым форму траектории падающих тел исследовал Галилео Галилей. В самом начале XVII века он изложил результаты своих изысканий в трактате “Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению”. Ученый утверждал в этой работе, написанной в 70-летнем возрасте (по приговору инквизиции он сидел под домашним арестом): траектория падающих тел описывается параболой. Этот факт вытекает из другого факта, который первым установил именно Галилей: тела падают с одинаковым ускорением.

То, что траектория падающего тела описывается параболой – одно из самых замечательных открытий, сделанных учеными. Падает все – и одинаково. Не имеет значения, из чего и для чего предмет, а также сколько раз, с какой высоты и с какой скоростью мы его бросаем. Мы можем повторять эксперимент сколько душе угодно, и всякий раз предмет будет двигаться по параболе. Эта кривая (все точки плоскости, равноудаленные от данной прямой и данной точки) – одна из самых простых в математике.



Рис. 1. Парабола – это геометрическое место точек, равноудаленных от данной прямой и данной точки.

Парабола была известна математикам задолго до Галилея. Наблюдение, что падающие тела описывают параболу – один из первых примеров закона природы, то есть регулярного поведения в небольшой части Вселенной. (В данном случае частью Вселенной – ее подсистемой – является сам предмет, падающий вблизи поверхности планеты.) Такое случалось огромное количество раз в разных местах со времен рождения Вселенной. Следовательно, есть множество ситуаций, к которым применим этот закон.

Подросток может спросить: “А о чем это говорит? Почему математический объект, плод нашего воображения, имеет нечто общее с природным явлением? И почему такое распространенное явление, как падение, должно иметь самое простое и красивое во всей геометрии описание?”

Со времен Галилея ученые успешно пользуются математикой для описания физических явлений. Сейчас очевидно, что законы физики выражаются на языке математики, однако две тысячи лет (с тех пор, как Евклид сформулировал свои аксиомы) никто не догадывался применить математический закон к описанию движения на Земле. С античности до XVII века ученые знали о параболе, но ни один из них не пожелал выяснить, по какой траектории летит брошенный мячик, выпущенная стрела или любой другой предмет¹⁵. Каждый ученый мог сделать открытие, которое сделал Галилей: все, что ему для этого понадобилось, существовало уже в Афинах времен Платона и в Александрии времен Гипатии.

Что заставило Галилея применить математику для описания падения тел? Это вопрос из тех, которые легко задать, но на которые трудно ответить. Что такое вообще математика? Как она стала наукой?

Математические объекты – плоды чистого мышления. Мы не найдем параболу в природе. Парабола, окружность или прямая, – это идеи. Мы облакаем их в определения: “Окружность – геометрическая фигура, состоящая из всех точек плоскости, расположенных на заданном расстоянии от данной точки. Парабола – все точки плоскости, равноудаленные от данной прямой и данной точки”. Раз у нас есть определение, мы можем определить свойства кривой. В школе нас учили, что такой вывод может быть формализован и представлять собой доказательство – выстроенные в цепь умозаключения. В этом формальном процессе не остается места наблюдению или измерению¹⁶.

Рисунок может иллюстрировать доказанные свойства, но он всегда неточен. Это верно

¹⁵ И это несмотря на многочисленные попытки исламских и средневековых философов понять причины движения.

¹⁶ Математики говорят о кривых, числах и так далее как о математических “объектах”, что предполагает их своего рода существование. Вам, возможно, будет удобнее называть их “понятиями”. Я буду использовать оба этих слова.

и для знакомых нам кривых: для спины потягивающейся кошки или тросов, на которых подвешен мост. Это лишь приблизительно напоминает математические кривые, и, если приглядеться, мы всегда найдем отклонения от идеальных математических форм. Итак, математика рассматривает нереальные объекты, которые, тем не менее, отражают реальный мир. Каким образом? Отношение между реальным миром и миром математики неочевидно даже в простейших случаях.

Что общего у математики и гравитации? Математика играет в разгадке тайны времени роль не меньшую, чем гравитация, и следует знать, как математика соотносится с природой в случае падающих тел. Иначе, когда слышишь утверждение типа: “Вселенная – четырехмерное пространственно-временное многообразие”, ты становишься добычей мистификаторов, которые преподносят метафизические фантазии под научным соусом.

Несмотря на то, что в природе не встречаются идеальные окружности или параболы, у них есть общее с материальными объектами свойство: устойчивость по отношению к манипуляциям. Число – отношение длины окружности к ее диаметру – это идея. Но только лишь идея была высказана, как значение стало объективным. Были попытки узаконить значение, и они продемонстрировали наше глубокое непонимание. Мы не можем изменить значение, как бы нам ни хотелось. То же верно для свойств кривых, да и любого математического объекта.

Но кривые и числа (даже если они сходны с природными объектами тем, что не зависят от наших желаний) не идентичны природе. В реальном мире всегда присутствует время. Все в потоке времени. Каждое сделанное нами наблюдение имеет временную отметку. Мы и все вещи вокруг нас существуют в течение определенного временного интервала и не существуют до и после него.

Математические объекты вне времени. Число не имеет даты рождения, прежде которой оно не существовало или принимало другое значение. Утверждение Евклида о том, что параллельные линии на плоскости не пересекаются, всегда останется верным. Математические утверждения касательно кривых или чисел не требуют временных характеристик. Но как нечто может существовать вне времени?¹⁷

Тысячелетиями люди спорят об этом и не пришли к единому мнению. Но одно предположение существует очень давно: математические объекты существуют вне нашего мира, в другой реальности. Таким образом, существует не два типа объектов, связанных со временем и вечных, а два мира: связанный с временем и вечный.

Представление о том, что математические объекты существуют в ином мире, приписывают Платону. Он учил, что математик, говорящий о треугольнике, говорит об *идеальном* треугольнике: в той же степени реальном, но существующем в ином мире – вне времени. Теорема о сумме углов треугольника, равной 180° , не выполняется точно для любого реального треугольника, но абсолютно верна для идеального треугольника. Когда мы доказываем теорему, мы узнаем о том, что вне времени, и показываем, что теорема была верна в прошлом и будет верна в будущем. Если Платон прав, то мы можем, рассуждая, узнавать вечные истины. Некоторые математики утверждают, что черпают знания из идеального мира.

Когда я желаю вкусить платонизма, я приглашаю на обед своего друга Джима Брауна. Мы оба любим вкусно поесть, и во время еды он не спеша и уже в который раз рассказывает мне о своей вере в мир математики, существующий вне времени. Джим – не обычный философ. Его острый ум сочетается с веселым нравом. Вы сразу чувствуете, что он счастлив, и само знакомство с ним делает вас счастливым. Он прекрасно знает все доводы за и против платонизма и охотно обсуждает те, которые не может опровергнуть. Но я так и не смог пошатнуть его веру в существование вневременного мира математических объектов. Я

¹⁷ Не совсем верно говорить, будто математическая истина вне времени: ощущения и мысли приходят в определенные моменты времени, и мы думаем (во времени), кроме прочего, и о математических объектах. Сами по себе они во времени не существуют. Они не рождаются, они не изменяются – они просто есть.

иногда спрашиваю себя: уж не вера ли в идеальный мир делает Джима счастливым?

Лишь один вопрос ставит в тупик Джима и других поклонников Платона. Как мы – привязанные ко времени и находящиеся в постоянном контакте с другими объектами мира вещей – можем узнать об устройстве вечного мира математики? Мы проникаем в него путем рассуждений, но можем ли мы быть уверены, что эти рассуждения верны? По сути нет. Время от времени мы обнаруживаем ошибки даже в доказательствах теорем в учебниках, и нет сомнений, что там скрывается еще множество ошибок. Эту проблему можно решить, предположив, что математические объекты не существуют вовсе – даже вне времени. Но тогда какой смысл рассуждать о несуществующем?

Я разговариваю о платонизме еще с одним своим другом – физиком и математиком Роджером Пенроузом. Он убежден, что абсолютная истина мира математики не может быть сформулирована на языке аксиом. Следуя великому логике Курту Геделю, мы можем непосредственно познать математическую истину, которая лежит за рамками формальных аксиоматических доказательств. Однажды он заметил: “Вы абсолютно уверены, что $1 + 1 = 2$. Это интуитивный факт, он не подвергается сомнению. $1 + 1 = 2$. Вот доказательство того, что наши рассуждения могут преодолеть время. А как насчет $2 + 2 = 4$? Вы и в этом не сомневаетесь. $5 + 5 = 10$? То же самое. Существует бесконечное количество самоочевидных фактов о вечном математическом мире”. Пенроуз уверен, что наш разум может преодолеть поток восприятия и достигнуть вечности¹⁸.

Как только мы поняли, что падение тел – универсальное явление, мы открыли феномен гравитации. Мы связали универсальное явление нашего мира, относящееся к привязанным ко времени объектам, с идеей из вечного мира. И если вы платонист, как Браун или Пенроуз, то открытие универсальности падения тел по параболе есть не что иное, как доказательство связи между нашим миром и миром вечности и красоты. Простое наблюдение, сделанное Галилеем, приобретает религиозное значение. Оно показывает, как вечность входит в наш мир.

Это соображение влечет к науке очень многих – и меня самого. Но сейчас я думаю, что это представление ошибочно. Мы убеждены, что объясняем вещи, привязанные ко времени, с помощью вневременных сущностей. Поскольку у нас нет доступа в мир вечности, рано или поздно мы обнаружим, что сами его придумали. Убеждение, будто нашу Вселенную можно полностью описать с помощью иного мира, отчужденного от всего, что мы можем познать в ощущении, – ерунда. Если мы это принимаем, граница между наукой и мистицизмом размывается.

Мы стремимся к трансцендентному. Желание избежать боли, смерти, тягот питает религию и мистицизм. Но разве поиск истины превращает математика в жреца? Можем ли мы признать занятия математикой разновидностью религиозной деятельности? Следует ли обращать внимание на рассуждения наиболее рационально мыслящих из нас, математиков, о трансцендентном, об избавлении от “оков жизни”?

Более серьезной задачей является описание Вселенной самой по себе: объяснение реального через реальное и привязанного ко времени через привязанное ко времени. Это трудный путь, но он верен. Наградой нам станет понимание значения времени как такового.

Глава 2

Время уходит

Вообще-то первым связал движение с математикой не Галилей. Но он первым сделал это для движения на Земле. Одна из причин, почему никто не вывел этот закон прежде Галилея, такова: заметить параболическую траекторию движения очень сложно – тела

¹⁸ Многие великие математики в это верят, например Ален Конн. См.: Changeux, Jean-Pierre, and Alain Connes *Conversations on Mind, Matter, and Mathematics*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998.

падают достаточно быстро¹⁹. Впрочем, задолго до Галилея люди располагали примерами тел,двигающихся достаточно медленно для того, чтобы зарегистрировать траекторию их движения: Солнца, Луны и планет. Платон и его ученики пользовались записями о положении небесных тел, составленными в Египте и Вавилоне.

Эти астрономические таблицы содержат циклы. Одни циклы, такие как годовое обращение Солнца, очевидны. Другие, как цикл солнечных затмений (18 лет и 11 дней), менее очевидны. Эти циклы – ключ к пониманию строения Вселенной, и ученые веками пытались расшифровать их. Именно эти попытки стали первыми примерами проникновения математики в науку.

Но это еще не все. Галилей не пользовался инструментами, которые не были бы известны еще грекам. Поэтому должна иметься глубокая причина, не позволившая древним сделать открытие прежде Галилея. Они чего-то не понимали в движении на Земле? Верили во что-то такое, во что уже не верил Галилей?

Рассмотрим наблюдение наиболее простой траектории движения, сделанное еще античными астрономами. Греческое слово “планета” означает “странник”, но планеты не бродят по всему небу. Они двигаются вдоль гигантской окружности (эклиптики), положение которой фиксировано на звездном небе. Обнаружение эклиптики было первым шагом в расшифровке записей о положении небесных тел.

Окружность – геометрическая фигура. Но что это значит: движение планет представляется окружностью? Это визит гостя из мира вечности в наш преходящий мир? Так, возможно, думаем мы, но в древности люди считали иначе. Античный мир делился на две части: земной мир (арену рождений и смерти, превращений и разрушений) и небесный – вместилище вечного совершенства. Для греков небо, населенное божествами, было миром трансцендентным, неизменным, вечным. Аристотель заметил: “Согласно [историческим] преданиям, передававшимся из поколения в поколение, ни во всем высочайшем небе, ни в какой-либо из его частей за все прошедшее время не наблюдалось никаких изменений”²⁰.

Если объекты божественного мира движутся, то это движение совершенно иечно. Древним было очевидно, что планеты движутся по окружности, поскольку, будучи совершенными, они могут двигаться лишь по самой совершенной кривой. А земной мир несовершенен, и описывать божественными линиями движение тел на Земле просто кощунственно.

Аристотель делил Вселенную на подлунную и надлунную области. В подлунной области все сложено из четырех элементов: земли, воздуха, огня и воды. Каждый элемент совершает естественное движение. Например, земля стремится к центру мира. Перемены в подлунной области происходят в результате смешения четырех элементов. Эфир – пятый элемент, квинтэссенция – образует надлунную область и перемещающиеся там тела.

Такое деление обосновывало связь с трансцендентным миром. Бог, небеса, совершенство – все это выше нас, а мы прикованы к земле. С этой точки зрения наблюдение за движением небесных тел вдоль математической кривой имело смысл просто потому, что и математика, и небесный мир неподвластны времени. Познать их означало воспарить над землей.

Математика вошла в науку как выражение веры в совершенство небесного. Вечные законы не могут быть целиком неверны, поскольку они несут черты метафизического перехода.

Несмотря на то, что наука ушла довольно далеко от античных представлений, они по-

¹⁹ Интересно, заметил ли кто-нибудь из древних, что струя из фонтана следует параболической траектории? Найдены греческие вазы с рисунками, на которых вода падает по траектории, похожей на параболу, так что математик вполне мог бы поинтересоваться, все ли падающие тела ей следуют.

²⁰ Аристотель, “О небе”, кн. 1, гл. 3. [Пер. А. Лебедева. – *Прим. пер.*]

прежнему влияют на нашу речь. Мы говорим: *быть на высоте положения*. Вдохновение *приходит свыше*. А *низко пасть* подразумевает утрату контроля над собой. Более того, оппозиция *подниматься – падать* символизирует конфликт между телесным и возвышенным. Рай над нами, под нами – ад. Когда мы умираем, то уходим в землю. Бог у нас над головой.

Еще одной областью, где древние прозревали трансцендентное, была музыка. Слушая музыку, мы испытываем ощущение совершенства прекрасного, которое нас отрывает от времени. Неудивительно, что древние считали музыку тайной, разгадать которую можно с помощью математики. Среди великих открытий, сделанных в школе Пифагора, была связь музыкальной гармонии с числовыми закономерностями. Для древних это был второй пример связи математики с небесами. К сожалению, мы мало знаем о Пифагоре и его учениках, но легко представить, что им уже была известна закономерность: музыкальный и математический таланты нередко сочетаются. Сейчас мы сказали бы, что и математики и музыканты способны создавать абстракции и манипулировать ими.

В детстве Галилео Галилей обучался музыке²¹. Его отец, Винченцо Галилей, был композитором и влиятельным музыкальным теоретиком. Рассказывают, что у себя дома в Пизе он натягивал струны, чтобы Галилео мог познать связь между гармонией и числами. Как-то Галилео, заскучавший во время церковной службы, заметил, что время, за которое раскачивающееся кадило совершает полный период, зависит от длины веревки, на которой оно подвешено. Это стало одним из первых его открытий. Как ему удалось прийти к этому? Сейчас мы можем воспользоваться секундомером или часами, но у Галилея их не было. Скорее всего, он напевал про себя. Как он говорил, ему удавалось измерять время с точностью до 1/10 частоты пульса.

Галилей был популяризатором идей Коперника и писал на народном итальянском, а не на латыни, языке науки того времени, излагая свои мысли в виде диалогов, персонажи которых спорят о науках так же просто, как если бы они обедали или гуляли. Поэтому Галилей прослыл вольнодумцем, который отрицал авторитет церкви и университетов и апеллировал к здравому смыслу.

Конечно, Галилей был выдающимся полемистом и экспериментатором, но незаурядной его работу делают поставленные им вопросы. Он был отчасти свободен от античных догм. Древнее разделение мира на надлунный и подлунный, которое долго препятствовало развитию мысли, не впечатляло Галилея. Леонардо да Винчи нашел пропорции и гармонию в статических формах, а Галилей искал математическую гармонию в движении, например в колебаниях маятника или скатывании шара по наклонной плоскости.

Галилей открыл, что совершенство небес – иллюзия. Не он изобрел телескоп. И не один Галилей наблюдал в него небо. Но лишь Галилей во всеуслышание заявил: то, что он увидел в телескоп, далеко от совершенства. На Солнце есть пятна. На Луне (форма которой отличается от сферы), как и на Земле, существуют горы. Сатурн имеет странную форму, у Юпитера есть спутники, а на небе звезд гораздо больше, чем видно невооруженным глазом.

В 1577 году датский астроном Тихо Браге наблюдал комету. Он был последним из великих астрономов, не пользовавшихся телескопом, и все же ему с помощниками удалось составить таблицы движения планет, которые превосходили все прежние. Эти таблицы оставались нерасшифрованными до 1600 года, когда Тихо Браге пригласил Иоганна Кеплера поработать с ним.

Планеты передвигаются по эклиптике, но неравномерно. Все они движутся в одном направлении, но в какой-то момент останавливаются и начинают непродолжительное время двигаться вспять. Попытное движение планет являлось для древних великой тайной.

Дело здесь вот в чем. Земля – тоже планета, и обращается она вокруг Солнца.

²¹ Я знаю нескольких математиков и физиков, которым пришлось выбирать между музыкой и наукой. Жуан Магейжу, прежде чем заняться физикой, готовился стать композитором. Будучи человеком крайностей, он говорит, что с тех пор не садился за фортепиано. Знакомство с ним помогает мне представить характер Галилея.

Остановка и попятное движение планет – кажущийся эффект для наблюдателя на Земле. Марс перемещается по небу в восточном направлении тогда, когда он впереди нас, и меняет движение на попятное, когда мы его догоняем. Древние не понимали этого, поскольку считали, что Земля расположена в центре Вселенной и находится в состоянии вечного покоя. Античные астрономы объясняли попятное движение планет их внутренним движением. Для этого они изобрели очень неудобную систему, в которой каждая планета вращалась по малой окружности, центр которой, в свою очередь, вращался по большой окружности вокруг Земли.

Эпициклы, эти малые орбиты, вращались с периодом одного земного года, так как являлись отражением вращения самой Земли. Для более точной модели, однако, понадобилось гораздо больше орбит. Модель учитывала одновременное движение планет по 55 орбитам. Присвоив большим орбитам правильные наблюдаемые значения периодов обращений планет, античный астроном Птолемей смог откалибровать свою модель. Спустя несколько столетий арабские астрономы внесли в нее поправки. Ко времени Тихо Браге модель предсказывала положение небесных тел с точностью 1/1000 – достаточно хорошо, чтобы согласовываться с большинством наблюдений того времени. Модель Птолемея была математически безупречна, и ее успех убеждал астрономов и теологов, что предположения этой модели верны. Да и как они могут быть ошибочны, если наблюдения их многократно подтвердили?



Рис. 2. Вселенная по Птолемею ²².

Вот вам пример того, что ни математическая красота модели, ни согласие ее предсказаний с экспериментом не гарантируют истинности предположений, на которых эта модель основана. Птолемей и Аристотель были учеными не в меньшей степени, чем современные ученые. Просто им не повезло: оказалось, что несколько ошибочных гипотез неплохо согласуются. Не существует никакого противоядия от самообмана, кроме продолжения научных занятий.

Коперник задумался над тем, что все эпициклы имеют один и тот же период обращения и вращаются в фазе с Солнцем. Он поместил Землю на ее правильное, известное нам сейчас место, а Солнце – около центра Вселенной. Это сильно упростило модель, но шло вразрез с

²² Рисунок из “Космографии” Петера Апиана (1539). Воспр. по изд.: Koyre, Alexandre *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore, MD; Johns Hopkins, 1957.

античной космологией. С какой стати земной мир должен отличаться от небес, если Земля – лишь одна из планет?

Однако модель Коперника не была до конца революционной. Даже когда движение Земли было учтено, орбиты планет не являли собой правильные окружности. Коперник не мог избавиться от мысли, что движение на небе должно складываться из движений по окружностям, и вслед за Птолемеем ввел в модель дополнительные эпициклы, требуемые для описания наблюдений.

Сильнее всего от окружности отличается орбита Марса. Иоганну Кеплеру крупно повезло (и науке тоже): именно ему Тихо Браге поручил изучить орбиту Марса. Кеплер спустя много лет после того как он прекратил работать с Браге, обнаружил, что Марс перемещается не по окружности, а по эллипсу.

Современному читателю может быть не так очевидно, насколько революционной была эта догадка. В геоцентрической модели орбиты планет, вращающихся вокруг Земли, не были замкнуты. Орбита каждой планеты состояла из двух движений по окружности, каждое со своим периодом. Лишь в гелиоцентрической модели орбиты замкнуты и приобретает смысл вопрос о форме орбиты. Таким образом, помещая Солнце в центр, мы получаем несколько более стройную систему мироздания.

Как только стало ясно, что орбиты планет представляют собой эллипс, модель Птолемея начала терять привлекательность. Возникли вопросы: почему орбиты имеют форму эллипса? Почему планеты сохраняют движение по орбитам? Что заставляет их двигаться? Догадка Кеплера оказалась близкой к истине: Солнце заставляет вращаться планеты по орбитам. (Представьте светило в виде осьминога, щупальца которого удерживают небесные тела.) Впервые было высказано предположение, что Солнце является источником силы, влияющей на планеты. Ошибочным было лишь направление приложенной силы.

Браге и Кеплер вдребезги разбили небесные сферы, тем самым объединив Вселенную. Это объединение повлияло на понимание времени. В космологии Аристотеля и Птолемея мир вечного совершенства окружал подлунную область. Рост, разрушение, перемены, все события в мире, привязанном ко времени, были ограничены небольшой областью. Вне нее движение круговое, а мир совершенен и вечен. Теперь, когда сфера, разделявшая мир, разрушена, может существовать лишь одно понятие времени. Будет ли такой мир везде одинаково привязан ко времени, а рост и распад иметь место повсюду во Вселенной? Или, наоборот, вечное распространится на все сущее, а перемены, рождение и смерть станут иллюзорными? Мы до сих пор не знаем ответ.

Кеплер и Галилей не разгадали тайну связи вечного царство математики и реального мира. Они лишь усложнили задачу. Они разбили барьер, отделявший небо от земли, поместив Землю на небо как одну из божественных планет. Они открыли математические траектории движения тел на Земле и планет вокруг Солнца, но не преодолели разрыв между времязависимой реальностью и математикой.

В середине XVII века перед учеными и философами встал вопрос: что есть наш мир – математическая проекция или жизнь во времени? Кеплер открыл, что планеты перемещаются по эллиптической траектории, а Галилей – что падающие тела описывают параболу. Каждое из этих открытий выражается математическим языком и частично дает ключ к разгадке тайны движения. Каждое имело фундаментальное значение, а вместе они стали семенами научной революции.

В современной физике примерно та же ситуация. У нас есть квантовая теория и общая теория относительности, и мы пытаемся их объединить. Я занимаюсь этим большую часть своей жизни и должен признать, что продвинулись мы довольно далеко. В то же время я уверен, что от нас до сих пор ускользает некая простая идея, которая могла бы стать ключом к решению. Неприятно думать, что научный прогресс приостановился и ждет этой простой идеи, но ведь так уже случалось. Научная революция, начавшаяся с Галилея и Кеплера, запоздала из-за господства представления о разделении мира на небесное и земное. Оно

мешало применению математики в земном мире.

Страшно подумать, какой была бы история, если бы эта ошибочная концепция не ослепляла более тысячи лет ученых, в руках которых были все необходимые данные. Античные или средневековые арабские астрономы могли хотя бы частично открыть то, что открыл Кеплер. Догадку о том, что Земля вращается вокруг Солнца, высказывал еще Аристарх Самосский в III веке до н. э. Его гелиоцентрическую модель мира обсуждал, например, Птолемей. Она могла быть известна замечательному математику и философу Гипатии из Александрии. Предположим, что Гипатия или кто-либо из ее талантливых учеников открыл закон траектории падающих тел Галилея или орбит Кеплера²³. В VI веке вполне могла найтись и замена Ньютону, и тогда научная революция началась бы на тысячу лет раньше.

Историки могут возразить, что Коперник, Галилей и Кеплер не могли сделать свои открытия до Ренессанса, освободившего ученых от средневековой догматики. Но во времена Гипатии мрак еще не опустился на землю и религиозный фанатизм еще не прикончил здравый смысл. История могла быть совсем иной, если бы некто в римской Александрии или, например, в исламском мире времен его расцвета разрушил бы геоцентрическую модель. Однако даже лучшие ученые в лучших условиях не смогли сделать концептуальный прорыв. Необходимо было сломать барьер, отделявший небеса от земли. И даже Галилей и Кеплер не нашли общее между земной параболой и планетарным эллипсом. Это сделал Исаак Ньютон.

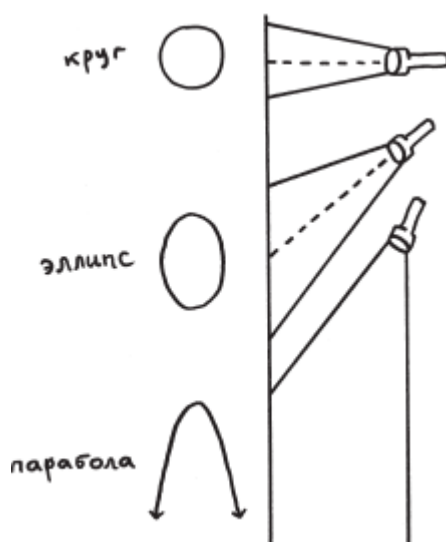


Рис. 3. Конические сечения.

Во времена Галилея и Кеплера разделения сфер на земную и небесную уже не существовало, и они вполне могли бы поинтересоваться, можно ли вывести на орбиту камень, если запустить его с большой скоростью, и приведет ли замедление тела на орбите к его падению? Очевидно, что это одно явление, а не разные. Но этого Галилей и Кеплер не увидели. Спустя полвека Ньютон догадался, что перемещение тел по орбите – это частный случай падения тел.

Одним из ключевых моментов этого объединения небесного и земного миров стала математическая общность двух кривых, описывающих движение. Эллипс описывает траектории планет, а парабола – падение. Эти кривые тесно связаны. Обе получаются при сечении конуса плоскостью. Кривая, построенная таким образом, называется коническим сечением (коникой). Другим примером конического сечения является гипербола.

Во второй половине XVII века была поставлена задача: найти физическое объединение,

²³ Так предполагает Алехандро Аменабар в фильме “Агора” (2009).

соответствующее объединению математическому. Знания, которые приблизили Ньютона к научной революции, касались природы, а не математики. Притом Ньютон был не одинок. Некоторые из его современников уже знали: сила, которая заставляет все тела падать на землю, универсальна, и она же притягивает планеты к Солнцу, а Луну – к Земле. Это гравитация.

По легенде, озарение пришло к Ньютону, когда он сидел в саду, обдумывая движение Луны. Глядя на падающие яблоки, он задался вопросом, как сила притяжения уменьшается в зависимости от расстояния до объекта. А она должна уменьшаться, иначе яблоки летели бы не на землю, а к Солнцу. И как сила производит движение?

Современник Ньютона Роберт Гук ставил те же вопросы, но правильные ответы на них дал Ньютон. В течение следующих двух десятилетий он построил теорию движения и сил, которую мы сейчас называем ньютоновой физикой.

Для наших целей наиболее важный аспект – математический. Уменьшение силы притяжения с расстоянием описывается простой формулой. Любой студент-физик знает: сила убывает пропорционально квадрату расстояния. То, что универсальное природное явление описывается простой формулой – удивительное следствие из нашей концепции природы. Природа не обязана быть настолько проста. В самом деле, античные ученые не сталкивались с простым, универсальным математическим описанием движения.

Прежде чем задать вопрос, как сила влияет на движение, представим тело, движущееся по траектории. Как изменяется форма траектории в зависимости от того, действует ли на тело сила? Ответ на этот вопрос – в первых двух законах Ньютона. Если на тело не действует сила, тело движется по прямой. Если к телу приложена сила, она вызывает ускорение тела.

Невозможно сформулировать эти законы без математики. Прямая – математическая идея, она существует в платоновском идеальном мире. А что такое ускорение? Это мера изменения скорости тела, которая, в свою очередь, есть мера изменения положения тела в пространстве. Чтобы описать это на языке математики, Ньютону пришлось разработать аппарат дифференциального исчисления.

Теперь можно было перейти к теории. Одним из первых вопросов, на которые Ньютон должен был ответить, приобретя новый инструмент²⁴, таков: какую форму принимает траектория планет под действием силы притяжения Солнца, убывающей как квадрат расстояния? Это может быть эллипс, парабола или гипербола – в зависимости от того, находится планета на замкнутой орбите или проходит вблизи Солнца. Ньютону удалось объяснить закономерности падающих тел, обнаруженные Галилеем, с помощью закона о гравитации²⁵. Таким образом, законы Галилея и Кеплера являются проявлениями гравитации.

В истории найдется не так уж много примеров важнее этого объединения. Но за величиной Ньютона стоит неожиданное следствие: на основании его работ сформировалась концепция природы, в гораздо большей степени опиравшаяся на математический аппарат. Аристотель и его современники описывали движение через тенденции: земля как элемент стремится к центру мира, воздух – от центра, и так далее. То была, по сути, описательная наука. Она не могла предположить, какую траекторию описывают тела, и, следовательно, применение математического аппарата к описанию движения на Земле было

²⁴ В “Математических началах натуральной философии” Ньютон пользовался не уже изобретенным им дифференциальным исчислением, а более простой математикой: к тому времени он еще не опубликовал его. Ньютон должен был объяснить свои открытия на доступном читателю языке.

²⁵ Рассмотрим шар, падающий вблизи поверхности Земли. Он притягивается каждым атомом планеты. Ньютон понял, что эти силы можно сложить, и получалось, что один объект притягивает мяч к центру Земли. Если я подбрасываю мяч, расстояние до центра Земли может увеличиться на несколько метров. Это очень мало, так что сила почти не меняется. Сила, действующая на брошенный предмет, может считаться постоянной. Это подразумевает, что и ускорение постоянно (это великое открытие сделал Галилей).

бессмысленным. Математика, существуя вне времени, носила отпечаток божественного и была применима лишь к вечным, небесным явлениям.

Когда Галилей обнаружил, что падающие тела описывают простую кривую, он перенес частицу божественного на Землю и показал, что это справедливо для всех тел. Ньютон показал, что все движение на Земле и в небесах из-за гравитации или по какой-то иной причине имеет общую скрытую природу. С тех пор мы живем в едином мире, причем в мире, сопряженном божественному: все, что движется, имеет отношение к математике. Если вечность и бесконечность являются чертами божественного, то наш мир (история мира), возможно, бесконечен и вечен, как и математическая кривая.

Глава 3

Игра в мяч

Что есть движение? Кажется, нет ничего проще: движение – это изменение положения тела в пространстве за определенное время. Но что такое “положение в пространстве” и что такое “время”?

Физики дают два ответа на, казалось бы, безобидный вопрос о положении тела в пространстве. Первый ответ подсказывает здравый смысл: положение тела в пространстве определяется относительно какого-либо ориентира. Второй ответ связывает положение тела с абсолютным. Речь идет об относительном и абсолютном понятиях пространства.

Относительное понятие положения в пространстве знакомо всем. Я в метре от стула. Самолет приближается к аэропорту с запада и сейчас в двух километрах от посадочной полосы № 1 на высоте 300 метров. Это описания относительного положения. Явно чего-то не хватает. Где абсолютная точка отсчета? Мы задаем координаты на Земле, но где Земля? Столько-то миль от Солнца в направлении созвездия Водолей. А где Солнце? Столько-то тысяч световых лет от центра Галактики. Продолжая в том же духе, можно задать относительное положение всего во Вселенной относительно всего. Но достаточно ли этого? Существует ли абсолютное положение?

Споры между приверженцами относительного и абсолютного понимания пространства идут на протяжении всей истории физики. Ньютону физику, воплощавшую триумф абсолютного подхода, одолела теория относительности Эйнштейна, установившая понятие относительности в пространстве. Я не сомневаюсь, что второй подход верен, и надеюсь убедить в этом и вас. Но я хотел бы объяснить, почему гении вроде Ньютона придерживались абсолютного понимания пространства и что мы теряем, когда отказываемся от этой точки зрения в пользу относительности.

Чтобы понять, что думал об этом Ньютон, следует спросить не только о положении в пространстве, но и о движении. Время пока оставим в стороне. Если положение относительно, то и движение – это изменение относительного положения, то есть изменение положения относительно заранее заданного тела.

Обывательские разговоры о движении сводятся к относительному движению. Галилей изучал падение тел относительно поверхности планеты. Я бросаю мяч и вижу, как он удаляется от меня. Земля вращается вокруг Солнца. Все это примеры относительного движения. Но возникает вопрос, что относительно чего перемещается. Земля и Луна вращаются друг относительно друга, но какое из этих тел находится в движении? Действительно ли Солнце в центре Вселенной? Или Солнце неподвижно, а Земля вращается? Если движение относительно, то на эти вопросы нет верного ответа.

Тот факт, что любое тело может двигаться, а может и пребывать в покое, усложняет объяснение причин движения. Как нечто может быть причиной вращения Земли вокруг Солнца, если существует иная точка зрения, в той же степени достоверная, согласно которой Земля покоится? Если движение относительно, мы вправе сказать, что оно относительно по отношению к нам. Чтобы разрешить эту проблему, Ньютон предположил существование абсолютного положения в пространстве. Для него абсолютное положение означало

положение относительно *абсолютного пространства* . Движение тел приобретает абсолютный смысл. Ньютон доказывал, что в абсолютном пространстве перемещается Земля, а не Солнце.

Постулирование абсолютного положения в пространстве делает ненужной бесконечную цепочку относительных измерений, придает смысл положению каждого объекта в пространстве. Это удобно. Но возникает вопрос: где абсолютное пространство и как измерить положение тел относительно него? Никто никогда не видел и не регистрировал абсолютное пространство. Никто не измерял положение иначе как относительно других тел. И если законы физики зависят от абсолютных координат, они не могут быть проверены экспериментально.

Ньютона это не беспокоило. Он был глубоко верующим человеком. Бог созерцает мир в абсолютном пространстве, и этого достаточно. Предметы существуют в пространстве потому, что они существуют в божественном разуме.

Если вы, как и Ньютон, мастер по разгадке тайн, это не покажется вам таким уж странным. Ньютон ломал голову над скрытым смыслом Писания, а будучи алхимиком, искал истину и, возможно, бессмертие. Как физик он открыл законы природы, которым подчиняются все движущиеся тела во Вселенной. Верить в то, что основа пространства скрыта от наших глаз и дана в ощущении лишь Богу, было очень в его духе. Кроме того, у Ньютона имелся и физический довод в пользу существования абсолютного пространства. Даже если мы не можем определить абсолютное положение тел, мы в состоянии измерить некоторое движение тел относительно абсолютного пространства.

Дети не могут летать, но умеют кружиться. Ничто не может сравниться с радостью ребенка в такие минуты. Все, что ему тогда хочется – кружиться еще и еще. У Ньютона не было детей. Но легко представить себе радость его племянницы Катерины, которая кружится около него. Ньютон сажает смеющуюся девочку себе на колени и рассказывает, что головокружение – непосредственное ощущение абсолютного пространства. И что абсолютное пространство и есть Бог: “Когда у тебя кружится голова, к тебе прикасается рука Господа”. Девочка хихикает, когда он начинает объяснять, что головокружение происходит не от того, что она кружится относительно мебели, дома или кошки, а оттого, что она вращается в абсолютном пространстве. А если вращение в абсолютном пространстве вызывает головокружение, то оно реально. “Почему?” – спрашивает она, выбегая из комнаты вслед за кошкой. Оставим Ньютона размышлять о гравитации и бессмертии и вернемся к вопросу, как определить движение.

Когда мы говорим, что тело движется, мы имеем в виду, что оно за определенное время меняет положение в пространстве. Это подсказывает нам здравый смысл. Но если быть точным, мы должны быть уверены в том, что такое время. Здесь мы сталкиваемся с дилеммой: относительное или абсолютное.

Человек воспринимает время как изменение. Промежуток времени, которое занимает то или иное событие, измеряется относительно других. Посмотреть на часы и на календарь занимает относительные промежутки времени, как и измерить относительное положение в пространстве. Но Ньютон верил в существование абсолютного времени, на фоне которого происходят все изменения и которое дано в ощущении лишь Богу.

Соперник Ньютона, Лейбниц, тоже верил в Бога. Однако его Бог не был волен делать все, что заблагорассудится. Бог Лейбница был в высшей степени рационален. Все в природе должно иметь причину. Это *принцип достаточного основания* . И любой вопрос наподобие: “Почему наша Вселенная такова?” должен иметь рациональный ответ. Конечно, есть вопросы, на которые, возможно, нет рациональных ответов. Но, согласно Лейбницу, вопрос, на который нет рационального ответа, равносильно логической ошибке.

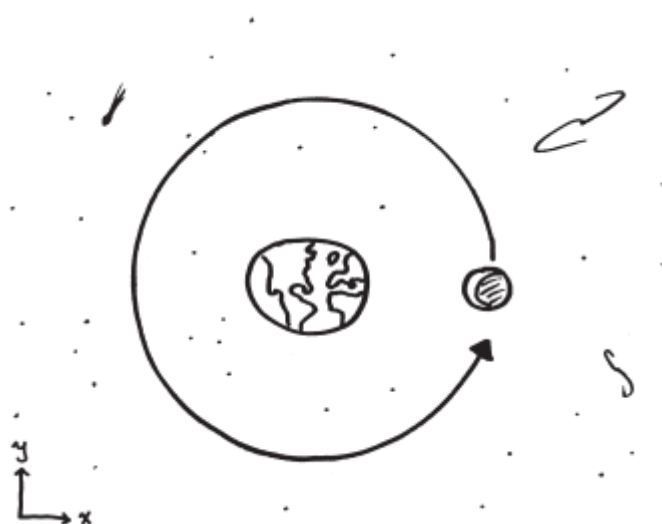


Рис. 4. График орбиты Луны.

Лейбниц спрашивал: “Почему Вселенная родилась именно в тот момент, а не 10 минутами позднее?” И отвечал: нет никакого резона отдать предпочтение этой Вселенной, а не той, в которой все происходит с опозданием на 10 минут. Относительное время будет одинаковым в обеих Вселенных, лишь абсолютное время будет различаться. Но в природе известно только относительное время. Следовательно, рассуждал Лейбниц, если нет причины для Вселенной родиться в один момент абсолютного времени, а не в другой, абсолютное время не имеет смысла.

Я принимаю доводы Лейбница, и везде, где разговор идет о времени, я имею в виду относительное время. Хотя мы можем предположить существование трансцендентного мира с абсолютным временем, нам доступно лишь относительное время. Так, при описании движения мы пользуемся временем, измеренным с помощью часов. Для наших целей часами может служить любой прибор, считывающий возрастающую последовательность чисел.

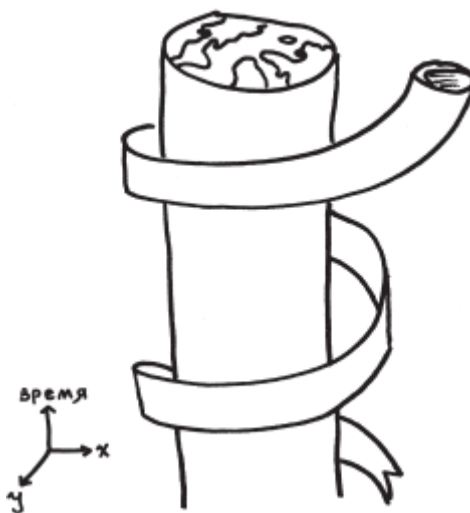


Рис. 5. График орбиты Луны в виде кривой в пространстве и времени.

Теперь, когда мы определили и время, и положение, мы можем измерить движение. Чтобы заниматься наукой, недостаточно давать определения и спорить о концепциях. Мы должны научиться измерять движение: с помощью инструментов, например линейки и часов, определять числа, соответствующие положению и времени.

В отличие от ненаблюдаемого абсолютного положения относительные расстояния и время могут быть измерены, а числа записаны на бумаге или на цифровом носителе. Таким образом, наблюдение за движением сводится к составлению таблиц, которые затем изучаются с применением математических методов. Одним из таких методов является

построение графика. Этот метод был предложен Рене Декартом. Несомненно, что-то подобное проделал Кеплер, обрабатывая данные Тихо Браге об орбите Марса.

В школе мы изучали и другой способ изображения движения: добавить ось времени и отложить положение тела в зависимости от времени. Получится изображение орбиты в виде кривой в пространстве и времени (рис. 5). Теперь орбита Луны представлена в форме спирали. Для возвращения в начальное положение должен пройти месяц.

Построив график по записям, мы сделали удивительную вещь. Кривая на рис. 5 представляет измерения чего-то, что изменяется во времени, но сами измерения постоянны, то есть сделанные однажды, они не меняются. И представляющая их кривая тоже постоянна. Таким образом, мы преобразовали движение (изменение в мире) в предмет изучения математики, которая имеет дело с неизменяемыми объектами.

Возможность “заморозить” время – большое подспорье для ученых. Поскольку нет необходимости наблюдать движение во времени, мы можем изучать измерения, сделанные в прошлом. Но кроме пользы для науки, это имеет большое значение для философии, поскольку подтверждает иллюзорность времени. Метод “замораживания” настолько безупречен, что физики не догадываются, какую роль он сыграл в их миропонимании. Этот метод послужил изгнанию времени из описания природы, подтолкнув нас к поиску корреляций между реальным миром и миром математики.

4 октября 2010 года в 13.15 в восточной части Хай-парка в Торонто писатель Дэнни бросил теннисный мяч, найденный им утром в шкафу, повстречавшейся ему поэтессе Джанет.

Чтобы наблюдать бросок мяча глазами физика, мы сделаем то же самое, что сделали в свое время Браге и Кеплер для изучения орбиты Марса. Наблюдая за полетом мяча, мы записываем его положения через определенные промежутки времени, а затем строим график. Сделать это мы можем, лишь определяя положение мяча относительно некоего объекта (Дэнни). Еще нам понадобятся часы.

Мяч летит быстро, и для Галилея это представляло определенную трудность. Мы же в состоянии снять полет на пленку и измерить положение мяча в каждом кадре, а также зафиксировать время каждого кадра. На каждый кадр мы имеем два числа: высота положения мяча над землей и горизонтальное расстояние от Дэнни. (Пространство, конечно, трехмерно, и мы должны еще описать направление броска, но опустим это обстоятельство.) Когда мы добавим значение времени для каждого кадра, то получим последовательность из трех чисел для каждого кадра.

Время 1, высота 1, расстояние 1.

Время 2, высота 2, расстояние 2.

Время 3, высота 3, расстояние 3.

И так далее. Этот комплекс данных важен для научного подхода к изучению движения. Но он не есть само движение. Это лишь числа, которым измерение полета мяча в каждый момент придало определенный смысл. Явление отличается от чисел, с помощью которых оно описано. Например, мы пренебрегли множеством свойств мяча: он обладает цветом, весом, формой, размером, внутренней структурой. Еще важнее, что действие развивается во времени. Оно произошло однажды и ушло в прошлое. Все, что осталось – наши записи.

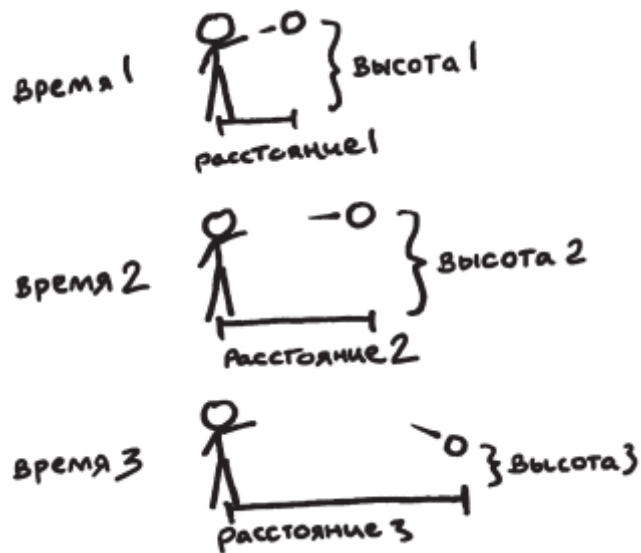


Рис. 6. Полет мяча, брошенного Дэнни: график и замеры.

Теперь выразим информацию в графической форме. На рис. 7 показана траектория мяча: он полетел по параболе, следуя предсказанию Галилея. Процесс записи движения, которое происходит во времени, снова выражен в виде чисел, которые могут быть представлены в виде графика.



Рис. 7. Полет мяча, брошенного Дэнни, в измерениях и графике.

Некоторые философы и физики видят здесь глубокий смысл. Другие, напротив, считают, что математика лишь инструмент, великая польза от которого не должна нас заставлять представлять мир более математическим, чем он есть. Мы можем назвать эти конкурирующие точки зрения “мистической” и “прагматической”.

Прагматик не считает неправильным проверить работу законов движения путем преобразования его в табличные данные и поиска закономерностей в этих таблицах. Но он будет настаивать, что математическое представление движения в виде кривой не подразумевает, что движение идентично своему представлению. Сам факт, что движение происходит во времени, а его математическое представление – вне времени, означает, что это разные вещи.

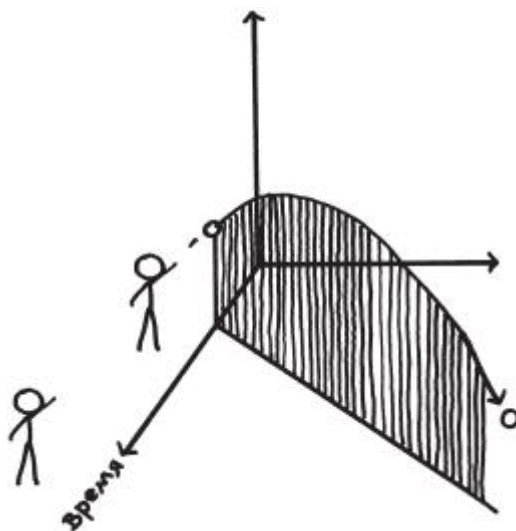


Рис 8. Полет мяча, брошенного Дэнни, в пространстве и времени.

Со времен Ньютона некоторые физики усвоили мистический взгляд, согласно которому математическая кривая реальнее самого движения. Соблазн такого подхода в том, что он вневременной. Поддаваясь соблазну подменить реальность ее представлением и отождествить график движения с самим движением, эти ученые делают шаг в сторону устранения времени из картины мироздания.

Неразбериха становится еще заметнее, когда мы пытаемся представить время как ось (рис. 5). На рис. 8 информация о траектории мяча Дэнни, включая показания часов. Это можно назвать *опространенным временем*.

Математическое сочетание представления пространства и времени, отложенных каждое по своей оси, можно назвать *пространством-временем*. Прагматик будет настаивать на том, что пространство-время – это еще не реальный мир. Это человеческое изобретение, другое представление данных о процессе бросания мяча. Если мы спутаем пространство-время и реальность, мы впадем в заблуждение *спатиализации* (опространивания) времени. Это прямое следствие того, что мы забыли о различии между данными и самим временем.

В этом случае вы вольны фантазировать, что во Вселенной время отсутствует, даже что в ней нет ничего, кроме математики. Но прагматик скажет, что отсутствие времени и математика – лишь свойства представления данных наблюдения за движением тела. Они не являются и не могут являться свойствами движения. В самом деле, абсурдно называть движение вневременным, поскольку движение и есть выражение времени.

Существует простая причина, в силу которой для полного представления истории Вселенной математические объекты не подходят. У нее есть свойство, отсутствующее у любого математического объекта: в мире всегда присутствует время. Математические объекты им не обладают²⁶. Кто прав: прагматик или мистик? Это вопрос к физике и космологии будущего.

Глава 4 Физика “в ящике”

Школьником я попробовал сыграть роль в пьесе Сартра “За закрытыми дверями”. Я играл Гарсэна, запертого в комнате с двумя женщинами. Все трое на самом деле уже умерли. Сцена являла собой крайний вариант замкнутого общества. Это позволило драматургу изучить последствия нашего нравственного выбора. В кульминационный момент я должен

²⁶ Некоторые возразят, что в математике можно параметризовать зависимость от времени, то есть $f(t)$ является функцией времени. Это так, но функция $f(t)$ является вневременной.

был ломиться в дверь класса, крича знаменитое: “Ад – это другие!” Но стекло в двери разбилось, обдав меня градом осколков. Так окончилась моя актерская карьера.

Музыка, как и театр, позволяет изучать эмоции в контролируемой среде. Подростком я слушал леденящее душу произведение в исполнении группы “Суицид” моего двоюродного брата в подвале центра “Мерсер” в Гринвич-виллидже. Музыканты заперли двери и буквально загнипотизировали слушателей, до отупения повторяя классику гаражного рока *96 Tears*, песню о бессмысленном убийстве. Ощущение клаустрофобии усиливалось: как и в пьесе Сартра, мы сидели взаперти. Совсем недавно этот метод взяли на вооружение художники-концептуалисты. Они закрывали на сутки в комнате двух очень непохожих людей, например художника и ученого, и снимали на видео все, что происходило²⁷.

И в том спектакле, и на концерте изоляция не являлась настоящей. Можно было уйти в любое время. Но аудитория этого не делала, потому что есть многое, чему нужно научиться. Ограничение превращается в благо. Искусство ищет общее в частном²⁸, и чтобы добиться успеха, нередко приходится накладывать ограничения. То же и в физике. Большинство из того, что мы знаем о природе, мы знаем благодаря экспериментам, во время которых мы изолируем явление от круговорота Вселенной. Метод этот обусловил успех физики со времен Галилея. Я называю его физикой “в ящике”. У него есть и преимущества, и недостатки, причем и те, и другие играют важнейшую роль в истории изгнания времени из физики и его возвращения.

Мы живем во Вселенной, в которой материя находится в вечном движении. Декарт, Галилей, Кеплер и Ньютон научились изолировать малые части мира, изучать их и описывать наблюдаемые изменения. Они показали, как нужно представлять записи этого движения в виде графиков, оси которых соответствуют положению в пространстве и времени. Графики можно изучать в любое время.

Для применения математики к физической системе мы в первую очередь должны изолировать последнюю. Мы недалеко ушли бы в исследовании движения, если бы беспокоились, как все сущее во Вселенной влияет на предмет нашего исследования. Основоположники физики добились успеха лишь потому, что умели изолировать простые подсистемы вроде полета мяча. В реальности, однако, мяч в полете подвержен влиянию мириада факторов вне выделенной подсистемы. Простое описание игры в мяч как замкнутой системы – грубое приближение, которое, однако, помогло открыть принципы, регулирующие, как выяснилось, движение в нашей Вселенной²⁹.

Для изучения системы мы должны определить, что она содержит и что мы из нее исключаем. Мы рассматриваем систему, как если бы она была изолирована от остальной

²⁷ Diamond, Sara, et al. *CodeZebra Habituation Cage Performances*. Rotterdam: Dutch Electronic Arts Festival, 2003.

²⁸ Благодарю Сент-Клэра Семена за обсуждение этого вопроса.

²⁹ Рассмотрим систему из звезд, движущихся под влиянием взаимного гравитационного поля. Взаимодействие двух звезд может быть описано точно, Ньютон решил эту проблему. Но нет точного решения, описывающего гравитационное взаимодействие трех звезд. Любая система из трех или более тел должна рассматриваться приблизительно. Такие системы демонстрируют широкий спектр поведения, включая хаос, и крайне чувствительны к начальным условиям. Хотя это лишь пример простой системы, состоящей из двух звезд, решение для которой нашел Ньютон еще в XVII веке, эти явления не были известны до начала 20-х годов XX века, когда их описал французский математик Анри Пуанкаре. Осмысление так называемой задачи трех тел потребовало изобретения совершенно нового раздела математики: теории хаоса. В наше время системы из тысяч или миллионов тел могут моделироваться с помощью суперкомпьютеров. Это моделирование позволило понять поведение звезд в галактиках и даже взаимодействие галактик в скоплениях. Но результаты, несмотря на всю их пользу, основаны на грубых приближениях. Звезды, состоящие из огромного числа атомов, оцениваются, как если бы они были точками, и воздействие их с чем-либо вне системы, как правило, игнорируется.

Вселенной, и эта изоляция сама является сильным приближением. Мы не можем отделить систему от Вселенной. В эксперименте мы можем лишь уменьшить, но не устранить внешнее влияние на нашу систему. Тем не менее, во многих случаях мы можем сделать это достаточно аккуратно, чтобы идеализация замкнутой системы стала полезной конструкцией.

Частью определения подсистемы является перечисление всех переменных, которые необходимо измерить, чтобы узнать о системе все, что мы хотим знать о ней в определенный момент времени. Список этих переменных – абстракция, которую мы называем *конфигурацией системы*. Чтобы представить набор всех возможных конфигураций, мы определяем абстрактное пространство, называемое *конфигурационным*. Каждая точка в конфигурационном пространстве представляет собой одну из возможных конфигураций системы. Конфигурационное пространство – это всегда приближение к более полному описанию. И конфигурация, и ее представление в конфигурационном пространстве являются абстракцией, человеческим изобретением, полезным для занятий физикой “в ящике”.

Для описания бильярда мы можем выбрать для записи расположение 16 шаров на двумерном столе. Чтобы локализовать шар на столе (его положение относительно длины и ширины стола), потребуются два числа, поэтому полная конфигурация потребует 32 числа. В конфигурационном пространстве имеется одно измерение для каждого числа, которое должно быть измерено, так что в случае с бильярдом оно представляет собой 32-мерное пространство.

Но настоящий бильярдный шар представляет собой чрезвычайно сложную систему, так что представление о нем как об объекте с определенным положением является сильным приближением. Если вы желаете получить более точное описание игры на бильярде, придется фиксировать позиции не только шаров, но и каждого атома в каждом шаре. Это потребует по меньшей мере 1024 чисел и, следовательно, конфигурационного пространства более высокой размерности. Но зачем останавливаться на достигнутом? Если описание на уровне атомов – это то, что вы хотели, вы должны учесть положение всех атомов бильярдного стола, всех атомов воздуха, которые барабанят по шару, всех квантов света в комнате... Или даже всех атомов, из которых состоят Земля, Солнце и Луна, действующих на шары посредством гравитации. Любое описание меньше космологического будет приблизительным.

Вне подсистемы остаются еще часы. Они не считаются ее частью, поскольку предполагается, что время течет равномерно, независимо от того, что происходит в подсистеме. Часы задают стандарт, в сравнении с которым мы измеряем движение подсистемы.

Использование внешних часов нарушает концепцию относительности времени. Изменения в системе измеряются по отношению к ходу внешних часов, но мы предполагаем, что ничто в системе не может повлиять на ход внешних часов. Это удобно, но возможно лишь потому, что мы пренебрегаем всеми взаимодействиями между системой и всем, что находится вне ее, в том числе часами.

Если мы принимаем этот подход слишком серьезно, может возникнуть искушение представить внешние по отношению к Вселенной часы, с помощью которых мы можем измерять изменения во Вселенной. Это приведет нас к концептуальной ошибке, основанной на вере в то, что Вселенная в целом эволюционирует по отношению к некоему абсолютному времени. Ньютон совершил эту ошибку, потому что считал свою физическую картину мира в целом устроенной Богом. Эта ошибка сохранялась, пока Эйнштейн не нашел способ перенести часы внутрь Вселенной.

Тем не менее, если мы не принимаем эту концепцию слишком серьезно, картина небольшой подсистемы, эволюционирующей в сопоставлении с показаниями внешних часов, является весьма полезным приближением. В каждый момент измерения мы получаем ряд чисел, характеризующих конфигурацию подсистемы в это время, и, следовательно, определяем точки в конфигурационном пространстве. Мы можем идеализировать эту последовательность точек с помощью кривой в конфигурационном пространстве (рис. 9).

Она представляет собой историю эволюции подсистемы в виде записанной последовательности измерений ее конфигурации. Как и в случае игры Дэнни и Джанет, в этой картине время не присутствует. Осталась траектория в пространстве возможных конфигураций, несущая информацию о прошлом. После эксперимента у нас остается представление о движении подсистемы, которое разворачивалось во времени всего раз – посредством математического объекта, которым является кривая в пространстве возможных конфигураций подсистемы.

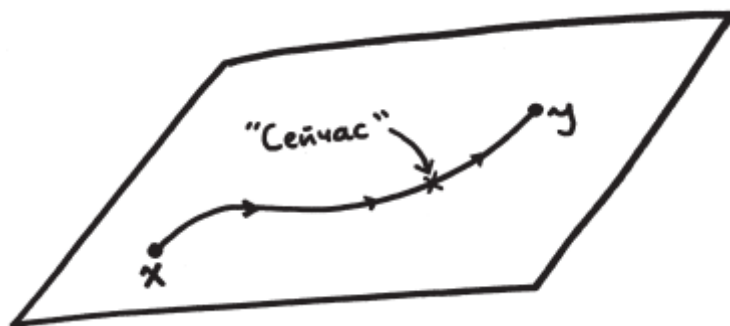


Рис. 9. Конфигурационное пространство и проходящая через него кривая истории.

Конфигурационное пространство существует вне времени – предполагается, что всегда. Когда я говорю о “пространстве возможных конфигураций”, я имею в виду, что если бы я пожелал, то поместил бы подсистему в любую из этих конфигураций в любое время. История системы в представлении такой кривой начинается с ее первой точки. Эта кривая, однажды построенная, существует вне времени. Это возвращает нас к ключевому вопросу: является ли исчезновение времени в таком представлении отражением реальности – или это заблуждение, непредвиденное следствие метода приблизительного описания малых частей Вселенной?

Ньютон сделал больше, нежели открыл способ описать движение. Он смог предсказывать его. Галилей обнаружил, что мяч летит по параболе. Ньютон дал нам метод определения формы траектории для множества случаев. Этот метод и есть содержание его трех законов движения. Они могут быть резюмированы следующим образом. Чтобы предсказать траекторию мяча, необходимо знать:

- а) Исходное положение мяча;
- б) Начальную скорость мяча (как быстро и в каком направлении он движется);
- в) Силы, которые будут действовать на мяч во время движения.

Располагая этой информацией и опираясь на законы Ньютона, можно предсказать траекторию. Мы можем запрограммировать компьютер, чтобы он сделал это вместо нас. Задайте три начальных условия, и компьютер выдаст траекторию. Решение уравнений Ньютона представляет собой кривую в конфигурационном пространстве, историю системы с момента, в который приготовлена система или начаты наблюдения. Конфигурация системы в этот момент называется *начальным условием*. Вы описываете исходное состояние, когда задаете исходное положение и начальную скорость. Затем подключаются законы движения и довершают дело.

Один закон имеет бесконечное множество решений, и каждое из них описывает возможное поведение системы, удовлетворяющее этому закону. Когда вы задаете начальные условия, то указываете, какое из множества решений описывает конкретный эксперимент. Таким образом, чтобы предсказать будущее или что-либо объяснить, недостаточно знания законов. Вы должны знать начальные условия. В лабораторных экспериментах это легко, потому что экспериментатор подготавливает систему, задавая ее исходное состояние.

Закон падения тел Галилея определяет, что мяч Дэнни полетит по параболе. Но по какой? Ответ зависит от того, как быстро, под каким углом и из какого положения Дэнни бросил мяч, то есть от начальных условий.

Оказывается, этот метод применим к любой системе, которая может быть описана с помощью конфигурационного пространства. После того, как система определена, нам необходима все та же исходная информация:

- а) Начальная конфигурация системы;
- б) Первоначальное направление и скорость изменения системы;
- в) Силы, действующие на систему во время ее эволюции.

Законы Ньютона предсказывают точную кривую в конфигурационном пространстве, которой система будет следовать.

Нельзя недооценивать универсальность и мощь метода Ньютона. Он применим к звездам, планетам и их спутникам, к галактикам, звездным скоплениям, скоплениям галактик, к темной материи, атомам, электронам, фотонам, к газам, твердым телам и жидкостям, к мостам, небоскрегам, автомобилям, самолетам, искусственным спутникам и ракетам. Его успешно применяют и к системам с одним, двумя, тремя телами, и к системам, состоящим из 1023 или 1060 частиц, а также к полям, например электромагнитным, определение которых требует измерения бесконечного числа переменных (электрического и магнитного поля в каждой точке пространства). С его помощью описано огромное количество сил или взаимодействий, также представляющих собой переменные, которые определяют систему.

Этот метод может быть применен и в области компьютерных наук, где он называется моделью клеточных автоматов. Модифицированный, он стал основой квантовой механики. Имея в виду могущество этого метода, его можно назвать парадигмой. В сущности, ньютонова парадигма выстраивается из ответов на два вопроса:

- а) Каковы возможные конфигурации системы?
- б) Какие силы действуют на систему в каждой из конфигураций?

Возможные конфигурации называются *начальными условиями*, потому что с их помощью мы указываем начальное состояние системы. Правила, согласно которым описываются силы и их действие, называются *законами движения*. Эти законы представлены уравнениями. Когда вы зададите начальные условия, уравнения определяют будущую эволюцию системы. Существует бесконечное количество таких решений уравнений, поскольку существует бесконечное число возможных начальных условий.

Следует знать, что этот метод основан на нескольких предположениях. Во-первых, что конфигурация пространства существует вне времени. Предполагается, что метод может дать набор всех возможных конфигураций, прежде чем мы сможем наблюдать действительную эволюцию системы. Возможные конфигурации не эволюционируют, а просто существуют. Второе предположение состоит в том, что силы и, следовательно, законы, которым подчиняется система, существуют вне времени. Предположительно, они также могут быть указаны до фактического исследования системы.

Этот урок столь же прост, сколь и страшен. В рамках ньютоновой парадигмы время не имеет значения и может быть устранено из описания мира. Если пространство возможных конфигураций, как и законы движения, может быть определено без привлечения времени, нет необходимости рассматривать историю любой системы как развивающуюся. Для ответов на любые вопросы физики достаточно представлять историю системы с помощью одной из застывших кривых в конфигурационном пространстве. Самый, казалось бы, важный аспект обыденного познания мира, данный нам в ощущении последовательности мгновений, в наиболее успешной модели описания природы отсутствует.

Мы начали с теннисного мяча с номером телефона, брошенного Дэнни Джанет в Хай-

парке 4 октября 2010 года. И мяч этот привел нас к вечности.

Глава 5

Изгнание новизны и неожиданности

Предложение ньютоновой парадигмы в качестве универсального метода занятий физикой “в ящике” стало ключевым событием в истории изгнания времени. Эта парадигма предоставила аргумент в пользу детерминизма, сформулированный Пьером Симоном Лапласом. Он утверждал, что если задать точное положение и движение всех атомов во Вселенной и точно описать силы, которые на них действуют, он смог бы в точности предсказать будущее Вселенной. Это убедило многих, что настоящее целиком определяет будущее.

Здесь есть серьезное допущение. Можно экстраполировать метод Ньютона на Вселенную и поместить все сущее в ней в экспериментальный “ящик”. Но физика “в ящике” начинается с изоляции небольшой подсистемы Вселенной.

Вернемся в парк. 14 августа 2062 года, 3.15 пополудни. Лора, внучка Дэнни и Джанет, бросает фрисби Франческа, дочери Билли и Роксаны. В тот момент, когда Лора бросает фрисби, Франческа отвлекается на флэш-сообщение в своем микромобильнике, имплантированном в сетчатку. Поймает ли она фрисби?

Если вы считаете, что ньютонова парадигма непосредственно применима к описанию нашего мира, придется признать: уже в 2010 году было предопределено, что Дэнни и Джанет поженились (а кто мог об этом знать?), и время, когда будет зачат их сын, и на ком он женится, и когда будет зачата его дочь, и станет ли она играть с фрисби. Вам придется согласиться с тем, что каждое движение, мысль, эмоция этих людей предопределены, а также что полный список жителей планеты уже составлен, даже если невозможно представить, как его расшифровать.

Вы должны верить в то, что Лора и Франческа в тот день станут играть в фрисби, хотя они росли, не зная друг друга, и встретились всего за пять минут до игры. И в то, что нельзя предотвратить ни появление имплантируемых в сетчатку микротелефонов, ни отправку сообщения, отвлекшего Франческу. Итак, сможет ли она поймать фрисби? Никто из наблюдателей не мог это знать, но если будущее предопределено, то, в принципе, существуют некоторые измерения, которые могут уже сейчас поведать о будущем.

Утверждение, что законы физики вместе с начальными условиями определяют грядущее вплоть до деталей, поразительно потому, что даже в долгосрочной перспективе эти детали играют большую роль. Так, при зачатии один сперматозоид из около 100 миллионов оплодотворяет яйцеклетку. Это происходило в истории человечества около 100 миллиардов раз и триллионы раз раньше, в ходе эволюции наших предков. Выбор, сделанный триллионы раз – это огромный объем информации, но мы должны считать, что все это (и многое другое) учтено в начальных условиях Вселенной в очень далеком прошлом. И это лишь одна деталь.

Итак, в рамках ньютоновой парадигмы время исчезает. Все события в прошлом, и все, что происходит сейчас, и все, что случится в будущем, являются точками на траектории в конфигурационном пространстве Вселенной, на кривой, которая уже проведена. Ход времени не привносит никакой новизны, никаких сюрпризов. Изменения – просто перетасовывание одних и тех же фактов.

И если в мире есть место для сюрпризов, то что-то не так с ньютоновой парадигмой – по крайней мере с распространением этого метода от малых подсистем Вселенной к точному описанию всей Вселенной. Один из парадоксов заключается в том, что если будущее определяется учетом начальных условий, вы должны знать, что определяет начальные условия. По мере того, как вы ищете причины, почему события именно таковы, вы углубляетесь в минувшее.

При этом следует принимать во внимание все большие области пространства, содержащие события, которые, возможно, повлияли на предков Дэнни и Джанет. Если

заглянуть на миллионы лет в прошлое, когда случайно встретились два *Homo erectus* из разных кочевых групп, вам придется обследовать район в 2 миллиона световых лет, чтобы убедиться, что во всей истории не было вспышки достаточно близко расположенной к нам сверхновой, способной уничтожить жизнь на Земле. Если мы отправимся еще глубже в прошлое, к времени зарождения жизни, нам придется обозреть существенную часть наблюдаемой Вселенной.

Таким образом, если мы ищем не только необходимые, но и достаточные причины, мы обязаны учесть все достаточные причины встречи Дэнни и Джанет, включая начальные условия на космологических расстояниях и временных промежутках. Двигаясь по цепочке причин назад во времени, мы обнаружим, что в решение этой проблемы вовлечена вся Вселенная. И прежде чем мы доберемся до причины, мы дойдем до Большого взрыва. Достаточная первопричина встречи Дэнни и Джанет кроется в начальных условиях для Вселенной в момент Большого взрыва. Вопрос о применимости довода в пользу детерминизма, следовательно, лежит в области космологии. Если мы желаем знать, как встретились Дэнни и Джанет, нам нужна теория мироздания.

Метод физических экспериментов “в ящике” хорош для малых подсистем. Прежде чем мы сможем ответить на вопрос, насколько события нашей жизни определяются условиями в далеком прошлом, мы должны знать, могут ли наши теории быть расширены до масштабов Вселенной.

Мы живем в мире, в котором взмах крыльев бабочки может повлиять на то, какая погода установится на противоположном берегу океана через несколько месяцев. Изменения начальных условий усиливаются экспоненциально и в конце концов приводят к заметным изменениям. Поэтому физика “в ящике” допускает ряд приближений: выбор наблюдаемых величин, чтобы смоделировать конфигурационное пространство, и пренебрежение влиянием всего остального в мире.

Если вы знаете законы физики, применимые к мельчайшим частям подсистемы, то можете представить точное описание всех переменных, необходимых для описания подсистемы, и все силы, посредством которых эти переменные взаимодействуют. Наиболее точное описание законов природы и элементарных частиц, которое мы имеем сейчас, – стандартная модель физики элементарных частиц, которая вписывается в рамки ньютоновой парадигмы. Эта модель содержит все, что мы знаем о природе, кроме гравитации, и неоднократно была проверена экспериментально.

Почему бы не применить этот подход к остальной Вселенной? Можно представить, как применить его к более крупной подсистеме, которая содержит рассматриваемую, то есть не только теннисный мяч Дэнни, но и все и всех в тот день в парке. Следом можно расширить этот подход на все и всех в Торонто, далее – на все, что на поверхности и внутри Земли и на миллион километров окрест. Каждый раз, когда вы расширяете подсистему, вы можете руководствоваться одними и теми же законами и следовать ньютоновой парадигме. С каждым расширением приближение становится все лучше, значит, усиливается довод в пользу детерминизма.

Но нечто всегда остается снаружи системы. Например, у границ Солнечной системы может оказаться большое черное облако, которое через год поглотит Солнце, или комета, которая столкнется с Землей через 10 лет. Эти события могут сорвать брак Дэнни и Джанет. Возмущение не обязательно должно быть большим или действовать непосредственно на Землю. Дэнни могла отвлечь новость о комете вблизи Юпитера, он вышел бы в парк минутой позже и не встретил бы Джанет. И миллионы людей не стали бы их потомками. Мелкие происшествия, приводящие к грандиозным последствиям, – обычное дело.

Детерминистическую физическую теорию можно уподобить компьютеру. Конфигурационное пространство – это память, в которую помещаются данные. Закон аналогичен программам. Вы запускаете программу, и она преобразует входные данные в выходные. При заданных входных данных и программах выход будет полностью определен. Каждый раз, когда компьютер работает с одинаковыми входными данными, вы получите тот

же результат. Но следует подумать вот о чем: результат работы компьютера определяется входными данными и программами двумя различными способами.

Рассмотрим компьютер с точки зрения физики. Он подчиняется ее законам. С этой точки зрения выход причинно определяется входными данными. Это результат действия законов физики на начальные условия. Этот процесс требует времени, поскольку причинный процесс, подчиняющийся законам физики, протекает во времени.

Но результат работы компьютера определяется и иначе. Входные данные и программы подразумевают выход. Входные и выходные данные представляют собой математические объекты. Программа – также математический объект. Можно логически доказать, что результат работы компьютера представляет собой математическое следствие сочетания входных данных и программы. Это логическое определение не требует учета времени, потому что физики здесь нет. Доказательство логической связи между комбинацией программ и входных данных с выходом – математический факт.

В этом смысле время устраняется из описания физики в рамках ньютоновой парадигмы. Нет нужды включать компьютер, чтобы узнать результат его работы: этот результат можно получить с помощью умозаключений. Не имеет значения, как эти умозаключения сделаны. Компьютер – лишь средство использования законов физики для моделирования причинно-следственного процесса. Но есть бесконечно много способов построить и запрограммировать компьютер. И все они приведут к тем же результатам.

Дело в том, что компьютер не выдаст информацию, которой не было на входе. Выход – просто преобразование входной информации согласно некоторым логическим правилам. В этом смысле не может быть произведено ничего нового. Также нет необходимости в причинно-следственной эволюции во времени, чтобы просто воспроизвести логику событий. То же справедливо для любой системы, описанной в рамках ньютоновой парадигмы. Во всех таких случаях конечная конфигурация – лишь результат работы физических законов, действующих на начальные условия. Как только законы выражены в виде уравнений, эволюция начальных условий в окончательную конфигурацию за определенное время становится математическим фактом. Это может быть доказано как теорема. Ньютонова парадигма заменила причинные процессы, протекающие во времени, на логическую последовательность, в которой время не играет никакой роли.

Полезно также рассмотреть законы физики, действующие в обратном во времени направлении. Если провести аналогию между законами физики и компьютером или машиной, которая преобразует начальные условия в окончательную конфигурацию, вы сможете представить, как закон, имея гипотетический переключатель, может быть приложен в обратном направлении. Для этого надо щелкнуть переключателем и заменить конечную конфигурацию начальной. Закон проработает столько же, но в обратном направлении. Такой закон называется *обратимым во времени*.

Вот пример: движение Земли вокруг своей оси и Солнца. Изменение направления времени изменяет орбиту и вращение Земли, но законами Ньютона это допускается. Предположим, вы сняли фильм о движении Земли и показали его инопланетянам. Они сказали бы (если бы имели хоть малейшее представление о законах), что законы Ньютона определяют это движение. Но если бы вы прокрутили фильм в обратную сторону, они также решили бы, что орбита удовлетворяет законам Ньютона. Они не смогли бы отличить оригинальный фильм от вывернутого наизнанку. То же и в случае движения Солнечной системы (8 планет), и в случае миллиарда других тел.

Многие из нас видели фильмы, прокрученные наоборот, и смотреть их странно или смешно. Часто это происходит не потому, что обратное движение противоречит законам физики. Такое движение возможно, но очень маловероятно. Как правило, это справедливо в сложных системах, содержащих большое число элементов вроде атомов. Придется разобраться с законами термодинамики, которые не являются обратимыми во времени (см.

главы 16 и 17)³⁰. А сейчас рассмотрим два простых примера.

Многие законы физики обратимы. Таковы, например, законы ньютоновой механики, теории относительности и квантовой механики. Стандартная модель (СМ) физики элементарных частиц почти обратима во времени. Если рассмотреть ситуацию, которая развивалась согласно СМ, обратите ось времени в обратном направлении и одновременно проведите два других изменения: вы получите новую историю, новые ситуации. Эти два изменения – замена частиц на античастицы и замена левого на правый. Полностью эта операция называется *CPT*-преобразованием (*C* – зарядовая, *P* – пространственная, *T* – временная четности). Вы подумаете, что кто-то прокручивает пленку назад. Любая теория, не противоречащая квантовой механике и специальной теории относительности, позволяет изменять направление времени.

Эти обращения времени являются еще одним доводом в пользу его нереальности. Если законы природы могут быть обращены во времени, то не может быть разницы между прошлым и будущим, и то, что мы по-разному воспринимаем прошлое и будущее, не играет фундаментальной роли в картине мира. Кажущееся различие между будущим и прошлым должно быть или иллюзией, или следствием особых начальных условий.

Людвиг Больцман, хорошо понимавший природу энтропии и сделавший больше, чем кто-либо, для понимания связи мира атомов с макромиром, однажды сказал: “Для Вселенной два направления времени неотличимы друг от друга так же, как в космосе нет верха и низа”³¹. И если нет различия между прошлым и будущим, то есть если они имеют одинаковое содержание, логически заменены, не нужно верить в реальность ни настоящего, ни прошлого. Обратимость законов физики во времени часто воспринимается как еще один шаг в устранении времени из физической картины мира.

Нам осталось лишь несколько шагов, прежде чем время уйдет. Следующий связан с теорией относительности, дающей наиболее убедительный довод в пользу нереальности времени.

Глава 6

Относительность и безвременность

Когда мне было 9 лет, отец принес домой (мы жили в Манхэттене) книгу Линкольна Барнетта “Вселенная и д-р Эйнштейн”. Мы вместе думали над объяснениями теории относительности. Я и сейчас помню рисунки мчащихся поездов и искривления света. То было мое первое знакомство с физикой.

Примерно в 16 лет (мы поехали на метро в гости к моей двоюродной сестре, которая играла в рок-группе) я прочитал первую статью Эйнштейна по общей теории относительности (ОТО). Классические работы Эйнштейна и тогда издавали в мягкой обложке³². Его статьи, которые я, к счастью, прочитал прежде учебников, сыграли главную роль в моем решении посвятить себя физике. Тогда я и понятия не имел, что эйнштейновские статьи – лучший пример ясного выражения мыслей о природе. Это как если после посещения пятизвездочного французского ресторана вам оставили лишь кукурузные хлопья, арахисовое масло и желе.

Позднее я обнаружил, что в физике мало концептуальных идей, способных

³⁰ Там мы объясняем парадокс: законы термодинамики (например закон возрастания энтропии) необратимы во времени, а более фундаментальные законы природы – обратимы.

³¹ Boltzmann, Ludwig *Lectures on Gas Theory* . Dover Publications, 2011.

³² См.: *The Principle of Relativity* . Dover Publications, 1952. Здесь 7 работ Эйнштейна, 2 – Хендрика Антона Лоренца, по 1 – Германа Вейля и Германа Минковского.

соперничать с ясностью и стройностью теории Эйнштейна. Ни квантовая механика, ни современная квантовая теория поля, ни даже ньютонова механика не смогли внести ясность в путаницу определений основных понятий, таких как масса и сила. Но поскольку я начал с Эйнштейна, его работа стала моим научным стандартом, а его теория – критерием в науке.

Эйнштейновская теория относительности предоставляет сильнейшие на данный момент доводы в пользу того, что иллюзия маскирует истинную реальность. Тогда, когда я считал, что время – это иллюзия, мой главный довод был связан с теорией относительности.

Эйнштейн предложил две теории относительности. Первая, специальная (СТО), трактует о мире без гравитации. Она изложена в двух статьях, которые Эйнштейн опубликовал в 1905 году, своем *annus mirabilis* [году чудес]³³. ОТО, открытая им в следующее десятилетие, включала также гравитацию.

Две теории относительности Эйнштейна являются теориями времени или, лучше сказать, теориями отсутствия времени. Они незаслуженно считаются сложными. Я нахожу их элегантными и простыми для объяснения. Принцип относительности на первый взгляд парадоксален, поскольку он заменяет ошибочный интуитивный подход на более глубокий, подтвержденный экспериментами. Понять теорию относительности – значит перейти от одной картины мира к другой. Стоит отказаться от некоторых бессознательных предположений, и основные положения этой теории покажутся логичными.

В этой главе я расскажу лишь о тех постулатах и результатах теории относительности, которые непосредственно касаются природы времени. Я не буду следовать логике изложения теории, принятой в учебниках, которая связывает простые положения теории Эйнштейна с парадоксальными результатами³⁴. Мы познакомимся с двумя концепциями в СТО. Первая – *относительность понятия одновременности*. Вторая следует из первой – это *блочная Вселенная*. Каждая из этих концепций сыграла важную роль в устранении времени из физики.

При разработке СТО Эйнштейн следовал двум стратегиям решения проблемы природы времени. Во-первых, в споре о том, является время относительным или абсолютным, он принял относительную точку зрения. Время связано с переменами, значит, с восприятием соотношений. Абсолютного времени нет. В ранних работах Эйнштейн также прибегал к *операционализму*. Согласно этому подходу, единственным разумным способом определения такого количественного понятия, как время, является определение, как его измерять. Если желаете говорить о времени, вы должны сначала описать, что такое часы в вашей теории, как они работают. В рамках операционалистического подхода вы спрашиваете не о том, что реально, а что нет, а интересуетесь, что именно наблюдатель может наблюдать. Вы также должны учитывать положение наблюдателя во Вселенной, то есть где он находится и как движется. Это дает возможность спросить у различных наблюдателей – а согласны ли они между собой в том, что видят? Одно из самых интересных открытий Эйнштейна состоит в следующем: наблюдатели могут расходиться во мнениях.

А как насчет реальности? Разве физиков интересует, что реально, в меньшей степени, чем то, что наблюдаемо? Да, большинство сторонников операционализма верят в реальность и полагают, что единственный способ испытать эту реальность в ощущении состоит в наблюдении. Проверка на реальность заключается в том, чтобы все наблюдатели пришли к единому мнению.

Великое открытие, которое Эйнштейн сделал в СТО касательно понятия времени, связано с *относительностью одновременности*. Будут ли два события, отдаленные друг от друга, рассматриваться как происходящие в одно и то же время? Эйнштейн обнаружил, что

³³ *On the Electrodynamics of Moving Bodies* // Ann. der Phys. 17 (10): 891–921; *Does the Inertia of a Body Depend upon Its Energy Content?* // Ann. der Phys. 18: 639–641 (1905).

³⁴ Также см.: www.timereborn.com.

для удаленных друг от друга в пространстве событий отмечается неопределенность касательно понятия одновременности. Наблюдатели, находящиеся в движении друг относительно друга, могут прийти к разным выводам, являются два события одновременными или нет.

Для женщины, проснувшейся в Торонто, совершенно естественно поинтересоваться тем, что ее любовник делает в тот же момент в Сингапуре. Если этот вопрос имеет смысл, должен иметь смысл и вопрос, что происходит в этот момент на Плутоне, в туманности Андромеды или еще где бы то ни было во Вселенной. Эйнштейн показал, что, несмотря на то, что нам подсказывает интуиция, бессмысленно говорить о том, что происходит прямо сейчас. Два наблюдателя, перемещающиеся друг относительно друга, разойдутся во мнениях, являются ли два далеких события одновременными.

Относительность одновременности зависит от ряда предположений. Одно из них таково: скорость света универсальна. Это означает, что любой из двух наблюдателей, пожелавших измерить скорость фотона, получит один и тот же результат вне зависимости от того, как они движутся относительно друг друга или относительно фотона. Мы также можем предположить, что ничто не может перемещаться со скоростью большей, чем универсальная скорость фотона³⁵. Поэтому одно событие может повлиять на другое, лишь если они могут обменяться сигналом, распространяющимся со скоростью света либо медленнее. В этом случае мы скажем, что два события причинно связаны, то есть первое событие может являться причиной второго.

Но два события могут произойти настолько далеко друг от друга в пространстве и так близко во времени, что сигнал не успеет дойти. Ни одно из двух событий не может быть причиной другого. Два события не взаимосвязаны. Эйнштейн показал, что в таких случаях невозможно указать, произошли они одновременно или поочередно. Оба варианта ответа будут верны – в зависимости от движения наблюдателей и, соответственно, часов, с помощью которых они измеряют время.

Наблюдателям важно договориться о порядке причинно-связанных событий, чтобы избежать путаницы в отношении определения причины. Но нет причин договариваться о порядке возникновения событий, которые, возможно, не влияют друг на друга. В СТО наблюдатели не могут прийти к согласию.

Так что женщине в Торонто нет смысла интересоваться тем, что ее любовник в Сингапуре делает *сию секунду* ³⁶, но есть смысл поинтересоваться тем, что он делал несколько секунд назад. Этих секунд более чем достаточно для того, чтобы он успел отправить ей эс-эм-эс. Отправка эс-эм-эс и его прочтение – пример причинно-связанных событий. Все наблюдатели согласятся с тем, что сообщение, которое он посылает, изменит ее жизнь.

Кроме существования универсального ограничения скорости, насчет которого все наблюдатели между собой согласны, СТО зависит еще от одной гипотезы. Это сам *принцип относительности* : любая скорость, кроме скорости света, – сугубо относительная величина, и нет способа определить, какой наблюдатель находится в движении, а какой покоится. Предположим, два наблюдателя движутся друг навстречу другу, каждый с постоянной скоростью. Согласно принципу относительности, каждый может обоснованно объявить себя находящимся в покое и объяснить сближение перемещением второго.

Таким образом, нет верного ответа на вопросы, о которых наблюдатели не могут прийти к единому мнению, например, являются ли два события, отдаленные друг от друга,

³⁵ Скорость света в природе не обязательно максимальна.

³⁶ Это не то же самое, как если бы имелся факт одновременности двух событий, но узнать о нем было бы невозможно. Поскольку разные наблюдатели разойдутся во мнениях о том, одновременны ли два события, бессмысленно говорить, являются ли они таковыми или нет.

одновременными. Следовательно, ничто не может быть объективно одновременным, а понятие “сейчас” не имеет смысла. Относительность одновременности стала ударом по понятию времени как чему-либо реальному.

То, о чем наблюдатели могут согласиться, можно назвать *причинно-следственной структурой*. Выберите любые два события в истории Вселенной и обозначьте их X и Y . Один из трех вариантов будет истинным. Либо X может быть причиной Y , либо Y может быть причиной X , либо ни один из них не может быть причиной второго. Эти причинно-следственные связи и есть то, насчет чего согласятся все наблюдатели. Причинно-следственная структура – это список всех отношений для всех событий во Вселенной. Таким образом, физическая реальность в истории Вселенной включает ее причинно-следственную структуру.

В этой картине мира время отсутствует, потому что она относится ко всей истории Вселенной разом. Нет выделенного момента времени, нет определения, какое сейчас время во Вселенной, нет отсылки вообще ни к чему, соответствующему нашему ощущению настоящего момента. Не имеют смысла “будущее”, “прошлое” и “настоящее”.

Если вы удалите из описания СТО природы все, что может вызвать разногласия у наблюдателей, в ней останется лишь причинно-следственная структура. А так как это единственное, что не зависит от наблюдателя, то, если теория верна, это и есть физическая реальность. Следовательно, в той степени, в которой СТО основана на истинных законах мироздания, Вселенная не обладает временем. Время не играет никакой роли по двум причинам: нет ничего, соответствующего переживанию момента, и наиболее полным описанием истории является одновременное представление всех причинно-следственных связей. Эта картина истории на языке причинно-следственных связей созвучна представлениям Лейбница о Вселенной, согласно которым время полностью определяется соотношением между событиями. Причинно-следственные отношения – вот единственная реальность, соответствующая времени.

Есть еще один аспект, в отношении которого соглашаются все наблюдатели. Рассмотрим свободно парящие в пространстве физические часы, которые отмеряют секунды. Часы пробили полдень, а минутой позднее – минуту пополудни. Первое событие можно считать причиной второго. Между ними часы тикали 60 раз. То, сколько раз он тикали между двумя событиями – это и есть информация, о которой все наблюдатели придут к единому мнению независимо от их относительного движения. Это *собственное время* ³⁷.

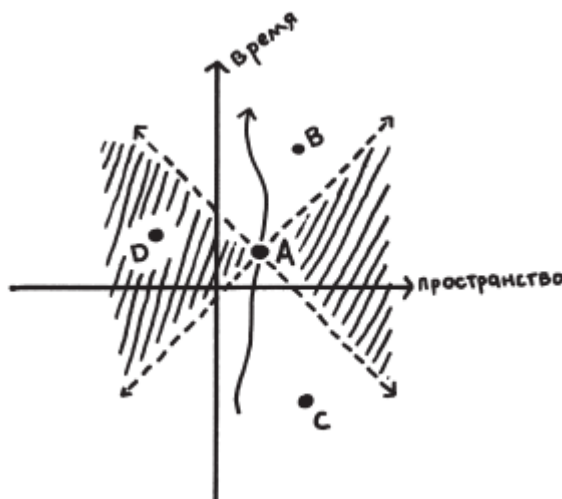
Картина истории Вселенной, представленной как одна система событий, связанных причинно-следственными отношениями, называется *блочной Вселенной*. Это название, возможно, объясняется тем, что оно предполагает реальной всю историю Вселенной сразу, массивом, вызывая аллюзию с каменным блоком, из которого можно вырезать нечто твердое, неизменное.

Блочная Вселенная – это кульминация развития идеи, первоначально высказанной Галилеем и Декартом: рассматривать время как дополнительное измерение пространства. Это сводит описание истории Вселенной к математическому объекту (см. главу 1) вне времени. Если вы считаете, что это соответствует объективно реальному, то вы утверждаете, что во Вселенной принципиально отсутствует время. Блочная картина является вторым шагом к устранению понятия времени в СТО Эйнштейна.

В блочной Вселенной пространство и время едины. Это можно изобразить в виде пространства-времени, в котором к трем измерениям пространства добавляется четвертое

³⁷ Это не значит, что все часы тикают одинаковое количество раз между двумя событиями. Рассмотрим двое движущихся часов, пролетающих друг мимо друга, когда на тех и на других 12.00. Теперь одни часы ускоряются и летят в обратную сторону, минув вторые в 12.01. Часы, перемещавшиеся с ускорением, покажут другое время. Но все наблюдатели согласятся о том, сколько конкретные часы протикали между событиями. Те часы, которые перемещались без ускорения, протикают между событиями больше раз. Они отличаются от остальных. Время, отмеряемое такими часами, мы называем собственным.

измерение – для времени (рис. 10). Событие, происходящее в определенный момент времени, характеризуется как точка в пространстве-времени, а история частицы в пространстве-времени представляется кривой, называемой *мировой линией*. Таким образом, время категоризируется геометрией, и мы говорим, что время стало пространственным или геометрическим. Физические законы также представлены геометрически, например мировые линии свободных частиц являются прямыми линиями в пространстве-времени. Линия фотона имеет наклон 45° (что соответствует измерению пространства в единицах времени, как мы обычно делаем, когда говорим о световых годах). Любая обычная частица должна перемещаться медленнее, чем фотон, следовательно, ее мировая линия будет располагаться под более крутым углом.



B – будущее относительно *A*.

C – прошлое относительно *A*.

D причинно не связано с *A*.

*Рис. 10. Пространственно-временная картина блочной Вселенной. Пространство-время с одним пространственным измерением и одним временным измерением. Мы выбрали единицы измерения времени и пространства так, чтобы лучи света располагались под углом 45° . Причинно-следственная структура тогда определяется геометрически. Два события могут быть причинно-связанными, если они лежат на линии под углом 45° или круче. Мы видим мировую линию частицы, идущую от прошлого к будущему через событие *A*. Показаны также два луча света, проходящие через точку *A*. Заштрихованная область содержит события, которые причинно не связаны с *A*.*

Это элегантное геометрическое представление СТО предложил в 1909 году Герман Минковский, один из преподавателей, обучавших Эйнштейна математике. В нем каждый физический факт движения представляется в виде теоремы о геометрии пространства-времени. То, что мы называем пространством Минковского, стало решающим шагом к ликвидации понятия времени, потому что убедительно доказывало: любое движение во времени может быть переведено на язык теоремы о вневременной геометрии. По словам Германа Вейля, одного из крупнейших математиков XX века, “в объективном мире просто ничего не происходит. Лишь в моем сознании... мир оживает как мимолетный образ пространства, которое постоянно меняется во времени”³⁸.

Чтобы проиллюстрировать мощь блочной картины, можно привести следующий философский довод в ее пользу. Он зависит лишь от относительности одновременности. Давайте для начала согласимся с тем, что настоящее реально. Мы не можем быть уверены,

³⁸ Weyl, Hermann *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1949.

что будущее или прошлое также реальны (смысл как раз в том, чтобы выяснить, насколько они реальны), но мы не сомневаемся, что настоящее реально. Оно складывается из множества событий, ни одно из которых не реальнее остальных. Мы не знаем, являются ли два события в будущем реальными, но согласимся с тем, что если два события происходят в одно и то же время, они реальны в равной степени, независимо от того, происходят ли они в настоящем, прошлом или в будущем.

Если мы операционалисты, то должны говорить лишь о том, что видят наблюдатели. Поэтому мы утверждаем, что *два события одинаково реальны, если они, по мнению некоторых наблюдателей, происходят одновременно*. Мы также будем предполагать, что быть в равной степени реальным является транзитивным свойством. То есть если A и B , B и C в равной степени реальны, то A и C в равной степени реальны. Этот довод опирается на факт, что в СТО настоящее время зависит от наблюдателя. Выберите любые два события в истории Вселенной, одно из которых (A) является причиной второго (B). Всегда существует событие X , которое обладает следующим свойством. Предположим, наблюдатель Мария видит, что события A и X происходят одновременно. Второй наблюдатель, Фредди, видит X одновременно с B (рис. 11).

Чтобы понять, почему событие X должно существовать, необходимо знать не только то, что одновременность относительна, но и что она относительна настолько, насколько это возможно. Одно из следствий постулатов Эйнштейна заключается в том, что если два события с точки зрения некоторых наблюдателей происходят одновременно, для всех остальных эти два события не являются причинно-связанными. Верно и обратное: если два события не связаны причиной, найдется наблюдатель, который видит их как синхронные. Таким образом, относительная одновременность является относительной настолько, насколько это возможно, но при условии сохранения причинно-следственных связей.

Если B – далекое будущее относительно A , то X должно быть достаточно далеко и от A , и от B , так что световой сигнал не успел бы пройти расстояние от X до A либо от X до B . Это не является проблемой, так как Вселенная, описанная Минковским, бесконечна³⁹.

Мы можем рассуждать так. Согласно принятому нами критерию, событие A столь же реально, как X . Но B столь же реально, как X . Поэтому A и B одинаково реальны. A и B – любые причинно-связанные события в истории Вселенной. Так, если в каком-то смысле одно событие во Вселенной реально, эта реальность справедлива и для всех остальных событий. Поэтому нет разницы между настоящим, прошлым и будущим. Реальность – это совокупность всех событий во Вселенной, взятых одномоментно вместе. Нет никакой реальности в отдельных моментах времени или в их потоке.

Забавно, что в рамках блочной картины Вселенной нужно лишь верить, что настоящее реально. Рассуждения, приведенные выше, заставляют поверить, что прошлое и будущее столь же реальны, как настоящее. Но если нет различия между настоящим, прошлым и будущим, если рождение Земли или рождение моей праправнучки так же реальны, как тот момент, когда я пишу эти слова, настоящее время не имеет особых привилегий реальности, и реальна вообще вся история Вселенной.

³⁹ Если Вселенная пространственно ограничена, вы можете получить тот же результат, используя несколько промежуточных X . Предположение о бесконечности пространства-времени Минковского помогает придать аргументу элегантность, но не является принципиальным.

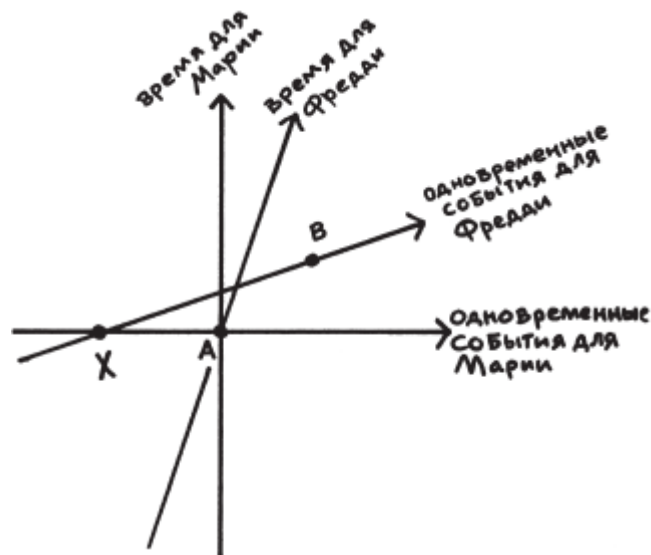


Рис. 11. Довод в пользу блочной модели Вселенной, основанный на одновременности. Для любых двух причинно связанных событий *A* и *B* всегда есть событие *X*, которое одним наблюдателем может интерпретироваться как одновременное с *A*, а другим – как одновременное с *B*.

Современный философ Хилари Патнэм высказался на этот счет так:

Проблема реальности и предопределенности будущих событий решена. Кроме того, она решена в физике, а не в философии... Не думаю, что в философии еще существует проблема времени. Существуют лишь физические проблемы определения точной физической геометрии четырехмерного континуума, который мы населяем⁴⁰.

Блочная картина Вселенной называется также *этернализмом*. На эту тему есть обширная философская литература. Одним из обсуждаемых там вопросов является согласованность указанной концепции со сложившимся у нас образом времени. Мы часто говорим: “сейчас”, “будущее”, “прошлое”. Имеют ли эти слова смысл, если реальность состоит в одномоментном взгляде на всю историю мира? Что мы подразумеваем, когда говорим: “Сейчас я в поезде в туннеле под Ла-Маншем”, если настоящее не реальнее любого другого момента времени?

Концепция *компатибилизма* предполагает, что с обыденным языком нет никаких проблем, пока мы понимаем слова наподобие “сейчас” и “завтра” как обозначающие точку зрения, дающую непосредственный доступ к некоторым фактам о вневременной реальности и делающую доступ к другим фактам затруднительным. Мы с легкостью произносим “здесь” и “там”, верим в то, что и близкие, и далекие объекты одинаково реальны. Поэтому некоторые философы утверждают, что “сейчас” и “будущее” на самом деле не очень отличаются от “здесь” и “там”, что те и другие обозначают определенную перспективу и относятся к тому, что мы видим вокруг, но не влияют на то, что реально. Когда я говорю “сейчас”, я не имею в виду, что “сейчас” – это нечто особенное, а лишь описываю мир таким, каким вижу. Из подтекста всегда ясно, о каком “сейчас” я говорю, и мой собеседник понимает это.

Это прекрасно, но имеет значение, лишь если блочная Вселенная есть верное описание природы. Некоторые философы в этом сомневаются. Так, Джон Р. Лукас пишет: “Блочная Вселенная дает глубоко неадекватный взгляд на время. При этом не учитывается течение времени, выделенное положение настоящего времени, направленность времени и различие

⁴⁰ Putnam, Hilary *Time and Physical Geometry* // Jour. Phil. 64: 240–247 (1967).

между прошлым и будущим”⁴¹.

В моей книге я привожу доводы, относящиеся к этому спору. Я привожу их не так, как любят делать философы, нередко связывающие их с лингвистическим анализом. Я исхожу из физических посылок, и одна из них гласит, что СТО может быть применена ко всей истории Вселенной. Однако СТО не может быть применена ко всей Вселенной, потому что неполна (она, в частности, не учитывает гравитацию). В лучшем случае она может быть лишь приближением к теории с гравитацией. Проблема расширения теории относительности и включения в нее гравитации была решена в рамках общей теории относительности (ОТО). Работа над ней заняла у Эйнштейна десять лет. Однако интересные с философской точки зрения элементы СТО уже распространяются на ОТО. Относительность одновременности остается верной. Поэтому философский аргумент, который я только что изложил, остается в силе и приводит к выводу: единственная реальность – это вся история Вселенной, целостная и одномоментная.

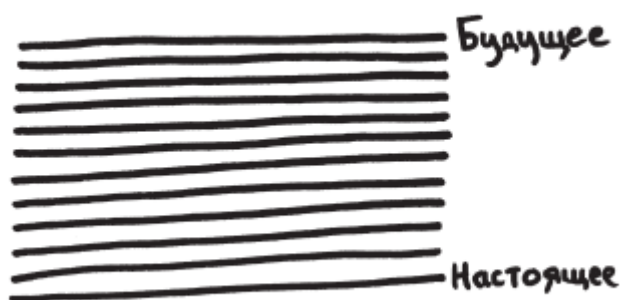
В ОТО осталось положение о том, что не зависящая от наблюдателя информация сводится к причинно-следственной структуре Вселенной и собственному времени. Если история Вселенной описывается на языке ОТО, блочная картина сохраняется.

ОТО не только сохраняет элементы СТО, утверждая, что время нереально, но и вводит новые элементы, приводящие к следующим выводам. Во-первых, есть немало способов разделения пространства-времени на пространство и время (рис. 12). Вы можете определить время с помощью сети часов, распределенных по Вселенной, но часы в различных местах могут идти с разной скоростью. То есть получается, что в ОТО время может быть неоднородным. Во-вторых, геометрия пространства и пространства-времени перестает быть простой, или регулярной. Она становится более общей, как любая криволинейная поверхность по отношению к плоской или сферической. Геометрия становится динамической. В такой геометрии пространства-времени распространяются гравитационные волны. Черные дыры могут формироваться и вращаться друг вокруг друга. Конфигурация мира больше не определяется лишь расположением частиц в пространстве, а включает в себя геометрию пространства как такового.

Но что геометрия пространства и пространства-времени имеет общего с гравитацией? ОТО основана на самой простой из научных идей: падение тел – естественное их состояние.

⁴¹ Lucas, John Randolph *The Future*. Oxford, U. K.: Blackwell, 1990. P. 8.

"Обычное" время



Время с точки зрения ОТО



Рис. 12. Мы противопоставляем привычное представление о времени более произвольному понятию времени в ОТО. Обычно мы думаем, что время везде идет с одной и той же скоростью. Так, поверхности одновременных событий расположены с равными интервалами (в верхней части рисунка). В ОТО время может измеряться в каждой точке разными часами, каждые из которых идут сколь угодно быстро по сравнению с другими до тех пор, пока поверхности равного времени причинно не связаны друг с другом. Мы называем это свободой для времени принимать складчатую структуру (в нижней части рисунка).

Великие революции в физике изменяют наши представления о том, что такое *естественное движение* (то есть такое, которое не нуждается в объяснении). Для Аристотеля естественным движением было состояние покоя по отношению к центру Земли. Любое другое движение было неестественным, *насильственным*, и его необходимо было объяснить, например, силой, действующей на тело и заставляющей его двигаться. Для Галилея и Ньютона естественным было движение по прямой с постоянной скоростью, и привлечение силы требовалось только тогда, когда скорость или направление движения менялось (*ускорение*). Вот почему вы не чувствуете движения в самолете или поезде, пока они движутся без ускорения.

Но если движение относительно, спросите вы, то разве важно, относительно чего ускоряются самолет или поезд? Да, это важно: другие наблюдатели тоже перемещаются без ускорения. Тавтология? Нет, если оговориться, что существует большой класс наблюдателей, которые не чувствуют движения, и объединяет их то, что все они движутся с постоянными скоростью и направлением один по отношению к другому. Такие наблюдатели называются *инерциальными*, и законы Ньютона определяются по отношению к ним. Первый закон Ньютона гласит: свободные частицы (то есть нет действующих на них сил) перемещаются относительно инерциальных наблюдателей с постоянной скоростью и в неизменном направлении.

Это, кстати, объясняет, почему важно, вращается Солнце вокруг Земли или наоборот. По отношению к любым инерциальным наблюдателям направление движения Земли постоянно меняется, так как она вращается вокруг Солнца. Это ускорение объясняется гравитационным влиянием Солнца.

Для Ньютона сила притяжения была такой же силой, как и другие. Эйнштейн, однако, понял, что есть нечто особенное в движении, вызванном силой притяжения: все тела падают с одинаковым ускорением независимо от их массы или других свойств. Это следствие из законов Ньютона. Ускорение тела обратно пропорционально его массе, но Ньютон утверждал, что сила притяжения, действующая на тело, пропорциональна массе тела. Поэтому эффект массы сокращается, ускорение, вызванное силой притяжения, не зависит от массы тела, и все тела падают с одинаковым ускорением.

Эйнштейн отразил естественность падения в самом красивом принципе своей теории (и физики вообще): *принципе эквивалентности сил гравитации и инерции*. Он гласит: когда вы падаете, вы не можете почувствовать движение. Ощущения, испытываемые обывателем в падающем лифте, не отличаются от ощущений космонавта, вышедшего в открытый космос. Сила, воздействие которой мы испытываем, когда сидим или стоим – не гравитация, тянущая нас вниз, а пол или стул, действующие снизу и удерживающие нас от падения. Когда я сижу за письменным столом, я двигаюсь неестественно.

Эйнштейн был гением не из-за математической сложности своей ОТО (с этой стороной его теории справится большинство нынешних математиков и физиков): ему удалось изменить наш взгляд на один из простейших аспектов бытия. Прежде, до Эйнштейна, мы думали, что ежедневно и круглосуточно испытываем действие гравитации. Эйнштейн указал, что это не так: мы ощущаем пол. Эйнштейн эту очень физическую идею с помощью своего друга, математика Марселя Гроссмана, превратил в гипотезу о геометрии мира. Гипотеза основывалась на одном из исходных геометрических понятий – прямой.

Прямая определяется в школьном курсе геометрии как путь, соединяющий две точки по кратчайшему расстоянию. Это определение применимо для маршрута самолета, но может быть распространено и на криволинейные поверхности. Представьте сферу, например, поверхность Земли. Можно подумать, что на поверхности сферы нет прямых линий, потому что поверхность искривлена, но это не так, когда мы подразумеваем под прямой путь, который ведет из одной точки в другую по кратчайшему расстоянию. Мы называем кривые, удовлетворяющие этому определению, *геодезическими*. На плоскости геодезическими являются прямые. Но когда мы имеем дело со сферой, геодезическими являются сегменты больших окружностей. Именно они являются маршрутами самолетов, совершающих полет между двумя городами по кратчайшему пути⁴².

Если траектория тел, падающих в гравитационном поле, является естественной, необходимо обобщить их на прямые линии, вдоль которых, согласно Ньютону, тела двигаются, если на них не действуют внешние силы. Но теперь у нас есть выбор: как свободные частицы движутся вдоль прямых в пространстве, так они движутся по прямой в пространстве-времени Минковского. Хотим ли мы представить гравитацию путем искривления пространства или искривления пространства-времени?

Исходя из блочной модели, ответ очевиден: изгибаться должно пространство-время. Из-за относительности одновременности различные наблюдатели расходятся во мнении о том, какие события происходят одновременно. Не существует простого, объективного, независимого от наблюдателя способа описать, как искривлено пространство.

Когда Эйнштейн выбрал для реализации своего принципа эквивалентности искривленное пространство-время, идея состояла в том, что кривизна будет передавать

⁴² В геодезии пространства-времени, в противоположность геометрии пространства, это пути, движение по которым занимает минимальное собственное время, а не кратчайшее расстояние. В такой геодезии свободно падающие часы идут быстрее, чем любые другие часы, перемещающиеся между двумя событиями. Отсюда следует: желаете оставаться молодым – ускоряйтесь.

воздействие силы притяжения так, что объекты, падающие в гравитационном поле, будут двигаться вдоль геодезических линий. Свободно падающие тела упадут на Землю не потому, что на них действует сила, а потому, что пространство-время искривлено таким образом, что геодезические направлены к центру Земли. Планеты вращаются вокруг Солнца не потому, что Солнце их притягивает, а потому, что оно своей огромной массой искривило геометрию пространства-времени, и геодезические замкнулись в орбиты.

Эйнштейн объяснил гравитацию как свойство геометрии пространства-времени. Геометрия действует на материю, направляя ее вдоль геодезических. Но прекраснее всего в теории относительности вот что: геометрия и материя взаимосвязаны. Эйнштейн утверждал, что масса является причиной искривления и что геодезические устремляются в направлении массивных тел. Он предложил уравнения, описывающие искривление пространства-времени, чтобы симитировать эффект всемирного тяготения.

Многочисленные следствия из этих уравнений с высокой точностью подтвердились наблюдениями. Уравнения Эйнштейна, в частности, описывают расширение Вселенной. Они предсказывают небольшое отличие формы орбит планет, обращающихся вокруг Солнца, и Луны, обращающейся вокруг Земли, от формы, которую предсказывает ньютонова физика (эти эффекты наблюдались). Они предсказывают, что пространство-время вокруг чрезвычайно компактных тяжелых объектов – черных дыр – столь сильно искривлено, что свет не может вырваться из их плена. Такие чрезвычайно массивные черные дыры с массой, равной массе миллионов звезд, имеются в центре большинства галактик.

Но, пожалуй, самое замечательное следствие из уравнений ОТО таково: геометрия пространства-времени искажается при прохождении через него волн. Это похоже на искажения на поверхности воды. Гравитационные волны вызваны быстрым изменением движения очень массивных тел, например, двух нейтронных звезд, вращающихся одна вокруг другой, и переносят изображение этих событий на большое расстояние. В настоящее время ученые прилагают огромные усилия для обнаружения таких волн. Это позволит оценить внутреннюю динамику коллапсирующих сверхновых, получить информацию о первых мгновениях после Большого взрыва и, возможно, даже прежде него.

Эффект гравитационных волн зарегистрирован лишь косвенно. Когда две нейтронные звезды быстро вращаются одна вокруг другой, гравитационные волны забирают часть энергии и заставляют звезды двигаться по спирали, приближаясь друг к другу. Такие спиральные траектории наблюдаются и с высокой точностью согласуются с предсказаниями ОТО.

После ОТО начались преобразования концепции пространства и времени.

В ньютоновой физике геометрия пространства определена раз и навсегда. Предполагается, что пространство трехмерно и евклидово. Неприятным моментом в ньютоновом представлении является очевидная асимметрия между пространством и материей. Пространство задает правила, согласно которым движется материя, но само не меняется. В такой картине мира отсутствует обратная связь. Ни движение материи, ни само ее существование не влияют на пространство. Пространство, кажется, будет точно таким же даже и в отсутствие материи.

Эта ситуация исправлена в ОТО, где пространство становится динамическим. Материя влияет на изменения в геометрии точно так же, как геометрия влияет на движение материи. Геометрия становится аспектом физики, как и электромагнитное поле. Уравнения Эйнштейна определяют динамику пространства-времени, как и другие гипотезы: они рассматривают свойства физических явлений и их отношения друг с другом.

Если бы геометрия пространства-времени была фиксированной, мы сказали бы, что пространство и время абсолютны: лишь детали отличаются от ньютоновой концепции пространства вне времени. Гипотеза о том, что геометрия пространства динамична и зависит от распределения материи, подтверждает мысль Лейбница об относительности пространства и времени.

Эйнштейн в своей формулировке реляционной теории пространства и времени следовал Эрнсту Маху. *Принцип Маха* гласит: есть лишь относительное движение, и если мы вертимся и у нас кружится голова, то это оттого, что мы вращаемся относительно далеких галактик. Отсюда следует, что мы испытывали бы головокружение, если бы стояли на месте, а вся Вселенная вращалась вокруг нас.

Несмотря на свою радикальность, ОТО вписывается в рамки ньютоновой парадигмы. Существует множество возможных конфигураций геометрии и материи. При заданных начальных условиях уравнения Эйнштейна определяют всю дальнейшую геометрию пространства-времени и всего, что в нем находится, включая вещество и излучения.

Вся история мира в ОТО остается математическим объектом. Пространство-время в ОТО – гораздо более сложный математический объект, чем в трехмерном евклидовом пространстве теории Ньютона. Но, как и в блочной картине, оно вне времени, в нем нет различия между будущим и прошлым, и наше понимание настоящего не играет никакой роли.

ОТО нанесла еще один удар по времени как фундаментальному физическому понятию. Мы считаем, что время является реальным и фундаментальным понятием и, значит, не может иметь начала. Если время имеет начало, то его происхождение должно быть объяснено через то, что не является временем. А если так, оно непринципиально и должно вытекать из чего-то более фундаментального. Но в любой правдоподобной модели Вселенной, описанной с помощью уравнений ОТО, у времени всегда есть начало.

В 1916 году, в год публикации ОТО, Эйнштейн применил ее для описания Вселенной. Он предполагал, что Вселенная конечна в объеме, но, подобно поверхности сферы, не имеет границ. Это стало важным шагом к пониманию мира: впервые Вселенная рассматривалась как замкнутая и конечная система. Несмотря на то, что Вселенная велика, нет способа выйти за ее пределы. Выражение “за пределами Вселенной” бессмысленно.

Эйнштейн должен был предполагать, что в замкнутой Вселенной любые часы находятся внутри системы. С позиций его теории неважно, какие часы использованы для измерения времени и какие устройства – для измерения пространства. Новая теория не привязана к измерениям, проведенным с помощью специальных часов вне системы⁴³. Избавляя от необходимости иметь часы за пределами системы, ОТО делает шаг в направлении относительности в физической теории. Но она по-прежнему основана на ньютоновой парадигме вечных законов, действующих во вневременном пространстве.

Сначала Эйнштейн стремился создать модель Вселенной, которая была не только конечна в пространстве, но вечна и неизменна во времени. Проблема заключалась в том, что силы гравитации всегда действуют на тела, стремясь собрать их вместе. Это означает, что гравитация действует на всю Вселенную, вызывая ее сжатие. Если Вселенная расширяется, гравитация будет замедлять расширение. Если Вселенная не расширяется и не сжимается, сила притяжения приведет к сжатию. Эйнштейн, таким образом, мог предсказать, что Вселенная должна изменяться во времени: либо расширяться, либо сжиматься. Вместо этого он изменил свою теорию, пытаясь удержать Вселенную в статическом равновесии, и, таким образом, сделал другое неожиданное открытие, которое лишь недавно получило экспериментальное подтверждение. Эйнштейн изменил уравнения, добавив в них член, работающий против сил гравитации и заставляющий Вселенную расширяться. В результате появилась новая константа, представляющая собой энергетическую плотность пустого

⁴³ Название этого свойства – *общая инвариантность координат*. Оно тесно связано с другим свойством – *диффеоморфизмом*. Механику Ньютона также можно сформулировать так, что часы становятся частью системы, и есть полная свобода определять их. Такая формулировка разработана Джулианом Барбуром совместно с Бруно Бертоtti. В ее рамках ньютонова парадигма принимает реляционный характер, но по-прежнему основывается на неизменных законах, действующих во вневременном конфигурационном пространстве.

пространства. Эйнштейн назвал ее *космологической постоянной*. Сегодня есть достаточно доказательств того, что Вселенная расширяется, и расширение Вселенной происходит с ускорением. Более общим названием причины ускоренного расширения является термин *темная энергия*, но если ее плотность постоянна во времени и пространстве, она может быть описана космологической постоянной Эйнштейна. До сих пор все наблюдения находятся в согласии с этой гипотезой, но некоторые космологические сценарии требуют, чтобы величина темной энергии менялась.

Не думаю, что Эйнштейн предполагал, будто величина этой константы когда-либо будет измерена, но ее все же удалось измерить. Она имеет невероятно крошечную величину и при этом вызывает колоссальные последствия. Эффект суммируется по всей Вселенной. Таким образом, во Вселенной две противодействующие силы: гравитация, вызывающая сжатие, и космологическая постоянная, ускоряющая расширение.

Эйнштейн предложил статическую модель Вселенной, в которой эти силы точно сбалансированы. Но у такой модели проблема: баланс нестабилен. При малейшем возмущении Вселенной одна из тенденций возьмет верх, так что Вселенная должна либо вечно расширяться, либо сжиматься. Вселенная наполнена движущимися звездами, черными дырами и гравитационными волнами. Этого достаточно, чтобы навсегда нарушить баланс сил.

Итак, Вселенная должна иметь историю. Она может расширяться и сжиматься, но не может оставаться стабильной. В 20-х годах XX века несколько астрономов и физиков нашли решение уравнения ОТО, описывающее расширение Вселенной. Им повезло, потому что к 1927 году астроном Эдвин П. Хаббл обнаружил доказательства того, что Вселенная расширяется и, следовательно, должна иметь начало. И действительно, каждое из этих новых нестабильных решений подразумевает существование первого момента времени. Эта модель Вселенной связана с именами Александра Фридмана, Жоржа Леметра, Г. П. Робертсона, Артура Уокера и названа в их честь. Это очень простая модель, предполагающая, что Вселенная однородна в пространстве: в любой ее точке плотность материи и плотность излучения, соответственно, принимают одни и те же значения. В момент рождения Вселенной Фридмана – Леметра – Робертсона – Уокера плотности вещества и излучения и сила гравитационного поля принимают бесконечные значения и представляют собой начальную сингулярность. В этот момент ОТО перестает работать, потому что уравнения перестают описывать эволюцию Вселенной.

Большинство физиков считает, что уравнения Эйнштейна перестают быть применимы, потому что изучаемые модели слишком просты. Они утверждают: если учесть, что во Вселенной могут существовать локальные особенности, такие как звезды, галактики и гравитационные волны, то сингулярность была бы устранена и вы могли бы продолжить экстраполировать время назад за эту точку. Эту гипотезу было трудно подтвердить или опровергнуть, потому что до изобретения суперкомпьютеров было невозможно в полной мере изучить общие решения уравнений теории Эйнштейна. В конце концов эта гипотеза оказалась неверна. В 60-х годах Стивен Хокинг и Роджер Пенроуз доказали теорему о том, что существуют особенности во всех решениях уравнений ОТО, которые могут быть применимы к описанию нашей Вселенной.

Если ОТО верна, нельзя не прийти к заключению, что время не может быть фундаментальным. В противном случае придется отвечать на ряд трудных вопросов, например, что было до того, как начался отсчет времени, из чего родилась Вселенная? А если законы вечны, то какими они были прежде, чем возникла Вселенная, которая управляется ими? Очевидно, что прежде возникновения Вселенной не было никакого времени, а это означает, что законы природы более фундаментальны, чем время.

В одних из этих решений ход времени, однажды начавшись, будет продолжаться вечно, пока Вселенная расширяется. В других решениях Вселенная достигает максимального расширения и затем сжимается в точку (Большое сжатие), где многие наблюдаемые величины снова становятся бесконечными. Такие решения описывают Вселенные, в которых

время имеет конец. Запуск и остановка времени не являются проблемой в блочной модели, в которой история Вселенной – единое целое вне времени.

В этой картине мира реальность не страдает, если время начинается или заканчивается. Тот факт, что решения уравнений ОТО предполагают момент начала, укрепляет позиции блочной модели: он ослабляет доводы в пользу времени как понятия более фундаментального, чем законы природы.

Итак, мы совершили экскурс в историю устранения времени из физической картины мира. Как Галилей и Декарт, мы начали с фиксации движения и времени с помощью метода построения графиков, в которых время представлено в качестве координатной оси измерения пространства. В теории относительности эти графики стали основой построения пространства-времени, вневременной картины истории Вселенной, в которой настоящее не соответствует ничему реальному. Вследствие относительности одновременности мы не можем отделить время от пространства. Мы можем лишь описать Вселенную в виде блочной модели. С СТО и ОТО, предсказания которых подтверждены экспериментально, физики получили основания принять картину реальности, в которой времени нет.

Глава 7

Квантовая космология и конец времени

После первого семестра в колледже я приехал на рождественские каникулы в Нью-Йорк и остановился у двоюродной сестры в Гринвич-виллидже. Утром я отправился на метро на свою первую конференцию по физике, громко называвшуюся “VI Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике”. Конференция проходила в одном из шикарных отелей Манхэттена. Меня туда, конечно, не звали (и не припоминаю, чтобы я регистрировался): просто мой профессор физики Герб Бернштейн посоветовал туда заглянуть. Разумеется, я никого не знал, но мне повезло. Я познакомился с Кипом Торном из Калифорнийского технологического института (он порекомендовал мне для ознакомления с общей теорией относительности учебник, который сам недавно написал вместе с Чарльзом Мизнером и Джоном А. Уилером)⁴⁴, а также с Лейном Хьюстоном, молодым американцем-математиком, учившимся в Оксфорде. Хьюстон долго пытался объяснить мне новейшую теорию твисторов, а после представил меня ее автору – Роджеру Пенроузу.

На одной из сессий я пристроился в проходе. Мимо проехал человек в инвалидной коляске. Стивен Хокинг был уже знаменит своими работами по ОТО, а еще год спустя он сделал открытие, что черные дыры – горячие. С Хокингом остановился поболтать высокий бородатый мужчина с хорошими манерами. Затем его (а это был Брайс С. Девитт) вызвали делать доклад. Не помню, о чем говорил Девитт, но я уже слышал о нем и его уравнениях, описывающих квантовые Вселенные. У меня не хватило смелости подойти. И уж конечно я не думал, что 7 лет спустя, когда я закончу кандидатскую, эти два гиганта современной физики пригласят меня работать с ними.

Девитт, Уилер, Мизнер и Хокинг стали первооткрывателями квантовой космологии, связавшей ОТО с квантовой физикой. Квантовая космология – это последняя вершина, на которую нам предстоит подняться. В описанной Девиттом, Уилером, Мизнером и Хокингом Вселенной нет времени. Квантовый космос не развивается и не меняется, не расширяется и не сжимается: он просто-напросто есть.

Следует подчеркнуть, что квантовая космология в высшей степени спекулятивная область теоретической физики, и пока она не располагает надежными экспериментальными подтверждениями. Ей не хватает весомости теории относительности, многократно подтвержденной экспериментами и продолжающей удивлять точностью своих предсказаний.

⁴⁴ Misner, Charles W., Thorne, Kip S., and John Archibald Wheeler *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman, 1973.

Начнем с квантовой механики. Для начала придется объяснить, как в квантовой механике моделируются подсистемы Вселенной. Чтобы получить квантовую теорию гравитации, мы должны объединить квантовую механику с ОТО. Есть разные подходы, и, хотя известно, как сформулировать такую теорию, эксперименты пока не позволяют определить, какой подход удачнее. Поэтому сразу перейдем к включению всей Вселенной в квантовую теорию. Результатом этого явится вневременная картина природы.

Квантовая механика успешно описывает микроскопические системы вроде атомов и молекул. Но неясно вот что. После неоднократных попыток уяснить смысл квантовой механики сложилось несколько ее интерпретаций, сильно друг от друга отличающихся (в том числе и по отношению к вопросу о времени) и по-разному отвечающих на вопрос, применима ли квантовая теория ко всей Вселенной. Это в высшей степени важные проблемы⁴⁵.

Мне кажется, объяснение квантовой механики следует начать с вопроса, для чего нужна наука. Многие думают, что ее цель – описывать природу, предложить картину мира, которая была бы истинной даже в случае, если бы нас не было. И если вы тоже так считаете, квантовая механика вас разочарует: она не дает картину того, что происходит в каждом эксперименте.

Нильс Бор, один из основоположников квантовой теории, утверждал, что такие люди неверно представляют себе, что такое наука. Проблема не в теории, а в том, чего мы ожидаем от нее. Бор объявил, что теория должна не описывать природу, а давать правила работы с ее объектами и язык, на котором мы можем изложить результаты.

Язык квантовой теории предполагает активное вмешательство в природу. Он описывает, как экспериментатор ставит опыты с микроскопическими системами. Экспериментатор может изолировать систему и подготовить ее; преобразовать систему, подвергая ее внешним воздействиям; измерить систему путем внедрения в нее устройств, позволяющих считывать ответы на вопросы, которые он, возможно, хотел бы задать системе. Математический язык квантовой механики описывает каждый шаг подготовки, преобразования и измерения. Из-за особого внимания к манипуляциям с системой этот подход к квантовой физике можно назвать операциональным.

Центральным математическим понятием в квантовом описании системы является *квантовое состояние*. Оно содержит всю информацию, которую наблюдатель может узнать о квантовой системе в результате ее подготовки и измерения. Эта информация ограничена и в большинстве случаев не позволяет достаточно точно сказать, где находятся образующие систему частицы. Квантовое состояние – это *вероятное* положение частиц, если бы мы взялись измерить их положение.

Рассмотрим атом, состоящий из ядра и нескольких электронов. Наиболее точное описание атома включало бы информацию о положении каждого электрона. Совокупность расположения электронов представляет собой конфигурацию. В квантовой механике лучшим является описание, которое вместо этого дает вероятность для каждой возможной конфигурации, в каковой могут быть обнаружены электроны⁴⁶.

Как проверить предсказания теории, если они имеют вероятностный характер? Например, мы подбрасываем монету и желаем проверить следующее предсказание: орел выпадет в 50 % случаев. Для этого недостаточно бросить монету один раз: результатом – в

⁴⁵ Подробнее см. сайт.

⁴⁶ Вероятность квантового состояния вычисляется в два этапа. На первом шаге квантовое состояние может быть представлено числом для каждой возможной конфигурации. Такое число называется *амплитудой конфигурации*. На втором шаге вы возводите амплитуду в квадрат, чтобы получить вероятность того, что система будет находиться в такой конфигурации. Почему необходимы эти два действия? Амплитуда – комплексное число, комбинация двух простых действительных чисел. Эта кодировка позволяет вычислить вероятность для других свойств (например импульс) системы, находящейся в том же квантовом состоянии.

соответствии с предсказанием – окажется либо орел, либо решка. Необходимо многократно подбросить монету и записать, в скольких случаях выпал орел. По мере того, как вы бросаете монету, доля выпадения орла будет стремиться к 50 %. То же и с вероятностными прогнозами квантовой механики: чтобы их подтвердить, необходимо многократно повторить эксперимент⁴⁷. Однократное измерение квантовой системы сродни подбрасыванию монеты: любой результат согласуется с предсказанием теории.

Этот метод имеет смысл лишь применительно к маленькой замкнутой системе, например к атому водорода. Чтобы проверить предсказания, нам необходимо иметь большое количество идентичных копий системы. Если у нас лишь одна система, мы не можем проверить предсказания: они ведь вероятностные. Кроме того, мы должны уметь работать с коллекцией копий: сначала приводить их в интересующее нас квантовое состояние, а после осуществлять измерение. Но если у нас много копий системы, то каждая из них представляет собой малую часть всего сущего. При этом инструменты и оси координат, которыми мы пользуемся для измерения конфигураций системы, не являются ее частью.

Поэтому применение квантовой механики, очевидно, ограничивается замкнутыми системами. Это расширение ньютоновой парадигмы – физики “в ящике”. Чтобы убедиться в том, что метод квантовой механики основан на изучении замкнутых систем, рассмотрим, как квантовая механика описывает изменение времени.

Законы ньютоновой физики – детерминистические, и способность теории к прогнозам о том, как система изменяется со временем, ограничена. Аналогично, закон квантовой механики определяет, как со временем меняется квантовое состояние системы. Этот закон также детерминистический, поскольку при заданном начальном квантовом состоянии вы можете точно предсказать квантовое состояние системы в будущем.

Закон эволюции квантовых состояний выражается *уравнением Шредингера*. Он работает, как и законы Ньютона, однако описывает, как изменяется со временем состояние частиц, а не их положение. Если определить начальное квантовое состояние, уравнение Шредингера позволит узнать, какое квантовое состояние наступит в любой момент в будущем.

Как и в ньютоновой физике, наблюдатель, часы и инструменты измерения должны пребывать вне системы. При этом, хотя эволюция квантовых состояний детерминирована, конфигурация атомов лишь вероятностна: сама связь квантового состояния и конфигурации системы носит вероятностный характер.

Требование квантовой механики об исключении из системы часов приобретает особенное значение, если мы пытаемся применить квантовую теорию к Вселенной в целом. По определению, ничто (и часы тоже) не может находиться вне Вселенной. А как квантовое состояние Вселенной изменяется по отношению к часам за пределами Вселенной? Поскольку таких часов нет, единственный ответ гласит: оно не меняется. Квантовое состояние Вселенной, если смотреть с точки зрения мифического наблюдателя за пределами Вселенной, застыло.

Это, правда, скорее риторика, которая, как может показаться, может привести к ошибке. Однако математика дает нам тот же результат. Когда мы применяем уравнение Шредингера, квантовое состояние Вселенной во времени не изменяется.

В квантовой теории изменение во времени связано с энергией. Это следствие основной черты квантовой физики – *корпускулярно-волнового дуализма*. Ньютон полагал, что свет состоит из частиц. Позднее, когда были изучены явления дифракции и интерференции,

⁴⁷ Если вы желаете проверить предсказание для вероятностей относительно положения электронов в атоме, необходимо приготовить много атомов в конкретном состоянии и измерить положения электрона в каждом атоме. Это дает экспериментальное распределение вероятностей. Вы можете сравнить экспериментальные данные с теоретическим предсказанием для конкретного квантового состояния. Если они согласуются в разумных пределах погрешности, у вас имеются доказательства того, что первоначальное утверждение о том, что система была в определенном квантовом состоянии, было верным.

пришлось предположить, что свет – это волна. В 1905 году Эйнштейн представил, что свет является и волной, и частицей. Почти 20 лет спустя Луи де Бройль предположил, что этот дуализм волн и частиц универсален: все, что движется, имеет некоторые свойства волны и некоторые – частицы.

Конечно, трудно представить себе нечто, являющееся одновременно волной и частицей. Но, как я отметил, квантовая механика описывает явления, которые нельзя визуализировать. Мы можем манипулировать частицами и рассуждать, как они реагируют на процесс измерения, но не можем наглядно представить, что происходит в мире в отсутствие наших манипуляций.

Одно из свойств света как волны – частота (сколько раз в секунду он колеблется). Свойство света как частицы – его энергия. Каждая частица несет в себе определенное количество энергии. В квантовой механике энергия частицы всегда пропорциональна частоте волны⁴⁸. Вооружившись этим пониманием корпускулярно-волнового дуализма, вернемся к квантовому состоянию Вселенной. Поскольку вне Вселенной часов нет, ее квантовое состояние не может изменяться во времени, и частота его колебаний должна быть равна нулю. Если оно застыло, то не может колебаться. Но поскольку частота пропорциональна энергии, энергия Вселенной также должна быть равна нулю.

В любой системе, которая удерживается под воздействием гравитации, существует отрицательная энергия. Рассмотрим Солнечную систему. Если бы вы захотели столкнуть Венеру с орбиты, изгнать ее из Солнечной системы, это потребовало бы энергии. Поскольку требуется затратить энергию, чтобы перенести Венеру в состояние, в котором она не имеет энергии связи с Солнцем, Венера, находясь на своей орбите, обладает отрицательной энергией. Эта отрицательная энергия называется *гравитационной потенциальной энергией*.

Вселенная может иметь нулевую полную энергию, если суммарная гравитационная потенциальная энергия, необходимая для удержания всех частей Вселенной вместе, компенсирует сумму всех положительных энергий, связанных с массами и движениями всех тел во Вселенной.

Вселенная с нулевой энергией и частотой находится в застывшем состоянии. *Квантовая Вселенная не расширяется и не сжимается*. В ней не распространяются гравитационные волны. Не образуются галактики, планеты не вращаются вокруг звезд. Квантовая Вселенная просто есть⁴⁹.

Эти следствия применения квантовой механики к Вселенной были открыты в середине 60-х годов XX века родоначальниками квантовой гравитации Брайсом С. Девиттом, Джоном А. Уилером и Питером Бергманом. Модификация уравнения Шредингера для застывшего квантового состояния, о котором мы упоминали, была названа *уравнением Уилера – Девитта*. Довольно скоро отсутствие в уравнении времени было замечено, и ученые стали спорить о последствиях (и спорят до сих пор). Каждые несколько лет проходит конференция, посвященная проблеме времени в квантовой космологии. Поскольку человеческая изобретательность беспредельна, со временем был предложен широкий спектр решений проблемы.

Застывшее состояние Вселенной – не единственное неприятное следствие попыток

⁴⁸ Коэффициент пропорциональности h – это постоянная Планка, эквивалентная кванту энергии.

⁴⁹ Существуют приблизительные описания квантовых космологических состояний, соответствующих расширяющейся Вселенной, но они основаны на чрезвычайно тонком выборе начальных условий. Самое общее состояние описывается суперпозицией расширяющейся и сжимающейся Вселенной. Следует также отметить, что это не единственный довод в пользу устранения времени из квантовой космологии, но для наших целей этого достаточно. Другие доводы приведены в контексте представлений квантовой гравитации через интегралы по траекториям. Кроме того, Конн и Ровелли предполагают, что время возникает как следствие конечной температуры Вселенной.

применить квантовую теорию в космологии⁵⁰. Существует лишь одна Вселенная, и вы не можете построить набор систем, находящихся в одинаковых квантовых состояниях, и сравнить их измерения с вероятностями, предсказанными квантовой механикой. Возможности для сравнения теории и эксперимента (или наблюдения) резко сужаются.

Вообще-то ситуация гораздо хуже. Подготовить Вселенную в исходном квантовом состоянии нельзя. Остается лишь оценивать последствия различного выбора исходного состояния. Но Вселенная родилась всего однажды, и у нас нет выбора. Мы не присутствовали при ее рождении и не выбирали начальное состояние. Но даже если бы мы присутствовали при ее рождении, мы не смогли бы манипулировать Вселенной, потому что мы и есть часть Вселенной.

Список неудач квантовой космологии внушительен. Мы не можем подготовить первоначальное состояние квантовой Вселенной и не можем воздействовать на него из-за пределов Вселенной, чтобы трансформировать его. Мы не имеем доступа к коллекции копий Вселенных, чтобы придать смысл вероятностным предсказаниям квантового формализма. К тому же вне Вселенной некуда было бы поместить измерительные инструменты. Поэтому не существует понятия измерения изменений в системе с помощью внешних часов. С прагматической точки зрения идея применения квантовой механики к Вселенной была сумасшествием. Она потерпела крах потому, что мы применили теорию в контексте, в котором ни одно из рабочих определений не имело смысла. Это расплата за распространение на всю Вселенную метода, хорошо приспособленного к небольшой ее части.

Если говорить начистоту, то проблема еще сложнее. Как мы видели, выбор временных координат в общей теории относительности (ОТО) произволен. Поэтому уместно спросить: “Если бы имелись часы за пределами Вселенной, то какому понятию времени, текущему во Вселенной, это соответствовало бы?” или “Если бы там были осциллирующие квантовые состояния, то какие часы во Вселенной были бы синхронизированы с этими колебаниями?” И вот ответ: “Все возможные понятия времени и все возможные часы”. Как следствие, существует не одно уравнение Уилера – Девицки, а бесконечное их число. Они утверждают, что частота, с которой колеблется квантовое состояние, равна нулю для всех возможных понятий времени и для любых часов во Вселенной. С точки зрения любого возможного наблюдателя в квантовой Вселенной ничего не происходит.

⁵⁰ Еще одна проблема заключается в том, что в квантовой механике не все наблюдаемые свойства имеют определенные значения в любое время. Поэтому не все квантовые состояния системы имеют определенные значения энергии. Те состояния, которые обладают определенными энергетическими значениями, также вибрируют – с частотой, пропорциональной энергии системы. Для многих систем существует дискретный набор состояний с определенной энергией. Мы говорим, что энергия этих систем квантуется. Но большинство квантовых состояний не имеют определенного значения энергии. В таком состоянии есть вероятности, соответствующие различным энергетическим состояниям системы. Системы в этих состояниях не обладают определенными значениями частоты. Чтобы заставить квантовую систему сделать нечто большее, чем просто колебаться на месте, вы должны перевести ее в состояние, не имеющее определенного энергетического значения. Это легко сделать благодаря принципу суперпозиции, гласящему, что квантовые состояния могут суммироваться. Это аспект волновых свойств квантовой системы. Струны гитары или фортепиано вибрируют на нескольких частотах одновременно, и движение струн представлено суммой колебаний по всем частотам. Бросьте два камня в ведро воды. Каждый создает волны, и суммарный узор волн представляет собой сумму волн от каждого. Принцип суперпозиции действует аналогично. Если имеются два состояния, можно получить третье, сложив первые два. Возможность складывать квантовые состояния имеет большое значение для наших доводов в пользу того, что ньютонова физика является приближением квантовой механики. Нам эта возможность необходима, чтобы воспроизвести простой факт: в ньютоновой физике при перемещении частиц в пространстве изменяется конфигурация. Это невозможно в случае состояний, которые просто колеблются во времени, то есть состояний с определенной энергией. Чтобы воспроизвести движение, нам необходимы состояния, поведение которых является более сложным, и это требует существования состояний с неопределенными значениями энергии. Они построены путем суммирования, или суперпозиции, состояний с различными энергиями. В квантовой космологии все состояния обладают одинаковой энергией, так что воспроизвести движение обычным способом не удастся. Поэтому мы не можем получить предсказания для ОТО, исходя из квантового состояния Вселенной.

Два десятилетия никто не мог решить уравнения Уилера – Девитта. Так было до открытия петлевой квантовой гравитации, в контексте которой эти уравнения могут быть сформулированы достаточно точно – и решены. Революция началась в 1985 году с открытия Абэя (Абхай) Аштекара, касавшегося новой формулировки ОТО⁵¹. Несколько месяцев спустя мне посчастливилось работать в Институте теоретической физики (ныне Институт теоретической физики им. Кавли) Калифорнийского университета в Санта-Барбаре с Тедом Джекобсоном (сейчас он работает в Мэрилендском университете), и вместе мы обнаружили первые точные решения уравнений Уилера – Девитта, точнее – бесконечное число таких решений⁵². Чтобы описать полное квантовое состояние гравитационного поля, необходимо было решить и другие уравнения. Это было сделано два года спустя вместе с Карло Ровелли, работавшим тогда в Национальном институте ядерной физики Римского университета⁵³. Эта область физики быстро прогрессировала, и гораздо больший набор решений нашел Томас Тиман в начале 90-х годов в Гарварде⁵⁴. С тех пор разработаны еще более мощные методы поиска решений, основанные на модели спиновой пены⁵⁵. Эти результаты требовали быстрого решения проблемы времени во Вселенной, чтобы придать физический смысл математическим решениям в теории квантовой гравитации.

Вот суть проблемы: можно ли сказать, что время возникло из Вселенной, существующей вне времени, так, чтобы теория не вступала в вопиющее противоречие с обыденным понятием времени? Некоторые из моих коллег полагают, что время является частью приблизительного описания Вселенной, которое полезно на больших масштабах, но не на микроскопическом уровне. Это аналогично понятию температуры: макроскопические тела (но не отдельные частицы) имеют температуру, потому что температура тела – это средняя энергия его атомов. Некоторые физики предположили, что время, как и температура, имеет смысл лишь в макром мире, но не на планковских масштабах. В рамках других подходов время определялось через корреляции между различными подсистемами Вселенной.

Я долго думал обо всем этом. Как время может возникнуть из вневременного мира? Я по-прежнему не уверен, что какой-либо из этих подходов работает. В некоторых случаях причины, по которым они не годятся, имеют чисто технический характер и не могут быть описаны здесь. О своих сомнениях в отношении квантовой космологии я расскажу в части II.

⁵¹ Ashtekar, Abhay *New Variables for Classical and Quantum Gravity* // Phys. Rev. Lett. 57:18, 2244–2247 (1986).

⁵² Jacobson, Ted, and Lee Smolin *Nonperturbative Quantum Geometries* // Nucl. Phys. B., 299:2, 295–345 (1988).

⁵³ Rovelli, Carlo, and Lee Smolin *Knot Theory and Quantum Gravity* // Phys. Rev. Lett. 61:10, 1155–1158 (1988).

⁵⁴ Thiemann, Thomas *Quantum Spin Dynamics (QSD): II. The Kernel of the Wheeler – DeWitt Constraint Operator* // Class. Quantum Grav. 15, 875–905 (1998).

⁵⁵ Недавно разработанные модели квантовой Вселенной исследуют квантовые версии упрощенных космологических моделей, подобных тем, что мы обсуждали в главе 6. Они называются моделями петлевой квантовой космологии. Ранее такие модели изучались с грубыми допущениями, что не позволяло отвечать на ряд важных вопросов. Сегодня модели достаточно точны, с их помощью получены точные решения для этих уравнений. Надо подчеркнуть, что это значительно упрощенные модели. В частности, проблема времени в них отодвинута на задний план. В этих моделях не говорится о времени. Вместо этого говорится о корреляции между значениями различных наблюдаемых величин. Одно из полей рассматривается в качестве часов, относительно которых проводятся измерения других полей. Это обеспечивает приблизительный и реляционный подход к извлечению времени из вневременного описания мира. Кроме того, эти вопросы не ограничиваются петлевой квантовой гравитацией или петлевой квантовой космологией, даже если они наиболее актуальны в их контексте. В теории струн применительно к космологии имеется аналог уравнений Уилера – Девитта. И некоторые предположения о бесконечных Вселенных, вечной инфляции и так далее присутствуют здесь в равной степени. Проблемы интерпретации возникающего в этих моделях вневременного мира – вызов для всех теоретиков, которые задумываются об объединении или о ранней Вселенной.

Мои друзья-оппоненты утверждают, что предположения, приводящие к уравнениям Уилера – Девитта, содержат принципы квантовой механики и ОТО вместе. Учитывая, что эти принципы проверены экспериментально, целесообразно рассмотреть их следствия серьезно, понять и развить их.

Когда я был аспирантом у Брайса С. Девитта, он убеждал не навязывать свои метафизические предрассудки теории, а позволить ей диктовать собственную интерпретацию. Я до сих пор слышу его голос: “Пусть говорит теория”.

Наиболее обдуманый подход к квантовой космологии, описываемой уравнениями Уилера – Девитта, предложен британским физиком, философом и историком науки Джулианом Барбуром. Мысль Барбура радикальна, но ее нетрудно объяснить. В книге “Конец времени” (1999) он утверждает: все, что существует – это огромная коллекция застывших мгновений. Каждый момент – конфигурация Вселенной. Каждая конфигурация существует (и это следует из опыта любого существа, находящегося в такой конфигурации) как момент времени. Барбур называет это “массивом” (*heap*) мгновений. Они не следуют одно за другим. В массиве нет порядка. Мгновения просто есть. В метафизической картине Барбура вообще ничего не существует, кроме этих чистых моментов времени.

Вы можете возразить: “Я ощущаю ход времени”. Это не так, утверждает Барбур. Мы переживаем мгновения, моментальные снимки жизни. Щелкните пальцами – один снимок, мгновение из массива. Щелкните снова – еще снимок. Складывается впечатление, что второй щелчок последовал за первым, однако это иллюзия. Вы думаете так потому, что в момент второго щелчка в памяти уже запечатлено первое мгновение. Но память – это не ощущение хода времени (которого, как говорит Барбур, нет). Просто память о первом мгновении есть часть опыта проживания второго. Все, что мы переживаем (и все это, по Барбуру, реально), – лишь мгновения из массива.

Однако моменты в массиве могут быть представлены более одного раза и можно говорить об *относительной частоте моментов* (например, один момент может случиться в миллиард раз чаще, чем другой). К этим относительным частотам и относятся вероятности квантового состояния. Две конфигурации имеют относительную вероятность появиться в массиве, который соответствует относительной вероятности в квантовом состоянии. И все. Есть одна квантовая Вселенная, описываемая одним квантовым состоянием. Вселенная из очень большого набора мгновений. Некоторые встречаются чаще остальных. Некоторые значительно чаще других.

Некоторые типичные конфигурации в массиве тривиальны. Они описывают момент времени во Вселенной, заполненной газом из фотонов или газом, состоящим из атомов водорода. Барбур утверждает, что в реальном квантовом состоянии Вселенной большинство этих тривиальных конфигураций занимает небольшие объемы, и предсказывает корреляции между малым объемом, занимаемым Вселенной, и тривиальностью момента. Если предположить наличие времени, мы могли бы сказать, что когда Вселенная была тривиальной, она была небольшой. По Барбуру, свойства моментов в массиве имеют небольшой размер и тривиальность высоко коррелированы.

Другие конфигурации в массиве более интересны, сложны, населены живыми существами вроде нас, живущих на планетах, вращающихся вокруг звезд в галактиках, которые самоорганизуются в “блины” и скопления. Барбур утверждает, что правильным квантовым состоянием является такое, при котором сложность и существование жизни коррелирует с большим объемом. Таким образом, многие (возможно, даже все) конфигурации в массиве с большим объемом населены живыми существами.

Кроме того, Барбур утверждает, что в правильном квантовом состоянии наиболее распространенные конфигурации обладают структурой, которая неявно соотносится с другими моментами. Эти “капсулы времени” (воспоминания, книги, памятники материальной культуры, окаменелости, ДНК и так далее) рассказывают историю, открытую для интерпретации с точки зрения последовательности моментов, в которые что-либо происходило, наслаивалось и в итоге привело к сложности. “Капсулы” создают иллюзию

хода времени. В теории Барбура причинность тоже иллюзорна. Ничто не может быть причиной чего-либо, потому что в действительности ничего во Вселенной не происходит. Просто есть огромный массив мгновений, и существа вроде нас переживают некоторые из них. В реальности ощущение каждого момента существует само по себе и не имеет отношения к остальным. Мгновения идут без последовательности, а значит, ход времени отсутствует. Но уравнения Уилера – Девитта допускают существование приблизительного порядка и причинности, так что между наиболее общими моментами существуют корреляции. На первый взгляд они кажутся последовательностью моментов, связанных причинными процессами. В грубом приближении история последовательных моментов может быть полезна для объяснения структуры самих моментов. Но это не реальная история, и можно убедиться, что порядка нет, как нет и причинности.

В теории Барбура есть элегантность. Она легко отвечает на вопрос, чему соответствуют вероятности в квантовой космологии. Есть одна-единственная Вселенная, но она содержит много мгновений. Квантовые вероятности соответствуют реальным относительным частотам вероятностей появления моментов. В той степени, в которой теория Барбура остается верной в деталях, она объясняет, как возникает впечатление, будто есть история, в течение которой причинные процессы выстраиваются и способствуют построению сложных структур. Это предположение также объясняет очевидную направленность времени. Приоритетным в конфигурационном пространстве является то направление, которое осуществляет переход от конфигураций малого объема к увеличению объемов. Когда возникает время, увеличение объемов успешно коррелирует с увеличением времени. Таким образом, эта теория объясняет, почему во Вселенной существует стрела времени.

Версия бесконечной квантовой космологии Барбура предлагает нам утешение. Но мне жаль, что я не смог в нее поверить. Вы живете в массиве мгновений. Моменты вечны. Прошое, настоящее и будущее с нами всегда. Ваш жизненный опыт может относиться к конечному множеству моментов, но они не проходят. Так что когда приходит ваш последний день, ничто не заканчивается. Это просто момент, в котором существуют все воспоминания, которые вы когда-либо могли иметь. Ничего не исчезает, потому что ничего и не начиналось. Страх смерти основан на иллюзии, которая, в свою очередь, вытекает из заблуждения. Время не уходит, потому что нет течения времени. Просто существуют, и всегда будут существовать, моменты жизни.

Не буду вдаваться в рассуждения о том, что подумал бы Эйнштейн о квантовой космологии Барбура. Но есть свидетельства того, что он утешался осознанием исчезновения времени в блочной картине. Еще в подростковом возрасте Эйнштейн стремился сбежать из грязного мира в созерцание вечных законов природы. В письме к вдове своего друга Микеле Бессо Эйнштейн писал: “Он немного опередил меня, покидая этот странный мир. Это не имеет значения. Для нас, убежденных физиков, различие между прошлым, настоящим и будущим имеет только ценность иллюзии, как бы цепко за нее ни держались”.

Интерлюдия Недовольство Эйнштейна

Блочная картина Вселенной в теории относительности стала последним шагом к устранению времени из физики. Но у самого Эйнштейна было двойственное отношение к исчезновению времени из картины мироздания, для создания которой он столько сделал. Он нашел утешение в блочной модели и все же остался недоволен. Мы знаем об этом из “Интеллектуальной автобиографии” Рудольфа Карнапа. Тот пересказывает беседу с Эйнштейном:

Однажды Эйнштейн сказал, что проблема понятия “сейчас” его всерьез волнует. Он пояснил, что “сейчас” имеет для человека какой-то особенный смысл, чем-то принципиально отличается от прошлого и будущего, но что это важное

различие не отражается и не может быть отражено в законах физики. То, что эта особенность не может найти свое место в науке, представлялось ему требующим болезненных, но неизбежных перемен.

Сам Карнап сомнений на этот счет не испытывал:

Я заметил, что все, что происходит объективно, может быть описано в науке. С одной стороны, временная последовательность событий описывается в физике. С другой стороны, особенности человеческого опыта по отношению ко времени, в том числе его различное отношение к прошлому, настоящему и будущему может быть описано и (в принципе) объяснено в рамках психологии.

Не представляю, что думал Карнап. Я не знаю, как науки вроде биологии и психологии могли бы объяснить наше ощущение времени в мире без времени⁵⁶. Эйнштейна, судя по всему, ответ Карнапа тоже не устроил: “Эйнштейн думал, что эти научные описания не могут удовлетворить потребности человека, что есть что-то важное за пределами современной науки”⁵⁷.

Чтобы быть успешной, научная теория должна объяснить наши наблюдения природных явлений. Но элементарное наблюдение говорит, что все в природе организовано во времени. Если наука должна объяснить все, что мы наблюдаем в природе, разве не должна она включать наш опыт восприятия мира как непрерывного потока мгновений? Разве фундаментальная физическая теория не должна включать основные знания о том, как структурирован наш опыт?

Все, что мы испытываем, каждая мысль, впечатление, поступки, намерения, – часть времени. Мир предстает в виде серии моментов. Мы не можем выбирать, в какой момент живем, не можем выбрать направление своего движения во времени. Нет возможности переместиться в будущее. Мы не можем влиять на скорость хода времени. В этом отношении время принципиально отличается от пространства. Кто-то возразит: события происходят каждое в определенном месте. Но у нас есть выбор, куда перемещаться в пространстве. Это важное различие: оно формирует наш опыт.

Эйнштейн и Карнап сходятся в одном: восприятие природы в виде серии моментов не является частью физической концепции природы. Будущее физики (и, можно сказать, физики будущего) сводится к простому выбору: согласиться с Карнапом в том, что в науке нет места для текущего момента, либо довериться интуиции величайшего ученого XX века и постараться нащупать путь к новой науке, в которой можно избежать “болезненных перемен”.

Для Эйнштейна настоящий момент времени представлялся реальным и был частью объективного описания реальности. Он считал (как сообщает Карнап), что “в ‘сейчас’ есть нечто особенно важное, нечто такое, что находится за пределами науки”. Не менее 60 лет прошло с того разговора. Мы многое узнали о физике и космологии. Достаточно много, чтобы привести “сейчас”, наконец, в физическое описание природы. Ниже я объясню, почему нынешние знания требуют, чтобы время стало центральной концепцией в физике.

В части I мы проследили 9 этапов устранения времени из физической концепции природы, начиная с открытия Галилеем законов движения и заканчивая вневременной

⁵⁶ Джим Браун объяснял мне, что Карнап имел в виду что-то вроде различия между первичными и вторичными эффектами. Мы видим красный цвет, но на самом деле это атомы вибрируют и излучают свет определенной частоты. Мы чувствуем, как время проходит, но в действительности мы – просто мировая линия в блочной Вселенной, обладающая способностью воспринимать и хранить воспоминания. Для меня это способ изложить проблему, но не решить ее.

⁵⁷ *The Philosophy of Rudolf Carnap: Intellectual Autobiography*. Ed. Paul Arthur Schilpp. La Salle, IL: Open Court, 1963. Pp. 37–38.

квантовой космологией Джулиана Барбура. Вскоре мы увидим возвращение времени. Но для этого необходимо опровергнуть 9 доводов из части I.

Аргументы, вытекающие из *ньютоновой физики и ньютоновой парадигмы* :

- 1) “Замораживание” движения путем изображения прошлых наблюдений с помощью графиков;
- 2) Изобретение вневременной конфигурации пространства;
- 3) Ньютонова парадигма;
- 4) Довод в пользу детерминизма;
- 5) Обратимость времени.

Аргументы, вытекающие из *специальной и общей теорий относительности*

Эйнштейна :

- 6) Относительность одновременности;
- 7) Блочная картина Вселенной и пространства-времени;
- 8) Начало времени в момент Большого взрыва.

Космологические доводы , вытекающие из расширения законов физики до масштабов Вселенной в целом:

- 9) Квантовая космология и конец времени.

Эти положения привели к взгляду на природу, в рамках которого отрицается реальность настоящего момента и вместо этого природа описывается в терминах блочной картины Вселенной. Время в этой картине рассматривается в качестве дополнительного измерения пространства, и причинная связь времен может быть заменена вневременной логикой событий. ОТО и механика Ньютона могут рассматривать историю, развивающуюся во времени, но это время представляется в смысле математической последовательности, лишенным ощущения текущего мгновения. В этих теориях время нереально. Я буду характеризовать такие теории как вневременные.

Действительно ли устранение времени – необходимая плата за научный прогресс? Указанные 9 доводов основаны на заблуждении, будто ньютонова парадигма (предполагающая, что мы можем предсказать состояние системы, если знаем ее начальные условия и законы движения) может быть развернута до теории мироздания. Однако я покажу, что расширение ньютоновой парадигмы не может привести к приемлемой теории Вселенной. Это мощный метод в ограниченном пространстве, но в космологических масштабах он бессилён.

Самые веские доводы в пользу устранения времени сформулированы в рамках теории относительности. В главе 14 мы опровергнем их, а после рассмотрим, как изменится физика и космология, принявшие гипотезу о реальности времени.

Часть II

Свет: возвращение времени

Глава 8

Космологическое заблуждение

До сих пор мы следовали дорогой мистики, стремясь выйти за пределы своего привязанного к времени опыта и открыть вечные истины. Мы узнали о значительном успехе ньютоновой парадигмы и увидели, что этот успех дался нам ценой устранения времени из физики. Далее мы увидим, что все-таки не должны платить эту цену: ньютонова парадигма к Вселенной в целом неприменима. Нам нужна новая теория, в которой реальность времени является центральным элементом.

Вернемся к истокам науки и обратимся к Анаксимандру (ок. 610–546 гг. до н. э.). Он

первым стал искать причины природных явлений в самой природе, а не в капризах богов⁵⁸. В те времена даже самые знающие считали себя обитателями Вселенной, ограниченной двумя плоскостями. Под их ногами лежала земля, простирающаяся во все стороны. Над головой было небо. Во Вселенной существовало одно выделенное направление: вниз. Основной закон природы, подтвержденный опытом, гласил: все падает. Единственным исключением было небо и закрепленные там небесные тела.

Когда люди попытались распространить этот закон на Вселенную, они столкнулись с парадоксом: если все, что не закреплено на небе, падает, то почему не падает Земля? Ее должно что-нибудь поддерживать. Одна из гипотез гласила, что Земля покоится на спине гигантской черепахи. Но что тогда поддерживает черепаху? Бесконечная башня, сложенная из черепках?

Анаксимандр понял: чтобы создать успешную теорию Вселенной и избежать *reductio ad absurdum* [доведения до абсурда] – бесконечной башни из черепках, – необходима концептуальная революция. Он выдвинул идею, вполне очевидную для нас, но шокировавшую современников философа: “вниз” – значит “по направлению к Земле”. Дело не в том, что все предметы падают вниз, а в том, что все предметы падают на Землю. Это позволило бы Анаксимандру сделать еще одно революционное открытие: что Земля круглая. Но он этого шага не сделал. И все же переопределение “вниз” освободило путь представлению о Земле как о теле, парящем в пространстве. Анаксимандр предположил, что небо *вокруг* Земли: и под ногами, и над головой.

Это понимание существенно упростило космологию. Тот очевидный факт, что Солнце, Луна и звезды восходят на востоке и заходят на западе, мог быть объяснен суточным вращением. Уже не было необходимости ежеутренне “порождать” Солнце и ежевечерне “убивать” его. После заката Солнце возвращается в исходную точку, скрытно проделав путь у нас под ногами. Представьте себе восхищение людей в тот момент, когда пришло понимание этого! Это избавило их от вечного беспокойства о том, что дух, ответственный за рождение Солнца, может в одно прекрасное утро проспать или просто оставить свой пост. Вклад в науку Анаксимандра был, возможно, гораздо значительнее, нежели вклад Коперника: он избавил людей от необходимости объяснять, на чем покоится Земля.

Философы, желавшие знать, на чем покоится Земля, ошибочно применяли локальный закон к Вселенной целиком. Их Вселенная содержала Землю и небо, а мы живем в бесконечном космосе с галактиками, но впадаем в ту же ошибку, и следствием ее является бесконечная путаница в современной космологии. Хотя, кажется, нет ничего естественнее применения к Вселенной закона или принципа, который мы успешно применяем в мире подсистем, это значит впасть в *космологическое заблуждение*.

Вселенная отличается от любой своей части. Это не просто сумма частей. Все свойства объектов во Вселенной следует понимать с позиции их связи или взаимодействия с другими объектами. Но сама Вселенная есть сумма всех отношений, и она не может обладать свойствами, определяемыми отношением к другому, подобному ей объекту.

Земля во Вселенной Анаксимандра – единственное, что не падает, поскольку это то, куда все падает. Точно так же Вселенная единственная не может быть объектом воздействия ничего внешнего по отношению к ней, потому что она и есть сумма всех действий.

Если уместно сравнение современной и древнегреческой науки, то из-за распространения локальных законов на Вселенную возникают парадоксы. Мы со своей верой в ньютонову парадигму не в состоянии найти ответ на два простых вопроса:

а) Почему именно эти законы? Во Вселенной действует определенный набор законов. Как были отобраны эти законы из всех, которые также, возможно, могли управлять миром?

б) Вселенная образовалась в результате Большого взрыва с определенным

⁵⁸ Rovelli, Carlo *The First Scientist: Anaximander and His Legacy*. Yardley, PA: Westholme Publishing, 2011.

набором начальных условий. *Почему именно этот набор?* Пусть мы установили законы, но есть еще бесконечное количество начальных условий, при которых Вселенная могла образоваться. Как выбраны реальные исходные условия из бесконечного множества возможностей?

Оставаясь в рамках ньютоновой парадигмы, невозможно даже начать отвечать на два этих фундаментальных вопроса, поскольку законы и начальные условия аксиоматичны по отношению к парадигме. Если физика останется в рамках ньютоновой парадигмы, мы никогда не получим ответ.

Мы привыкли считать, будто знаем, откуда берутся эти законы. Многие теоретики считали, что только одна математически последовательная квантовая теория может объединить четыре основные силы природы (электромагнетизм, сильные и слабые ядерные силы, гравитацию). Но если бы это было так, то ответ на вопрос, почему мы имеем дело с данными законами, гласил бы: лишь один из возможных наборов физических законов может породить мир, подобный нашему.

У нас достаточно доказательств, что теории, включающей все известное о природе (по сути, теории, согласующейся с общей теорией относительности и квантовой механикой), не существует. В последние 30 лет наблюдается прогресс в теории квантовой гравитации. Ученые пришли к выводу, что мир, описываемый здесь в рамках всех подходов, не уникален. Наиболее развитым подходом в квантовой гравитации является петлевая квантовая гравитация, но и она допускает возможность широкого выбора элементарных частиц и сил.

То же справедливо и в отношении теории струн, которая, как ожидается, объединит теорию гравитации и квантовую физику. Есть свидетельства существования бесконечного количества струнных теорий, и многие из них зависят от большого набора параметров: чисел, которые могут быть заданы вручную и принимать любые значения, какие мы выберем. Все эти теории кажутся одинаково самосогласованными математически.

Подавляющее их число описывает миры со спектром элементарных частиц и сил, примерно соответствующих нашему миру. Однако сейчас нет ни одной теории струн, которая включала бы стандартную модель физики элементарных частиц (СМ). Сначала теория струн внушала надежду, что она станет уникальной фундаментальной теорией, точно воспроизводящей СМ и позволяющей делать предсказания для наблюдений за ее пределами. Но в 1986 году Эндрю Строминджер разрушил эти надежды, обнаружив, что теория струн имеет огромное количество версий⁵⁹. Это побудило меня заняться проблемой отбора законов в нашей Вселенной и привело к концепции реальности времени.

Но – хватит о неразрешимых вопросах. А что насчет дилеммы?⁶⁰ Оказывается, дилемма содержится уже в понятии закона в ньютоновой парадигме. Когда мы говорим о “законе”, речь идет о множестве случаев. Если что-либо произошло один раз, это просто наблюдение. Но любое применение закона в любой части Вселенной предполагает приближение (как мы увидели в главе 4), потому что приходится пренебрегать всеми взаимодействиями между этой частью и остальной Вселенной. И многие подтверждаемые экспериментально случаи действия закона являются приближениями.

Чтобы применить закон природы без приближения, мы должны применить его ко всей Вселенной. Но ведь существует лишь одна Вселенная, и в таком случае у нас нет достаточных доказательств того, что некий закон природы здесь применим. Это можно назвать космологической дилеммой.

Космологическая дилемма не мешает нам применять законы природы (например, ОТО или законы Ньютона) к подсистемам Вселенной. Они работают практически во всех случаях

⁵⁹ Strominger, Andrew *Superstrings with Torsion* // Nucl. Phys. B 274:2, 253–284 (1986).

⁶⁰ Дилемма – это довод с двумя противоположными положениями, ни одно из которых не является приемлемым.

и поэтому-то и называются законами. Но каждое из таких приложений закона является аппроксимацией, основанной на фантастическом предположении об отсутствии влияния остальной Вселенной на подсистему⁶¹. Также ничто не мешает нам представить, что история нашей Вселенной – это решение, найденное в теории, такой как ОТО, и мир в ней описывает СМ. Но это нисколько не объясняет, почему именно данное решение было выбрано и затем реализовано в природе. И ни одно найденное решение не доказывает то, что существующие законы природы представляют собой комбинацию ОТО и СМ, потому что любое решение является приближением для множества законов⁶².

Чтобы показать, чем закон отличается от наблюдения, рассмотрим пример. В семье один ребенок, Мира, и она любит мороженое – шоколадное. Впервые она попробовала именно шоколадное мороженое и с тех пор предпочитает его всем другим сортам. Родители Миры считают, что есть закон природы, в силу которого все дети любят мороженое. Но, не имея возможности наблюдать за другими детьми, они не могут убедиться в этом. Отец Миры верит и в закон, гласящий: дети предпочитают шоколадное мороженое. У матери другая гипотеза: дети предпочитают тот сорт, который впервые попробовали.

Обе гипотезы согласуются с данными. Родители Миры делают предсказания, которые могут быть проверены путем опроса других родителей. Следовательно, обе гипотезы могут считаться законами. Но предположим, что Мира – единственный ребенок на планете. В этом случае нет возможности проверить, являются ли гипотезы ее родителей законами.

Исходя из собственных познаний в биологии человека, родители Миры могут заявить, что дети любят все, сделанное из сахара и молока. Но здесь они опираются на знания, полученные в результате изучения многих людей. И здесь аналогия перестает работать, поскольку в космологии мир лишь один. В науке Вселенная не может считаться единичным экземпляром из класса, потому что ни одно утверждение в отношении свойств этого класса нельзя проверить.

Теперь пример из физики. Первый закон движения Ньютона, гласящий, что все свободные частицы движутся по прямой, многократно подтвержден. Но каждый случай приближителен, потому что ни одна частица во Вселенной не может быть подлинно свободной. Все частицы испытывают гравитационное воздействие со стороны всех остальных тел. Если бы мы хотели проверить закон точно, у нас не было бы возможности применить его.

Первый закон Ньютона в лучшем случае может служить приближением к другому, более точному закону. И действительно, он является частным случаем второго закона Ньютона, описывающего движение частицы под воздействием сил. Очень интересно: каждая частица во Вселенной гравитационно притягивает любую другую. Есть также силы, действующие между каждой парой заряженных частиц. Сил слишком много, чтобы их все можно было учесть. Чтобы проверить, является ли второй закон Ньютона точным, и предсказать движение лишь одной частицы, нам придется учесть более 1080 сил.

На практике, конечно, мы не можем сделать ничего подобного. Мы учитываем взаимодействие с одним или несколькими близлежащими телами и пренебрегаем всеми остальными. В случае притяжения, например, мы можем обосновать пренебрежение взаимодействием с далекими телами, потому что их влияние мало. (Это не так очевидно. Хотя взаимодействие с далекими частицами слабее, число далеко расположенных тел многократно превышает количество тел, расположенных вблизи.) В любом случае, никто не

⁶¹ Кто-то возразит, что при построении космологических моделей в ОТО мы применяем уравнения Эйнштейна для всей Вселенной. Это не так. Мы применяем усеченные уравнения Эйнштейна для подсистемы, состоящей из Вселенной на большом масштабе. Малое (в том числе мы, наблюдатели) из моделируемой системы исключено.

⁶² Например, стандартная модель может быть улучшена путем добавления чрезвычайно массивных частиц, которые вряд ли могут влиять на большую часть истории Вселенной.

пытается проверить, является ли второй закон Ньютона абсолютно верным. Мы проверяем лишь приближение к нему.

Другая серьезная проблема, связанная с экстраполяцией ньютонова понятия “закон” на мироздание, заключается в том, что существует одна бесконечная Вселенная – и множество вариантов начальных условий. Этому соответствует бесконечное количество решений уравнений предполагаемого космологического закона – решений, описывающих бесконечное множество возможных Вселенных. Но реальная Вселенная лишь одна.

Уже то, что у закона бесконечное число решений, заставляет заключить, что его следует применять к подсистемам Вселенной, наличествующим в огромном количестве версий. Полнота природы соответствует множеству решений. Поэтому, когда мы применяем закон к небольшой подсистеме Вселенной, свобода выбора начальных условий превращается в необходимую часть успеха приложения закона.

По той же причине, когда мы применяем закон, имеющий бесконечное число решений, к такой уникальной системе, как Вселенная, многое становится необъяснимым. Свобода выбора начальных условий обращается из преимущества в недостаток: возникают вопросы о Вселенной, на которые не отвечает теория, выражаемая этим законом (например, вопросы о любом свойстве Вселенной, зависящем от выбора начальных условий). Что думать о всех других историях, которые также являются решениями гипотетического космологического закона, но которые не происходят во Вселенной? Почему среди бесконечного числа решений лишь одно реализуется? Эти рассуждения приводят к выводу: мы ошиблись в том, какие законы природы могут работать на космологических масштабах. Тому есть три причины:

1) Утверждение, что закон распространяется на космологические масштабы, подразумевает огромное количество информации о предсказаниях, касающихся несуществующих Вселенных. Следовательно, для описания Вселенной необходимо нечто гораздо более слабое, нежели закон. Нам не нужны экстравагантные объяснения, опирающиеся на предсказания, которые нельзя проверить. Вполне достаточно объяснения, которое учитывает лишь то, что на самом деле происходит в нашей – единственной – Вселенной.

2) Обычные законы не могут объяснить, почему решение, которое описывает нашу Вселенную, единственно и описывает именно наш вариант мироздания.

3) Закон не может объяснять сам себя. Он не предлагает разумного обоснования, почему в природе реализуется именно этот, а не какой-либо другой закон.

Так что обычные законы природы применительно к Вселенной объясняют слишком много – и в то же время недостаточно.

Единственный способ избежать этих проблем – найти методы, выходящие за рамки ньютоновой парадигмы, новую парадигму, применимую в масштабах Вселенной. Если мы не хотим, чтобы физика уступила место мистике, мы должны изменить ее методы.

Доводы в пользу устранения времени из физики основаны на предположении, что ньютонова парадигма может быть распространена на Вселенную. Если это не так, то доводы за устранение времени утрачивают силу. Отказываясь от ньютоновой парадигмы, придется отказаться и от этих доводов. И тогда можно предположить, что время реально. Можем ли мы предложить истинную космологическую теорию, если мы примем реальность времени? Ниже я расскажу, почему ответ на этот вопрос – да.

Глава 9

Космологическая задача

Величайшие теории XX века в физике – теория относительности, квантовая теория, стандартная модель – являются собой вершины этой науки. У них прекрасные математические выражения, позволяющие делать предсказания для экспериментов, которые подтверждались

неоднократно и с высокой точностью. И все же они не могут претендовать на фундаментальность. Их расширение до описания всего мироздания затрудняет общая черта: каждая из указанных теорий делит мир на две части: первая с течением времени изменяется, а вторая предполагается неизменной. Первая часть – это изучаемая система, степени свободы которой меняются. Вторая соответствует остальной Вселенной, и мы можем назвать ее фоном для первой части.

Эта вторая часть не может быть описана, однако она неявно присутствует в условиях, которые придают смысл движению, описываемому в первой части. Измерение расстояний неявно подразумевает существование неподвижных точек отсчета и инструментов. Указание времени подразумевает существование часов вне системы, в которой измеряется время.

В главе 3 мы обсуждали игру в мяч. Его положение приобретает смысл относительно положения в пространстве, где находится Дэнни. Движение определяется с помощью часов, которые, как предполагается, идут равномерно. И Дэнни, и часы находятся за пределами системы, описанной конфигурационным пространством, и, как предполагается, являются статическими. Без этих фиксированных точек отсчета мы не знали бы, как сравнить предсказания теории с данными эксперимента.

Деление мира на динамическую и статическую части – это фикция, но она очень полезна, когда речь идет о небольшой части Вселенной. Вторая часть, статическая, как предполагается, состоит из других динамических объектов за пределами системы. Игнорируя ее динамику и эволюцию, мы определяем рамки, в которых открываем для себя простые законы.

Для большинства теорий, кроме общей теории относительности (ОТО), статический фон включает геометрию пространства и времени, а также выбор законов, которые полагаются неизменными. Даже ОТО, в которой описывается динамическая геометрия, предполагает другие статические конструкции, например топологию и размерность пространства⁶³.

Это деление на динамическую часть и фон является неотъемлемой частью ньютоновой парадигмы. И оно же делает указанную парадигму непригодной для применения в масштабе Вселенной. Нет и не может быть статичной части, поскольку все во Вселенной меняется, и нет ничего вне ее, ничто не может служить фоном, на котором происходит измерение движения. Поиск способа преодоления этого барьера можно назвать *космологической задачей*. Она требует от нас теории, осмысленно применимой для описания всей Вселенной, теории, в которой динамический объект определяется через другие динамические объекты и где просто нет места статическому фону. Такие теории называются *фононезависимыми* ⁶⁴.

Мы видим, что космологическая дилемма встроена в ньютонову парадигму: то, что обеспечило успех теории на меньших масштабах (включая зависимость от статического фона и тот факт, что один и тот же закон имеет бесконечное количество решений), превращается в причину ее неприменимости как основы космологии.

Успех физики привел к первой попытке изучения космологии с научной точки зрения. Неудивительно, что один из способов разрешения космологической дилеммы заключается в

⁶³ Среди других структур с фиксированным фоном – геометрия пространства квантовых состояний (понятие расстояния в таком пространстве используется для определения вероятностей) и геометрия пространства для степеней свободы стандартной модели. Структуры, используемые в ОТО, включают дифференциальные структуры пространства-времени, а также нередко и геометрию асимптотических границ.

⁶⁴ Термины “фонозависимый” и “фононезависимый” в случае квантовой теории гравитации имеют более узкое значение. В этом контексте фонозависимая теория предполагает фиксированный фон классического пространства-времени. Пертурбативные теории, такие как пертурбативная квантовая ОТО и пертурбативная теория струн, фонозависимы. Фононезависимые подходы к квантовой гравитации включают петлевую квантовую гравитацию, причинные множества, каузальную динамическую триангуляцию и теорию квантовых графов.

признании того, что наша Вселенная – лишь экземпляр из обширной коллекции, потому что все наши теории можно применить лишь к частям значительно большей системы. Это, как я понимаю, определяет привлекательность сценариев с многочисленными вариантами Вселенных.

Когда мы проводим эксперимент, мы держим начальные условия эксперимента под контролем. Мы изменяем их для проверки гипотез. Но когда дело доходит до космологических наблюдений, выясняется, что начальные условия определены на ранней стадии образования Вселенной и мы должны принять в качестве гипотезы эти условия как данные. Чтобы объяснить результат космологических наблюдений в рамках ньютоновой парадигмы, мы выдвигаем две гипотезы: предполагаем, какими были начальные условия и какие законы действовали. Это ставит нас в гораздо более сложную ситуацию, чем та, с которой мы сталкиваемся, занимаясь физикой “в ящике”.

То, что мы должны и проверять гипотезы о законах природы, и контролировать начальные условия, сковывает нас. Если предсказания не согласуются с наблюдениями, есть два способа исправить теорию. Мы можем изменить гипотезу либо о законах, либо о начальных условиях. И то, и другое скажется на результате эксперимента.

Возникает проблема: откуда мы знаем, какая из двух гипотез нуждается в коррекции? Наблюдая за небольшой частью Вселенной (например, за звездой или галактикой), мы оцениваем справедливость закона исходя из многочисленных опытов. Все они служили проверке одного и того же закона, и любые различия между ними должны быть приписаны различиям в их начальных условиях. Но в случае Вселенной мы не в состоянии отличить влияние изменения гипотезы о законе от влияния изменения гипотезы о начальных условиях.

Эта проблема нередко возникает в космологических исследованиях. Серьезной проверкой теории ранней Вселенной явилось измерение структуры реликтового, или микроволнового фонового излучения (МФИ). Это изображение Вселенной около 400 тысяч лет после Большого взрыва. Наиболее изученной гипотезой в космологии является теория Большого взрыва и последующего расширения Вселенной, которая утверждает, что в самом начале истории Вселенная быстро расширялась. По мере расширения Вселенной стирались ее первоначальные черты, что привело к большой, сравнительно безликой Вселенной, которую мы наблюдаем. Инфляционная модель также предсказывает наличие структуры в МФИ, очень похожей на сегодняшнюю.

Несколько лет назад ученые сообщили, что обнаружили указания на новые неожиданные свойства МФИ – отклонение от формы распределения Гаусса, чего не предсказывает стандартная теория инфляции⁶⁵. У нас два варианта объяснения этого нового наблюдения: мы можем изменить теорию или первоначальные условия. Теория инфляции Вселенной основана на ньютоновой парадигме, и ее предсказания зависят от начальных условий, на которые влияют законы природы. Через несколько дней после появления статьи, в которой были представлены доказательства отклонений от Гауссовой формы распределения, появились попытки их объяснить. Некоторые интерпретаторы пошли по пути изменения законов, другие модифицировали исходные условия. Обе стратегии успешно объяснили новые наблюдения. На самом деле успех любой из этих стратегий был предрешен⁶⁶. Как обычно случается, дальнейшие наблюдения не подтвердили первоначальное заявление. Сейчас мы не знаем, есть ли в МФИ отклонения от формы

⁶⁵ Yadav, Amit P. S., and Benjamin Wandelt *Detection of Primordial Non-Gaussianity (fNL) in the WMAP 3-Year Data at Above 99.5 % Confidence* // arXiv:0712.1148 [astro-ph], PRL100,181301, 2008.

⁶⁶ Chen Xingang et al. *Observational Signatures and Non-Gaussianities of General Single Field Inflation* // arXiv: hep-th/0605045v4 (2008); Cheung, Clifford, et al. *The Effective Field Theory of Inflation* // arXiv.org/abs/0709.0293v2 [hep-th] (2008); Holman, R., and Andrew J. Tolley *Enhanced Non-Gaussianity from Excited Initial States* // arXiv:0710.1302v2 (2008).

распределения Гаусса⁶⁷.

Мы рассмотрели пример с двумя различными способами привести теорию в соответствие с данными. Если мы считаем, что законы и начальные условия описаны с помощью некоторых параметров, то существует два набора параметров, посредством которых можно подогнать теорию. Такую ситуацию называют *вырожденной*. Обычно, когда есть вырождение, мы проводим дополнительные наблюдения, чтобы определить, какая из двух возможных поправок верна. Но в случае с реликтовым излучением, которое является следом события, произошедшего лишь однажды, мы, возможно, никогда не разрешим вырождение. Учитывая ограничения в измерении МФИ, вполне возможно, мы не сможем отделить объяснения на основе изменения законов от объяснений, основанных на модификации исходного состояния⁶⁸. Однако без возможности отделить влияние законов от влияния начальных условий ньютонова парадигма теряет силу как метод, способный объяснять физические явления.

Мы готовы пересмотреть предположения, которыми руководствовались физики со времен Ньютона. Прежде мы думали, что такие теории, как механика Ньютона или квантовая механика, годятся на роль фундаментальной теории (если бы ее удалось построить), идеального зеркала мироздания, так что все явления соответствовали бы посредством математики этой фундаментальной теории. Сама структура ньютоновой парадигмы, основанной на вневременных законах, действующих во вневременном пространстве конфигураций, считалась необходимым элементом этого построения. Я утверждаю, что эта метафизическая фантазия гарантированно приведет нас к путанице, лишь только мы попытаемся применить ее ко всей Вселенной. Эта позиция требует повторной оценки состояния теорий в рамках ньютоновой парадигмы – от кандидатов в фундаментальные теории до приближенного описания небольших подсистем. Эта переоценка уже происходит и опирается на два взаимосвязанных утверждения:

1) Все теории, с которыми мы работаем (в том числе стандартная модель физики элементарных частиц и ОТО), приближительны. Они применимы в ограниченных областях, которые включают лишь часть имеющихся во Вселенной степеней свободы. Мы называем такие теории *эффективными*.

2) Во всех экспериментах и наблюдениях, связанных с ограниченными областями, мы записываем значения лишь малого подмножества имеющихся степеней свободы, пренебрегая остальными. Данные сравниваются с предсказаниями эффективных теорий.

Успех современной физики целиком основан на исследовании свойств ограниченных областей природы, которые моделируются с помощью эффективных теорий. Искусство физика-экспериментатора заключается в постановке экспериментов, позволяющих выделить и изучить лишь несколько степеней свободы, пренебрегая остальной Вселенной. Теоретики нацелены на создание эффективных теорий, позволяющих моделировать ограниченные области, которые исследуют экспериментаторы. Никогда прежде у нас не было возможности

⁶⁷ Это не значит, что влияние начальных условий на МФИ нельзя отличить от изменений в инфляционной модели, по крайней мере, в рамках определенных классов моделей. См.: Agullo, Ivan, Navarro-Salas, Jose, and Leonard Parker arXiv:1112.1581v2. Благодарю М. Джонсона за обсуждение этого вопроса.

⁶⁸ Уникальность Вселенной сводит на нет и другие попытки проверки теорий рождения Вселенной. В лабораторной физике мы всегда имеем дело с шумом, возникающим из-за статистических неопределенностей в данных. Зачастую он может быть уменьшен путем множества измерений, потому что влияние случайного шума уменьшается с увеличением числа испытаний. Так как Вселенная уникальна, невозможно таким образом сократить ошибки некоторых космологических наблюдений. Эти статистические неопределенности известны как космическая дисперсия.

сравнить предсказания кандидатов на роль действительно фундаментальной теории (я имею в виду такую теорию, которая не может быть понята как эффективная) с экспериментом.

Экспериментальная физика изучает ограниченную область природы. Подсистема, которая моделируется в предположении, как если бы она была единственной во Вселенной, называется *замкнутой системой*. Но не стоит забывать, что в отрыве от целого никогда не бывает полного. В мире всегда есть взаимодействие между любой подсистемой и объектами за ее пределами. Любые подсистемы Вселенной – в той или иной степени *открытые*, то есть ограниченные, системы, взаимодействующие с объектами за их пределами. Занимаясь физикой “в ящике”, мы аппроксимируем открытую систему замкнутой.

Экспериментальная физика большей частью состоит из преобразования открытых систем в приблизительно замкнутые. Мы никогда не сможем сделать это точно хотя бы потому, что, проводя измерения системы, вторгаемся в нее. (Это проблема в интерпретации квантовой механики, но сейчас давайте придерживаться макромира.) Каждый эксперимент есть борьба за данные, которые вы желаете извлечь, очистив их от неизбежного фона, приходящего из-за пределов не полностью замкнутой системы. Экспериментаторы тратят немало сил, убеждая себя и коллег в том, что они видят выделенный сигнал и что они сделали все, чтобы уменьшить влияние паразитных эффектов.

Мы экранируем эксперименты от посторонних вибраций, полей и излучений. Для многих экспериментов этого достаточно, но некоторые настолько чувствительны, что должны быть защищены даже от прохождения космических лучей сквозь детектор. Чтобы защитить от них лабораторию, можно перенести ее в шахту, на несколько миль под землю. Так мы поступаем, проводя измерения нейтрино Солнца. Это снижает фон других излучений до приемлемого уровня, позволяющего регистрировать редкие нейтрино. Но нет способа изолировать лабораторию от самих нейтрино. Детекторы, погруженные глубоко под лед на Южном полюсе, регистрируют нейтрино, которые вошли в Землю в районе Северного полюса и прошли сквозь планету.

Даже если построить астрономически толстый экран для нейтрино, есть нечто, что пробьется сквозь экран. Это гравитация. В принципе, ничто не может ее экранировать или остановить распространение гравитационных волн, поэтому ничто не может быть абсолютно изолированным. Я понял это, когда работал над диссертацией. Я строил модель ящика с гравитационными волнами, отражавшимися от стенок, но все мои модели оказались нерабочими, поскольку гравитационные волны проходили сквозь стенки. Я пробовал увеличить удельную плотность материала, но прежде чем модель приблизилась к состоянию, при котором стенки начали отражать гравитационное излучение, она коллапсировала в черную дыру. Я долго ломал голову, а потом понял: проблема, которую я не мог решить, гораздо интереснее построения модели. Мне удалось показать, что стенки, какой бы толщины и плотности они ни были, не отразят гравитационные волны⁶⁹. Чтобы прийти к этому, я должен был принять за основу лишь утверждения общей теории относительности о том, что энергия в веществе всегда положительна, а звук не может распространяться быстрее света. Это значит, что нет системы, изолированной от Вселенной. Стоило бы возвести это в принцип (я буду называть его *принципом несуществования замкнутых систем*).

Есть и другая причина, в силу которой моделирование открытой системы как замкнутой – всегда приближение. Мы не в состоянии предвидеть случайное разрушительное вмешательство в систему извне. Мы можем измерять, предсказывать и подавлять фон. Но внешний мир может перечеркнуть попытки изоляции. Самолет может врезаться в здание, где располагается лаборатория. Ее может разрушить землетрясение. С Землей может столкнуться астероид. Облако темной материи может пройти сквозь Солнечную систему,

⁶⁹ Smolin, Lee *The Thermodynamics of Gravitational Radiation* // Gen. Rel. & Grav. 16:3, 205–210 (1984); Smolin, Lee *On the Intrinsic Entropy of the Gravitational Field* // Gen. Rel. & Grav. 17:5, 417–437 (1985).

нарушив орбиту Земли и столкнув ее с Солнцем⁷⁰. Или кто-нибудь щелкнет выключателем в подвале и обесточит лабораторию. Список того, что может сорвать эксперимент, практически бесконечен. Когда мы моделируем эксперимент, как если бы имели дело с замкнутой системой, мы исключаем из модели все эти возможности.

Чтобы включить все, что может помешать эксперименту, потребуется модель Вселенной в целом. Но мы не сможем проводить физические опыты, не исключив все эти возможности из моделей и расчетов. Однако исключая их, мы в принципе основываем физику на приближениях.

Основные теории моделируют части природы, “вырезанные” экспериментаторами из мира. Возможно, когда они были предложены, они представлялись фундаментальными, но со временем теоретики пришли к заключению, что они лишь эффективное средство описания ограниченного числа степеней свободы.

Физика частиц – хороший пример эффективной теории. Эксперименты до сих пор исследовали фундаментальные свойства природы лишь до определенного масштаба. После измерений на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе этот масштаб – около 10–17 см. Значит, стандартная модель физики элементарных частиц (СМ), которая хорошо согласуется с известными экспериментальными данными, должна рассматриваться в качестве приближения. Кроме того, эта модель не учитывает гравитацию. Она не рассматривает неизвестные пока явления, которые могут проявиться на еще более коротких расстояниях.

В квантовой физике вследствие принципа неопределенности существует обратная зависимость между масштабом длины и энергией. Чтобы зондировать пространство на определенном масштабе, необходимо излучение частиц определенной энергии. Чтобы перейти на более короткие расстояния, нам необходимы более высокие энергии частиц. Так что нижний предел масштаба длины, которого мы достигли, определяется верхним пределом энергии процессов, которые мы наблюдаем. Но энергия и масса – это, согласно специальной теории относительности, одно и то же, и, значит, мы исследовали мир лишь до определенной шкалы энергии – и ничего не знаем о частицах слишком массивных, чтобы их наблюдать в нынешних экспериментах на коллайдере. Недостающие в картине мира явления могут включать не только новые виды элементарных частиц, но и неведомые силы. Или может оказаться, что основные принципы квантовой механики неверны и нуждаются в модификации для описания процессов, протекающих на более коротких расстояниях и при больших энергиях. Поэтому мы говорим о СМ как об эффективной теории, не противоречащей эксперименту и позволяющей делать надежные предсказания в определенной области.

Понятие эффективной теории разрушает некоторые привычные понятия вроде простоты и красоты – признаков истинности теории. Поскольку мы не знаем, что может произойти при более высоких энергиях, многие гипотезы за пределами своей области соответствуют той или иной эффективной теории. Эти эффективные теории обладают внутренней простотой, потому что должны согласовываться с наиболее простым и элегантным способом распространения их на неизвестные области. Элегантность общей теории относительности и СМ большей частью объясняется принятием их как эффективных теорий. Простота и красота являются признаками не истины, а слаженной примерной модели, работающей в ограниченной области⁷¹.

⁷⁰ Может быть, нам мешает фазовый переход, который случится, когда ложный вакуум, в котором мы живем, распадется. См.: Coleman, Sidney, and Frank de Luccia *Gravitational Effects on and of Vacuum Decay* // Phys. Rev. D 21:12, 3305–3315 (1980).

⁷¹ Это объясняет, почему падающие тела описывают параболу. Эта кривая удовлетворяет уравнениям, которые просты, потому что требуют лишь двух входных параметров: ускорения свободного падения и начальных скорости и направления движения.

Само наличие понятия эффективности – признак зрелости теории элементарных частиц. Когда мы были молоды, казалось, что законы природы открыты нам. Сейчас, поработав несколько десятилетий со СМ, мы уверены в том, что это верная модель, применимая в ограниченной области, и менее уверены в ее распространении за границы этой области. (Разве это не похоже на нашу жизнь? Когда мы становимся старше, нам проще признаться в собственном незнании чего-либо.)

На первый взгляд это вызывает разочарование. Физика призвана открывать фундаментальные законы, но эффективная теория по определению не такова. Если у вас слишком наивный взгляд на науку, вы, возможно, думаете, что теория не может одновременно быть согласованной со всеми экспериментальными данными и рассматриваться в лучшем случае как приближение к истине. Концепция эффективной теории отражает это тонкое различие.

Она также иллюстрирует прогресс в физике элементарных частиц. Она говорит, что физика – это процесс построения теории, наилучшим образом отражающей реальность. По мере того, как мы в экспериментах продвигаемся все дальше в направлении малых расстояний и больших энергий, мы можем обнаружить новые явления, и чтобы описать их, нам понадобится новая модель. Как и СМ, это будет эффективная теория, пусть применимая в более широкой области.

Понятие эффективности предполагает, что прогресс в физике связан с революциями, изменяющими концептуальные основы нашего понимания природы и при этом сохраняющими достижения прежних теорий. Ньютонова физика может рассматриваться в качестве эффективной теории, применимой в области, где скорости гораздо ниже скорости света и где квантовыми эффектами можно пренебречь. Здесь она останется столь же успешной, как прежде.

Общая теория относительности (ОТО) – еще один пример теории, когда-то претендовавшей на фундаментальное описание природы. Однако она, как сейчас ясно, представляет собой эффективную теорию, например потому, что не описывает квантовые явления. ОТО в лучшем случае является приближением к единой квантовой теории природы и может быть ее частным случаем.

Квантовая механика тоже, скорее всего, является приближением к более глубокой теории. Вот один из признаков этого: ее уравнения линейны. Это означает, что следствия из нее всегда прямо пропорциональны вызвавшему их действию. Любой другой пример, в котором используются линейные уравнения, возникает как аппроксимация к более фундаментальной (но все-таки эффективной) нелинейной теории (в том смысле, что эффекты могут быть пропорциональны действию в более высокой степени). Готов поспорить, что когда-нибудь это произойдет и с квантовой механикой.

Все теории, с которыми мы до сих пор имели дело, были эффективны. Печально сознавать, что они лишь аппроксимации. Мы хотели бы построить фундаментальную теорию, описывающую природу без каких-либо приближений. Но это невозможно, пока мы следуем ньютоновой парадигме. Теории, достойные восхищения – физика Ньютона, ОТО, квантовая механика, СМ, – не могут лечь в основу теории, применимой ко всей Вселенной без аппроксимации. Решение космологической задачи следует искать за рамками ньютоновой парадигмы.

Глава 10

Принципы новой космологии

Мы ищем теорию, которая сможет стать истинной теорией Вселенной. В такой теории не должно быть космологической дилеммы. Она должна быть фоновезависима, то есть не предлагать разделение мира на две части: динамически развивающуюся и составляющую статический фон для первой. Такая теория имеет дело с реальными объектами, которые должны быть определены путем их отношения к остальной реальности и так обуславливать

изменения.

Что мы требуем от истинной космологической теории?

1) *Любая новая теория должна включать все, что мы уже знаем о природе*. Стандартная модель (СМ), общая теория относительности (ОТО) и квантовая механика должны стать частными случаями неизвестной пока космологической теории, когда мы применяем ее на масштабах расстояний и времени гораздо меньших, чем размер и время жизни Вселенной.

2) *Новая теория должна быть научной*. Подлинные объяснения доказывают свою состоятельность, предлагая мириады неожиданных предсказаний. Теория – это не просто красиво рассказанная история. Она должна предлагать конкретные проверяемые предсказания.

3) *Новая теория должна ответить на вопрос “Почему именно эти законы?”* Она должна давать представление о том, как и почему те или иные элементарные частицы и силы, описанные в СМ, отобраны природой. В частности, теория должна объяснить невероятные значения фундаментальных констант, реализованные в нашей Вселенной – такие параметры, как массы элементарных частицы и константы различных взаимодействий, описанных СМ.

4) *Новая теория должна ответить на вопрос “Почему именно эти начальные условия?”* и объяснить, почему наша Вселенная обладает свойствами, которые кажутся необычными на фоне свойств возможных Вселенных, подчиняющихся тем же законам.

Это минимальные требования. Учитывая, что мы говорим о теории Вселенной в целом, коллективная мудрость тех, кто боролся за создание теории мира (среди них Кеплер, Галилей, Ньютон, Лейбниц, Мах и Эйнштейн), диктует, что мы можем требовать большего⁷². Вот моя интерпретация того, чему учат нас великие. Объяснения свойств нашей Вселенной должны зависеть лишь от того, что существует или происходит в пределах Вселенной. За ее пределами не должно выстраиваться логических цепочек. Мы должны требовать соблюдения принципа замкнутости объяснений.

Теория не обязана давать точный ответ на любой вопрос. Должно существовать много вопросов, на которые, как мы верим, мы могли бы ответить, если бы знали о Вселенной больше. *Принцип достаточного основания* Лейбница гласит: должен существовать ответ на любой разумный вопрос, который можно задать о том, почему Вселенная имеет некоторые конкретные особенности. Растет или нет количество вопросов, на которые можно ответить, – важный тест научной теории. Если можно объяснить причины, по которым Вселенная обладает некими особенностями, не объяснимыми прежними теориями, то можно говорить о прогрессе. Принцип Лейбница имеет некоторые следствия, которые помогают ограничить класс космологических теорий. В частности, во Вселенной не должно существовать ничего, что воздействует на другие объекты, не являясь, в свою очередь, объектом их воздействия. Эйнштейн использовал *принцип взаимного воздействия* при создании ОТО взамен ньютоновой теории гравитации. Его смущало, что абсолютное пространство Ньютона определяет движение тел, но тела не оказывают влияния на абсолютное пространство. Абсолютное пространство существовало само по себе. В ОТО взаимоотношения между материей и геометрией пространства взаимны: геометрия определяет, как двигаются тела, а присутствие материи определяет искривление пространства-времени. Также нет ничего, что могло бы повлиять на ход абсолютного времени. Ньютон полагал, что время течет независимо от материи. В ОТО наличие материи влияет на ход часов.

Этот принцип запрещает любое упоминание фиксированных структур на заднем плане,

⁷² Здесь я следую советам Дэвида Финкельштейна, почетного профессора Технологического института Джорджии и одного из величайших физиков современности. Однажды он сказал мне, что для концептуального скачка в физике мы должны обратиться к истории науки последних 400 лет.

свойства которой неизменны независимо от движения материи. Эти структуры – бессознательное физики, неявно формирующее образ наших мыслей, придающее смысл понятиям о мире. Мы думаем, будто знаем, что такое “положение”, поскольку бессознательно полагаем существование абсолютной системы координат. Несколько важных шагов в науке были сделаны через отбрасывание застывших фоновых структур и замену их динамическими, находящимися в пределах Вселенной. Так сделал Мах, когда он отверг концепцию Ньютона, предположив, что при вращении мы чувствуем головокружение потому, что движемся относительно материи во Вселенной, а не относительно абсолютного пространства.

Если мы исключаем существование фоновых структур, мы приходим к тому, что каждый объект во Вселенной развивается динамически, во взаимодействии со всем остальным. Авторство этой концепции, реляционизма, приписывают Лейбницу (см. главу 3). Можно развить эту мысль: свойства космологической теории должны отражать развивающиеся отношения между динамическими сущностями. Но если свойства объекта, с помощью которых мы отличаем его от других объектов, суть отношения с другими объектами, во Вселенной не может существовать двух объектов с одинаковым набором отношений к Вселенной. Два объекта, которые имеют одинаковые отношения к Вселенной, тождественны. Это еще один из принципов Лейбница – *тождество неразличимых*. Это также следствие принципа достаточного основания: если существуют два объекта, одинаковых по отношению к миру, нет причины, по которой они не должны быть взаимозаменены.

Таким образом, в природе не существует фундаментальных симметрий. Симметрии – это трансформация физической системы, перестановка ее частей, при которой все ее физические наблюдаемые величины остаются неизменными⁷³. Примером симметрии ньютоновой физики является перенос подсистемы из одного места в другое. Поскольку законы физики не зависят от того, где находится система, предсказания останутся неизменными, если лаборатория (и все, что может повлиять на результаты эксперимента) перемещается на 6 футов влево. Мы утверждаем независимость экспериментальных результатов от положения в пространстве: физика инвариантна относительно переноса системы.

Симметрии присущи всем известным физическим теориям. Несколько из наиболее полезных инструментов в физике опираются на факт существования симметрий. Но если принципы Лейбница справедливы, симметрии не должны быть фундаментальными.

Симметрии возникают из-за того, что мы рассматриваем подсистемы Вселенной как будто они – все, что существует. Это происходит потому, что мы игнорируем взаимодействие атомов в лаборатории с остальной Вселенной, так что не имеет значения, насколько мы переместим лабораторию в пространстве. Это также объясняет, почему неважно, будем ли мы вращать изучаемую подсистему: мы пренебрегаем взаимодействием между подсистемой и остальной Вселенной. Если бы мы приняли эти взаимодействия во внимание, то, безусловно, вращение подсистемы имело бы значение.

Но что если сама Вселенная перемещается или вращается? Разве это не симметрия? Нет, потому что никакое относительное положение внутри Вселенной при этом не меняется. С реляционной точки зрения нет смысла говорить о перемещающейся или вращающейся Вселенной. Следовательно, симметрии, такие как перемещение и поворот, не фундаментальны. Они происходят от разделения мира на две части (см. главу 9). Эти и другие симметрии отражают лишь свойства приблизительных законов, применяемых к подсистемам во Вселенной.

Но если эти симметрии приблизительны, то таковы и законы сохранения энергии,

⁷³ Необходимо отличать симметрию от калибровочной симметрии. Первая вытекает из физических преобразований, которые оставляют законы природы неизменными. Вторая – это математическая перезапись описания конфигурации системы. Мой довод исключает первую, но не вторую.

импульса и углового момента. Законы сохранения основаны на предположении, что пространство и время симметричны по отношению к переносу во времени, перемещению в пространстве и вращению. Основную теорему о связи между симметриями и законами сохранения в начале XX века доказала Эмми Нетер⁷⁴. Я не буду пытаться повторить здесь ее доказательство. Скажу лишь, что теорема является одним из столпов физики и заслуживает широкой известности.

Поэтому будущая космологическая теория не содержит ни симметрий, ни законов сохранения⁷⁵. Некоторые физики, работающие в области физики элементарных частиц и находящиеся под сильным впечатлением от успеха стандартной модели (СМ), убеждены, что фундаментальная теория должна содержать больше симметрий. Это однозначно не так⁷⁶.

Мы подошли к самому важному вопросу: что будущая теория скажет о природе времени? Будет ли здесь понятие времени устранено, как в ОТО? Будет ли время исчезать и снова возникать лишь при необходимости, как в квантовой космологии Барбура? Или время будет играть в ней важную роль, в отличие от любой теории со времен Ньютона?

Я считаю, что время необходимо в любой теории, отвечающей на вопрос, почему мы имеем дело именно с этими законами. Давайте взглянем еще раз на цитату Чарльза С. Пирса, которого я цитировал выше⁷⁷:

Предполагать, что универсальные законы природы могут быть поняты разумом и однако же не иметь никакого обоснования своим особым формам, оставаясь необъяснимыми и иррациональными, — позиция вряд ли оправданная.

Это соответствует принципу достаточного основания: мы должны быть в состоянии объяснить, почему законы природы, с которыми мы имеем дело, именно таковы. Пирс это подчеркивает:

Единообразие — это и есть те самые факты, которые необходимо объяснять... Закон — это *par excellence* вещь, требующая объяснений.

Это касается вопроса, почему законы таковы. Факты должны быть объяснены, и более всего в объяснении нуждается существование во Вселенной конкретной формы законов. Пирс утверждает, что

единственно возможный путь объяснить законы природы и единообразие в целом — предположить, что они являются результатом эволюции.

Сильное заявление! Пирс не приводит доказательств эволюции законов. Он просто утверждает, что это единственный возможный ответ на вопрос, почему законы именно таковы, каковы они есть. Я не знаю, приводил ли где-нибудь Пирс аргументы, но вот один довод, который он мог бы озвучить.

Наша задача состоит в том, чтобы объяснить, почему объект, в данном случае

⁷⁴ Noether, E. *Invariante Variationsprobleme* // Nachr. v. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, pp. 235–257 (1918).

⁷⁵ Это общие рассуждения подтверждаются в ОТО, примененной к замкнутой Вселенной. В ней нет ни симметрии, ни законов сохранения.

⁷⁶ Роджер Пенроуз давным-давно это говорил. Мы видим на примере теории струн, что чем больше дополнительных симметрий в теории, тем меньше ее предсказательная сила.

⁷⁷ Пер. К. Голубович. — *Прим. пер.*

Вселенная, обладает особыми свойствами, а именно: конкретным спектром элементарных частиц и взаимодействий, описываемых СМ. Эта проблема представляется сложной, потому что мы знаем: СМ с ее конкретными параметрами – лишь один из огромного ряда вариантов законов природы. Как объяснить, почему что-либо обладает особым свойством?

Так как есть множество равнозначных вариантов, ни один принцип не может оправдать существование конкретной формы наблюдаемых законов. Если нет необходимой причины, должна иметься излишняя с точки зрения логической необходимости причина. Может быть, имеют место случаи, в которых был сделан разный выбор. Как мы можем объяснить, как выбор был сделан в случае нашей Вселенной?

Если действительно был реализован лишь один сценарий, этому нет (и не будет) достаточного объяснения: отсутствует логический принцип, определяющий выбор. Принцип достаточного основания требует наличия других Вселенных, изначально наделенных своими законами. То есть должно произойти более одного события, такого как Большой взрыв, в момент которого сделан выбор конкретных законов. Для простоты мы предполагаем, что выбор законов был сделан во время такого драматического события, как наш Большой взрыв, и у нас, конечно, нет доказательств того, что законы природы с тех пор изменились.

Возникает вопрос: как произошел Большой взрыв (событие, во время которого определяется конкретная форма законов)? Здесь мы можем применить принцип объяснимости и причинной замкнутости Вселенной. То есть мы предполагаем, что Вселенная содержит все логические цепочки, необходимые для объяснения в ее пределах. Если мы хотим объяснить, как во время Большого взрыва были отобраны эффективные законы, мы можем сослаться лишь на события до Большого взрыва. Мы можем применить ту же логику к объяснению причин выбора законов во время взрывов до нашего Большого взрыва. Должна, следовательно, существовать бесконечная последовательность взрывов, уходящая в прошлое. Выберем произвольную отправную точку на шкале времени за много взрывов до нашего и проследим за выбором законов. Мы увидим, что по мере приближения к рождению нашей Вселенной законы эволюционировали. Таким образом, мы пришли к выводу Пирса о том, что если мы надеемся объяснить законы природы, то они должны пройти путь эволюции⁷⁸.

Взрывы в прошлом и в будущем могут быть последовательными или параллельными. Мы можем строить гипотезы о том, происходит ли ветвление при параллельном образовании Вселенных и что именно происходит, когда изменяются законы природы. Во всех случаях мы объясним выбор законов, сделанный в последний раз во время Большого взрыва, лишь событиями прежде него. Сценарий такого рода может быть проверен экспериментально. О событиях до Большого взрыва можно судить косвенно – по информации, следам (если таковые имеются). В главах 11 и 18 даны примеры предсказаний в рамках теорий, которые позволяют законам природы эволюционировать до нашего Большого взрыва.

Однако если Большой взрыв не имеет прошлого, выбор законов и начальных условий произволен, и это не позволит провести тесты. Нет возможности провести тесты и в том случае, если подавляющее (или бесконечное) число Вселенных не окажется связано причинно-следственными связями с нашей.

В научной космологии постулирование существования параллельных Вселенных, причинно не связанных с нашей, не поможет объяснить ее свойства. Мы считаем, что построение космологической теории, которая могла бы дать научные предсказания, неизбежно влечет признание того, что законы природы развивались во времени. (Предсказания теории лишь тогда научны, когда они могут быть подтверждены или

⁷⁸ Единственная неточность в выводах Пирса – то, что он понимал под эволюцией. Исследователи утверждают, что он имел в виду что-то вроде естественного отбора по Дарвину. Известно, что Пирс был почитателем Дарвина. Но мы можем предполагать, что под эволюцией он имел в виду изменения во времени в более общем смысле, в соответствии с некоторым динамическим процессом. Для нашей аргументации достаточно того, что научный ответ на вопрос о выборе законов можно получить, лишь если время реально.

опровергнуты экспериментально.)

Мангабейра Унгер излагает это элегантнее⁷⁹. Время либо реально, либо нет. Если времени не существует, законы природы неизменны, и тогда выбор законов необъясним по причинам, которые мы обсуждали выше. Если время реально, то ничто, даже законы, не вечно. Если законы вечны, то мы (в рамках ньютоновой парадигмы) можем воспользоваться ими, чтобы вывести любое свойство будущего мира из состояния, в котором он находился прежде. Иными словами, можно заменить любой физический причинный процесс логической последовательностью. Таким образом, утверждение, что время реально, означает, что законы должны изменяться.

Понятие вневременных законов также нарушает принцип относительности, гласящий, что ничто во Вселенной не действует без того, чтобы самому не испытывать воздействие. Если вы решите, что законы природы являются исключением из этого принципа, вы поставите их вне сферы рационального объяснения. Чтобы объяснить природу законов, мы должны рассматривать их как часть мира, подобно элементарным частицам, на которые те действуют. Это придает им такие свойства, как изменчивость и причинность. Мы еще не пришли к космологической теории, однако если принципы, которые я перечислил, справедливы, мы уже кое-что знаем о ней:

Она должна содержать в качестве приближения то, что мы уже знаем о природе.

Она должна быть научной, то есть делать экспериментально проверяемые предсказания.

Она должна отвечать на вопрос, почему у нас именно такие законы.

Она должна решить проблему начальных условий.

Она не должна содержать ни симметрий, ни законов сохранения.

Она должна быть причинно и логически полной. Она не должна привлекать ничего, что вне Вселенной, для объяснений явлений внутри нее.

Она должна удовлетворять принципам достаточного основания, взаимного воздействия и тождества неразличимых.

Ее физические переменные должны описывать развитие отношений между динамическими сущностями. Не должно существовать фиксированных фоновых структур, в том числе законов, застывших во времени. Следовательно, законы природы должны эволюционировать, а это означает, что время реально.

Принципы – это прекрасно, но нам нужны гипотезы, ведущие к теории, способной к экспериментально проверяемым предсказаниям. Ниже я опишу несколько гипотез и теорий, реализующих эти принципы, и мы увидим, что они действительно позволяют выдвинуть проверяемые гипотезы.

Глава 11

Эволюция законов

Итак, ради прогресса в космологии физика должна отказаться от представления о законах природы как вечных, неизменных – и принять вместо этого гипотезу о том, что они эволюционируют в реальном времени. Этот переход необходим для построения космологической теории, которая объяснит выбор законов природы и начальных условий и предсказания которой экспериментально проверяемы. В этой главе я сравню две теории: с законами, неизменными во времени, и с меняющимися.

Теория, в рамках которой законы эволюционируют, называется *космологическим*

⁷⁹ Роберту Мангабейра Унгер, из рукописи.

естественным отбором. Я разработал ее в конце 80-х годов и опубликовал в 1992 году⁸⁰. Я сделал тогда несколько предсказаний, которые за два десятилетия могли быть опровергнуты экспериментами, но пока этого не произошло. Это, конечно, не доказывает, что теория верна, но с ее помощью, по крайней мере, можно объяснить свойства нашего мира.

В качестве примера вневременной теории я возьму версию сценария с множеством Вселенных – *хаотическую теорию инфляции*, предложенную в 80-х годах Александром Виленкиным и Андреем Линде и достаточно хорошо изученную⁸¹. Хаотическая теория инфляции встречается в разных формах, и это значит, что некоторые из ее гипотез являются настраиваемыми. Для наших целей я выбрал простую форму теории, которая лучше всего подходит для понятия “вечного”: она предлагает вневременную картину мультивселенной. Существуют и другие версии инфляционных мультивселенных, в которых время играет более существенную роль, и при условии, если эти версии будут использовать подлинное понятие эволюционирующих законов, они приобретут некоторые общие черты с космологической моделью естественного отбора.

Одна из причин успеха предсказаний космологических сценариев, учитывающих эволюцию законов, заключается в том, что они не полагаются на *антропный принцип*. Согласно нему мы можем жить лишь во Вселенной, в которой законы и начальные условия ее рождения соответствуют условиям, необходимым для зарождения жизни. Одна из моих задач состоит в опровержении тезиса, будто антропный принцип может сыграть заметную роль в построении теории, обладающей предсказательной силой.

О космологическом естественном отборе я подробно рассказал в первой своей книге, “Жизнь космоса”. Здесь я опишу его в той мере, насколько это необходимо для объяснения того, почему эволюция законов во времени приводит к научному объяснению⁸².

Основная гипотеза космологического естественного отбора состоит в том, что Вселенные воспроизводятся путем рождения новых Вселенных внутри черных дыр. Родившаяся в одной из черных дыр наша Вселенная, таким образом, является потомком другой Вселенной, и каждая черная дыра в нашей Вселенной есть зародыш Вселенной. В рамках этого сценария мы можем применить принципы естественного отбора.

Механизм естественного отбора основан на методах популяционной биологии. Они объясняют, как некоторые параметры системы могут отбираться так, чтобы сделать ее сложнее, чем она могла бы быть.

Для применения естественного отбора к системе необходимо следующее:

Пространство параметров, которые варьируют в популяции. В биологии такими параметрами являются гены. В физике они представляют собой константы стандартной модели (СМ), в том числе массы элементарных частиц и константы связи для фундаментальных взаимодействий. Эти параметры образуют конфигурационное пространство для законов природы – *ландшафт теорий* (в

⁸⁰ Smolin, Lee *Did the Universe Evolve?* // Class. Quant. Grav. 9: 173–191 (1992).

⁸¹ Vilenkin, Alex *Birth of Inflationary Universes* // Phys. Rev. D, 27:12, 2848–2855 (1983); Linde, Andrei *Eternally Existing Self-Reproducing Chaotic Inflationary Universe* // Phys. Lett. B, 175:4, 395–400 (1986).

⁸² Опубликованы несколько статей с критикой космологического естественного отбора. Ответы на эти критические замечания даны в приложении к моей книге “Жизнь космоса” и статьях. См., например: Rothman, T., and G. F. R. Ellis *Smolin’s Natural Selection Hypothesis* // Q. Jour. Roy. Astr. Soc. 34, 201–212 (1993); Vilenkin, Alex *On Cosmic Natural Selection* // arXiv: hep-th/0610051v2 (2006); Harrison, Edward R. *The Natural Selection of Universes Containing Intelligent Life* // Q. Jour. Roy. Astr. Soc. 36, 193–203 (1995); Silk, Joseph *Holistic Cosmology* // Science, 277:5326, 644 (1997); Barrow, John D. *Varying G and Other Constants* // arXiv: gr-qc/9711084v1 (1997). В частности, утверждение, что изменение гравитационной постоянной (при неизменных остальных параметрах) увеличивает число черных дыр, неверно, потому что не учитываются сложные эффекты рождения галактик и звезд, а также эволюции звезд.

популяционной биологии пространство взаимодействия генов и его влияние на приспособленность называется *адаптивным ландшафтом*).

Механизм воспроизводства . Я позаимствовал эту идею у Брайса С. Девитта. Она заключается в том, что черные дыры являются зародышами новых Вселенных. Это следствие гипотезы о том, как в теории квантовой гравитации избавляются от сингулярностей, где начинается и заканчивается время. У этой гипотезы хорошее теоретическое обоснование. В нашей Вселенной очень много черных дыр (не менее миллиарда миллиардов), а это предполагает очень большое число дочерних Вселенных. Можно предположить, что наша Вселенная – сама часть истории, уходящей далеко в прошлое.

Изменчивость . Естественный отбор работает отчасти потому, что гены случайно мутируют или рекомбинируют, так что геном потомства отличается от генома любого из родителей. Можно предположить, что во время рождения всякой Вселенной параметры законов случайно изменяются. Таким образом, можно поставить в ландшафте теорий отметку, соответствующую значениям параметров для данной Вселенной. Получится огромный, постоянно растущий набор точек на ландшафте теорий, представляющих вариации в параметрах законов в мультивселенной.

Приспособленность . В популяционной биологии приспособленность особи, мера ее репродуктивного успеха измеряется числом потомков, которые, в свою очередь, живут достаточно долго, чтобы иметь собственных потомков. Приспособленность Вселенной оценивается тем, сколько в ней “гнездится” черных дыр. Этот показатель зависит от значений параметров. Поскольку породить черную дыру не так-то просто, многие наборы параметров приводят к появлению “бесплодных” Вселенных (вовсе без черных дыр). Другие наборы, напротив, одаривают Вселенные многочисленным потомством. Такие занимают совсем небольшую область в пространстве параметров. Предполагается, что “оазисы” в пространстве параметров окружены гораздо менее “плодородными” областями.

Типичность . Мы предполагаем, что наша Вселенная является типичным представителем семейства Вселенных, аналогично группе потомков после многих поколений. Таким образом, можно предсказать, что наша Вселенная обладает общими для большинства Вселенных свойствами⁸³.

Мощь естественного отбора такова, что на основе этих предположений можно сделать далеко идущие предположения. Основное следствие таково: много поколений спустя большинство Вселенных приобретет набор параметров в очень плодородных областях. И если мы изменим параметры типичной Вселенной, то результатом, скорее всего, явится Вселенная, в которой образуется заметно меньше черных дыр. Поскольку наша Вселенная типична, это должно быть справедливо и в ее отношении.

Это предсказание можно косвенно проверить. Многие возможности изменения параметров СМ приводят к появлению Вселенных без долгоживущих звезд, необходимых для производства углерода и кислорода. А углерод и кислород необходимы для охлаждения газовых облаков, в которых формируются массивные звезды, в свою очередь приводящие к возникновению черных дыр. В результате других изменений параметров ослабляются сверхновые, которые не только ведут к образованию черных дыр, но и выбрасывают энергию в межзвездное пространство. Эта энергия играет важную роль в коллапсе газовых облаков и, следовательно, в образовании черных дыр. Известно по крайней мере восемь способов

⁸³ В биологической эволюции два ландшафта: генов и фенотипов. При применении естественного отбора в физике также имеется два уровня описания. Вероятность воспроизведения Вселенной зависит от значений параметров стандартной модели (СМ) – это аналог фенотипов. Но в фундаментальной теории, такой как теория струн, СМ – это приближенное описание, ее основу составляет выбор более глубоких теорий – это аналог генотипов. В биологии отношения между генотипом и фенотипом могут быть сложны, то же самое верно в физике. Поэтому необходимо различать ландшафт фундаментальной теории, такой как теория струн, и ландшафт параметров СМ.

изменения параметров СМ, ведущих к образованию Вселенных с меньшим количеством черных дыр⁸⁴.

Таким образом, космологический естественный отбор правдоподобно объясняет, почему параметры СМ подстроены под Вселенную, наполненную долгоживущими звездами, которые с течением времени обогатили ее углеродом, кислородом и другими элементами. Параметры, от значений которых в большей или меньшей степени зависит сценарий развития Вселенной, включают массы протона, нейтрона, электрона и электронного нейтрино, а также константы связи четырех фундаментальных взаимодействий. Такое объяснение предполагает максимизацию производства черных дыр, а следствием оказываются пригодные для жизни условия.

Кроме того, гипотеза космологического естественного отбора позволяет сделать несколько прогнозов, которые могут быть подтверждены или опровергнуты с помощью наблюдений, доступных в настоящее время. Так, наиболее массивные нейтронные звезды не могут быть тяжелее определенного предела. Дело в том, что после взрыва сверхновой сохраняется ее ядро, которое коллапсирует либо в нейтронную звезду, либо в черную дыру. Какой из двух сценариев реализуется, всецело зависит от массы ядра. Нейтронные звезды могут существовать, лишь если их масса ниже критического значения. Если гипотеза космологического естественного отбора верна, критическое значение должно быть самым низким из возможных: чем оно ниже, тем больше образуется черных дыр.

Есть несколько возможностей образования нейтронных звезд. Один из вариантов – нейтронная звезда, состоящая просто из нейтронов, и в этом случае значение критической массы будет достаточно высоким (2,5–2,9 массы Солнца). Другая возможность – в ядре нейтронной звезды содержатся экзотические частицы каоны (K -мезоны). Это позволило бы снизить критическую массу по сравнению с чисто нейтронной моделью. Хотя степень этого снижения зависит от деталей теоретического моделирования, различные модели дают критическую массу 1,6–2 массы Солнца.

Если гипотеза космологического естественного отбора верна, мы могли бы ожидать, что природа воспользовалась возможностью поместить каоны в центр нейтронных звезд и так снизить их критическую массу. Оказывается, это могло быть достигнуто в случае, если масса каонов достаточно мала. Это, в свою очередь, достигается снижением массы странного кварка (s -кварка), что не повлияло бы на вероятность образования звезд. Когда был впервые предложен космологический естественный отбор, самая тяжелая из известных нейтронных звезд была тяжелее Солнца менее чем в 1,5 раза. Но недавно обнаружена нейтронная звезда, имеющая массу, равную немногим больше двух солнечных масс. Это могло бы опровергнуть выводы космологического естественного отбора, но теорию удалось спасти. В настоящий момент верхняя теоретическая оценка массы нейтронной звезды в два раза превышает массу Солнца. Однако есть менее точно измеренные нейтронные звезды, масса которых оценивается в 2,5 массы Солнца⁸⁵. Если эти наблюдения подтвердятся, гипотеза космологического естественного отбора будет опровергнута⁸⁶.

⁸⁴ Другие: 1) изменение знака в разнице масс протона и нейтрона; 2) увеличение или уменьшение постоянной Ферми, достаточно большое, чтобы повлиять на энергию и количество материи, выделяющиеся при взрыве сверхновых; 3) увеличение разницы масс нейтрона и протона, массы электрона, массы электрона/нейтрино, постоянной тонкой структуры или достаточно большое уменьшение постоянной сильного взаимодействия с тем, чтобы дестабилизировать углерод (или любое другое изменение, имеющее тот же эффект); 4) увеличение массы странного кварка.

⁸⁵ Lattimer, James M., M. Prakash *What a Two Solar Mass Neutron Star Really Means* // arXiv:1012.3208v1 [astro-ph.SR] (2010).

⁸⁶ В статье о космологическом естественном отборе и “Жизни космоса” я использовал нижнюю оценку критической массы – 1,6 массы Солнца. Когда я узнал о наблюдении нейтронной звезды, масса которой двукратно превышала массу Солнца, я взялся было писать статью о том, что гипотеза космологического

Еще одно предсказание происходит из рассуждений об удивительной особенности ранней Вселенной, структура которой была крайне равномерна. Распределение материи в ранней Вселенной известно из наблюдений за МФИ. Оно изменялось очень незначительно. Почему Вселенная в самом начале не имела больших флуктуаций плотности? Если бы вариации плотности были достаточно велики, раннюю Вселенную заполнили бы первичные черные дыры, что впоследствии привело бы к наличию во Вселенной гораздо большего числа черных дыр, чем есть сейчас. Это, кажется, опровергает гипотезу космологического естественного отбора, которая заключается в том, что никакие незначительные изменения в параметрах законов физики не приведут к состоянию Вселенной с существенно большим количеством черных дыр, чем в нашем мире.

Космологи описывают колебания плотности материи с помощью параметра, называемого *масштабом флуктуации плотности*. Он не является параметром стандартной модели физики элементарных частиц, однако существуют модели ранней Вселенной с настраиваемыми параметрами, что позволяет увеличить масштаб флуктуаций плотности. Совместимо ли это с гипотезой космологического естественного отбора? В большинстве версий инфляционной модели Вселенной имеется параметр, который можно увеличить, чтобы увеличить масштаб флуктуаций плотности и, следовательно, наводнить Вселенную первичными черными дырами. Но в некоторых простейших инфляционных моделях увеличение этого параметра резко ограничивает время, в течение которого Вселенная может расширяться. В результате получаются Вселенные гораздо меньшего объема. Хотя они и наполнены первичными черными дырами, их меньше, чем в нашем мире⁸⁷. Это означает, что космологический естественный отбор совместим лишь с простой теорией инфляции и не оправдывает перепроизводство первичных черных дыр. В случае обнаружения доказательств более сложной теории инфляции гипотеза космологического естественного отбора потеряет силу⁸⁸. Но пока их нет.

Конечно, истинная теория ранней Вселенной может отличаться от инфляционной модели. Но пример показывает, что космологический естественный отбор легко опровергнуть, если обнаружится механизм рождения множества первичных черных дыр на ранней стадии образования Вселенной⁸⁹. Космологический естественный отбор немыслим

естественного отбора опровергнута. Однако посмотрел еще раз на теоретические оценки критической массы и обнаружил, что эксперты по-прежнему позволяют нейтронной звезде с каонами обладать массой в две солнечных массы.

⁸⁷ См.: Linde, A. D. *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Chur, Switzerland: Harwood, 1990. Pp. 162–168, esp. eq. 8.3.17. (См. также: arXiv: hep-th/0503203v1.) Параметр, который может повысить флуктуации плотности – это сила, с которой взаимодействуют частицы, ответственные за расширение Вселенной. Линде показывает на примере простой модели, что увеличение этого параметра приводит к уменьшению размеров Вселенной пропорционально экспоненте от обратного квадратного корня от величины этого параметра взаимодействия. Спасибо Полу Стейнхардту за прояснение этого вопроса.

⁸⁸ Подробнее о космологическом естественном отборе я рассказываю в книге “Жизнь космоса” и других своих работах: *The Fate of Black Hole Singularities and the Parameters of the Standard Models of Particle Physics and Cosmology* // arXiv: gr-qc/9404011v1 (1994); *Using Neutron Stars and Primordial Black Holes to Test Theories of Quantum Gravity* // arXiv: astro-ph/9712189v2 (1998); *Cosmological Natural Selection as the Explanation for the Complexity of the Universe* // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 340:4, 705–713 (2004); *Scientific Alternatives to the Anthropic Principle* // arXiv: hep-th/0407213v3 (2004); *The Status of Cosmological Natural Selection* // arXiv: hep-th/0612185v1 (2006); *A Perspective on the Landscape Problem* // DOI: 10.1007/s10701-012-9652-x arXiv:1202.3373.

⁸⁹ Роджер Пенроуз возразил мне, что геометрия сингулярности черных дыр сильно отличается от начальной космологической сингулярности, поэтому маловероятно, чтобы черные дыры могли быть источником нашей или любой другой Вселенной. Это, очевидно, повод для беспокойства, но проблема может быть решена, если квантовые эффекты играют большую роль в ликвидации сингулярности.

вне контекста, в котором время реально. Одна из причин этого такова: у нашей Вселенной лишь относительно небольшое адаптивное преимущество перед другими, отличающимися небольшими изменениями параметров. Это очень слабое условие. Мы не должны считать, что параметры нашей Вселенной являются самыми оптимальными. Возможны и другие варианты параметров, ведущих к более плодородным Вселенным. Все сценарии предсказывают, что они не могут быть достигнуты путем внесения небольших изменений в нынешние значения параметров.

Таким образом, популяция Вселенных может быть разнообразной, состоящей из видов, и каждый из них более или менее плодороден. Состав популяции всевозможных Вселенных будет постоянно меняться по мере того, как обнаруживаются новые способы достижения более плодородных состояний.

Это метод работает в биологии. Не существует абсолютно приспособленных видов, которые живут всегда. Вместо этого каждая эпоха характеризуется своим набором видов, и каждый из них относительно приспособлен. Жизнь не достигает равновесия. Аналогично любые законы, типичные для популяции Вселенных, будут изменяться по мере развития популяции. Если бы существовало конечное состояние, достигнув которого состав популяции Вселенных остался бы вечным, понятие времени потеряло бы смысл и мы смогли бы сказать, что достигнуто вневременное равновесие. Но естественный отбор не предполагает такого состояния. В сценарии космологического естественного отбора время присутствует всегда.

Кроме того, этот сценарий требует, чтобы время было и универсальным, и реальным. Популяция Вселенных быстро растет, увеличиваясь всякий раз, когда какая-нибудь Вселенная порождает черную дыру. Если мы желаем сделать теоретические предсказания, мы должны установить, сколько Вселенных в каждый момент имеют определенные свойства. Это время должно иметь значение не только в отдельной Вселенной, но и в популяции. Таким образом, нам необходимо понятие времени, картина одновременности в пределах каждой Вселенной по всей популяции⁹⁰.

Сравним это с теорией хаотической инфляции. Ранняя Вселенная быстро расширяется, потому что квантовые поля, соответствующие частицам и их взаимодействиям, находятся в фазе, в которой темная энергия имеет высокую плотность. Это заставляет Вселенную расширяться экспоненциально быстро. Расширение, как правило, прекращается, когда в результате фазового перехода формируется “пузырь”, аналогичный пузырю в кастрюле с кипящей водой. Пузырь содержит газовую фазу воды. В космологическом сценарии “пузырь” содержит фазу квантового поля, в которой недостаточно темной энергии, и поэтому расширение замедляется.

Виленкин и Линде заметили, что в окружающей среде по-прежнему содержится много темной энергии и она будет продолжать быстро расширяться. При этом формируется все больше “пузырей”, которые становятся Вселенными. Они обнаружили, что при определенных условиях этот процесс может продолжаться вечно, потому что инфляционная среда не исчезает, даже если она производит бесконечное число Вселенных. Если так, то наша Вселенная – один из бесконечного множества “пузырей” в вечно расширяющейся среде.

В самом простом варианте, который я предлагаю для целей нашей дискуссии, законы внутри каждого “пузыря” отбираются случайным образом из ландшафта возможных законов⁹¹. Во многих дискуссиях предполагается, что этот ландшафт определяется в рамках

⁹⁰ Заметьте, что идея эволюции законов не требует глобальной одновременности. Изменение законов может произойти в событии, которое влияет лишь на будущие события, связанные с ним причинно-следственной связью. Как описано в главе 6, причинно-следственный порядок соответствует относительности одновременности. Но космологический естественный отбор требует глобального времени, и это противоречит относительности одновременности.

⁹¹ Основанием для этого является то, что масштаб физических процессов при рождении пузырей, как

струнных теорий, но для этого годится любая теория с переменными параметрами, включая стандартную модель (СМ). В простейшем случае пропорции “пузырей”, которые выбирают конкретный закон, постоянны. По мере того, как появляется все больше “пузырей” Вселенных, вероятности для разных законов в популяции остаются такими же. В этом случае время и динамика не играют роли в процессе, в котором в нашей Вселенной устанавливаются законы, отбираемые среди всех (возможно, бесконечного количества) возможностей. Распределение Вселенных (то есть вероятности приобретения Вселенной различных законов или свойств) достигает своеобразного равновесия и остается навсегда. Этот сценарий в некотором смысле вневременной. Это делает его годным для сравнения с космологическим естественным отбором.

Поскольку законы в каждом “пузыре” выбираются случайным образом, Вселенные с точно настроенными законами, необходимыми для жизни, чрезвычайно редки. Поэтому наша Вселенная – атипичный вид в популяции пузырьков Вселенных.

Чтобы сопоставить этот сценарий с наблюдениями, космологам приходится привлекать антропный принцип. Он оставляет крошечную долю гостеприимных Вселенных. Удивительно, но есть много общего в наборах свойств, необходимых в мире для зарождения жизни и для высокой плодовитости в отношении черных дыр. Поэтому космологический естественный отбор и антропный принцип, как оказалось, объясняют одни и те же настройки параметров СМ. Но обратите внимание, как различаются их объяснения. В теории космологического естественного отбора наш мир – типичная Вселенная, и большинство представителей популяции будет иметь похожие свойства, которые характеризуются высокой приспособленностью, а в теории хаотической инфляции такие миры, как наш, встречаются крайне редко. В первом случае мы имеем подлинное объяснение, в последнем – лишь принцип отбора. Две теории различаются и в отношении предсказаний еще не наблюдаемых свойств Вселенной. Космологический естественный отбор уже подразумевает несколько оригинальных предсказаний. А сценарии, основанные на антропном принципе, пока не представили ни одного научного предсказания, которое можно было бы проверить. И я сомневаюсь, что когда-либо представят.

И вот почему. Рассмотрим любое свойство нашей Вселенной. Это свойство либо необходимо для жизни, либо нет. Если верно первое, то это свойство уже объясняется нашим существованием, так как оно должно иметь место в любой из очень малой доли Вселенных с разумной жизнью. Теперь рассмотрим второй класс свойств, которые не требуются для разумной жизни. Поскольку законы в каждом “пузыре” выбираются случайно, эти свойства случайно распределены в популяции Вселенных. Но так как эти свойства не имеют ничего общего с жизнью, они будут распределены случайным образом в коллекции обитаемых Вселенных. Таким образом, теория не дает предсказания относительно того, что мы должны наблюдать в нашей Вселенной.

Масса электрона является хорошим примером свойства первого класса. Есть убедительные свидетельства того, что условия жизни будут ухудшаться, если масса электрона будет резко отличаться от наблюдаемого значения⁹². Пример свойства второго класса – масса топ-кварка (t -кварка). Насколько мы знаем, она может варьировать в большом диапазоне, не затрагивая жизненно важных свойств Вселенной. Следовательно, антропный принцип не может объяснить наблюдаемое значение массы топ-кварка. Теория хаотической инфляции все-таки делает потенциально проверяемое предсказание: кривизна

правило, принимается порядка масштаба Великого объединения, что по крайней мере на 15 порядков больше, чем массы кварков и лептонов стандартной модели. Таким образом, вполне вероятно, что эти легкие фермионы произвольно выбраны при формировании пузыря-Вселенной.

⁹² Carr, B. J., and M. J. Rees *The Anthropic Principle and the Structure of the Physical World* // Nature 278: 605–12 (1979); Barrow, John D., and Frank J. Tipler *The Anthropic Cosmological Principle*. New York: Oxford University Press, 1986.

пространства в каждом “пузыре” Вселенной принимает небольшое отрицательное значение. (При отрицательном значении кривизны пространство изгибается как седло, а при положительной кривизне оно подобно сфере.) Если наша Вселенная появилась как “пузырь” в расширяющейся мультивселенной, кривизна нашего пространства будет немного отрицательной. Это оригинальное предсказание, но существует несколько проблем, связанных с его проверкой. Во-первых, отрицательная кривизна очень близка к нулевой, а нуль трудно отличить от небольшого числа, положительного или отрицательного. Такое значение кривизны лежит в пределах ошибки эксперимента. Даже более точные данные, которые ожидаются в экспериментах, едва ли позволят сказать, является ли искривление равным нулю, слегка отрицательным или слегка положительным. Как и в любом эксперименте, всегда будет присутствовать неопределенность в измерениях. Учитывая это, маловероятно, что какое-либо наблюдение позволит скоро подтвердить или опровергнуть указанное предсказание.

Даже если мы убедимся в том, что пространственная кривизна Вселенной немного отрицательна, это не докажет, что наша Вселенная – одна из огромного набора. Есть много космологических моделей и сценариев, согласующихся с небольшим отрицательным значением кривизны. Один гласит, что наша Вселенная уникальна и является просто решением уравнения Эйнштейна с отрицательной кривизной. Такие решения существуют, и они не требуют инфляции. Другой сценарий предполагает, что в результате инфляции образовалась одна-единственная Вселенная. И ни одно наблюдение не может подтвердить гипотезу о свойствах предполагаемого набора других Вселенных, которые никак не влияют на нашу.

Сценарий хаотической инфляции требует множества всевозможных теорий, и их можно выбрать из огромного количества струнных теорий. То, что и раньше имелся простор для струнных теорий, очевидно из статей Эндрю Строминджера 1986 года, но положение усугубилось в 2003 году, когда было доказано существование астрономического числа (около 10500) струнных теорий с малыми положительными значениями космологической постоянной⁹³. Однако это число хотя и огромно, но измеримо. В 2005 году Вашингтон Тейлор из Массачусетского технологического института и его коллеги смогли найти доказательства существования бесконечного числа струнных теорий с небольшой отрицательной космологической константой⁹⁴.

Южноафриканский физик Джордж Ф. Р. Эллис указал на интересное следствие⁹⁵. Если струнных теорий с небольшой отрицательной величиной космологической постоянной бесконечно много, а с небольшой положительной космологической постоянной – конечное число, следует ждать, что измеренная космологическая постоянная небольшая и отрицательная. Если ее фактическое значение случайно распределено в мультивселенной, то мы, вероятнее всего, живем во Вселенной с отрицательным значением постоянной: их бесконечно больше, чем Вселенных с положительным значением. Это редкий случай надежного предсказания теории струн. Если принять эти предсказания всерьез, то теория неверна, поскольку измеренное значение космологической постоянной является положительным.

Некоторые теоретики предупреждают, что в струнных теориях нас ждут удивительные

⁹³ Kachru, Shamit, et al. *De Sitter Vacua in String Theory* // arXiv: hep-th/0301240 v2 (2003).

⁹⁴ DeWolfe, Oliver, et al. *Type IIA Moduli Stabilization* // arXiv: hep-th/0505160v3 (2005); Shelton, Jessie, Taylor, Washington, and Brian Wecht *Generalized Flux Vacua* // arXiv: hep-th/0607015 (2006).

⁹⁵ Ellis, George F. R., and Lee Smolin *The Weak Anthropic Principle and the Landscape of String Theory* // arXiv:0901.2414v1 [hep-th] (2009).

открытия, так как может быть обнаружен класс бесконечного числа струнных теорий с положительными значениями космологической постоянной. Другой ответ основан на антропном принципе: Вселенные с отрицательным значением космологической постоянной, которые описаны Тейлором и его коллегами, следует исключить из рассмотрения, потому что они непригодны для жизни⁹⁶. Однако единственно необходимое для того, чтобы бесконечное число Вселенных с отрицательной космологической постоянной доминировало над конечным числом Вселенных с положительной постоянной, – это чтобы любая конечная часть первой группы была пригодна для жизни.

Проблема с антропными космологиями следующая: вы всегда можете манипулировать предположениями, когда имеете дело с теоретическими понятиями вроде других Вселенных, в принципе не наблюдаемых⁹⁷. Мы не можем проверить гипотезу о бесконечном числе Вселенных и не можем рассчитать, как распределены свойства среди них. Мы можем спорить, есть ли жизнь во Вселенных, отличных от нашей, но не можем это проверить.

Различие между антропными теориями и теориями естественного отбора можно продемонстрировать на примере космологической постоянной. Как уже отмечалось, эта важная физическая константа была измерена и имеет крошечное положительное значение – в единицах планковской шкалы равное $10-120$]. Загадка в том, почему эта величина так мала. Здесь важно учитывать, что если увеличить космологическую постоянную относительно ее наблюдаемого значения, сохранив все остальные константы, вскоре она достигнет значения, при котором Вселенная расширяется настолько быстро, что галактики не успевают формироваться. Назовем это значение *критическим*. Оно примерно в 20 раз выше наблюдаемого. Почему это важно?

- 1) Галактики необходимы для жизни. Иначе не формируются звезды, а без звезд нет углерода и энергии, необходимой для возникновения сложных структур, в том числе жизни, на планетах.
- 2) Вселенная полна галактик.
- 3) Но, поскольку галактики образуются, космологическая постоянная должна быть меньше критического значения.
- 4) Следовательно, антропный принцип утверждает, что космологическая

⁹⁶ Вселенные с отрицательной космологической постоянной, описанные Вашингтоном Тейлором и коллегами, отличаются от наших в двух отношениях. Во-первых, как утверждают все струнные теории, существуют дополнительные измерения пространства. Они не наблюдаемы, потому что занимают крошечные и компактные объемы, но во Вселенных Тейлора они могут быть очень большими. Это еще сильнее противоречит наблюдениям, чем неправильный знак космологической постоянной, и может рассматриваться как еще одно неправильное предсказание теории струн. Однако вы можете сказать, что жизнь в этих мирах не смогла бы существовать. Почему это так, мне не совсем ясно, потому что существуют сценарии, в которых частицы и силы живут на трехмерных поверхностях (бранах) в дополнительных измерениях. В конфигурации такого рода жизнь может быть совместима с дополнительными измерениями на больших масштабах. Гипотетические миры с отрицательной космологической постоянной также обладают симметрией, которой наш мир не обладает (суперсимметрия). Это может предотвратить образование сложных структур, однако, возможно, в части из них суперсимметрия может быть спонтанно нарушенной, и в этом случае жизнь может процветать и там. Пока струнных теорий с отрицательной космологической постоянной бесконечно больше, чем с положительной (даже если очень небольшая доля первых пригодна для жизни), они будут преобладать над вторыми. Благодарю Бена Фрайфогеля за обсуждение этого вопроса.

⁹⁷ В лучшем случае мы могли бы обнаружить влияние прошлых столкновений других Вселенных с нашей. Эта возможность была изучена, и результаты этого исследования носят односторонний характер. Если бы удалось обнаружить что-то интересное, это могло быть истолковано как столкновение иных миров с нашим, но если ничего не наблюдается (как, кажется, и есть на самом деле), гипотеза не может быть опровергнута. См.: Feeney, Stephen M., et al. *First Observational Tests of Eternal Inflation: Analysis Methods and WMAP 7-Year Results* // arXiv:1012.3667v2 [astro-ph.CO] (2011); Aguirre, Anthony, and Matthew C. Johnson *A Status Report on the Observability of Cosmic Bubble Collisions* // arXiv:0908.4105v2 [hep-th] (2009); Rept. Prog. Phys. 74:074901 (2011).

постоянная должна быть меньше критического значения.

Заметили ошибку? Пункт № 1 справедлив, но не играет роли в аргументации. Она начинается с пункта № 2. Тот факт, что во Вселенной множество галактик, видно из наблюдений. Не имеет значения, возможна без них жизнь или нет. Итак, пункт № 1 можно вычеркнуть. Однако именно он – единственное место в аргументации, где упоминается антропный принцип. Если мы вычеркиваем № 1, антропный принцип не играет никакой роли. Итак, верный вывод – следующий:

4) Следовательно, тот наблюдаемый факт, что Вселенная полна галактик, подразумевает, что космологическая постоянная должна быть меньше критического значения.

Выяснить, ошибочен ли довод, можно, предположив, что космологическая постоянная выше критического значения. Мы не будем оспаривать неуместный пункт № 1. Мы не поставили под сомнение пункт № 2: это факт. Мы могли бы оспаривать лишь умозрительный № 3. Может быть, наш расчет критического значения ошибочен.

В 1987 году Стивен Вайнберг придумал гениальное объяснение низкому значению космологической постоянной, которое не связано с этим заблуждением, но по-прежнему использует антропный принцип⁹⁸. Оно выглядит примерно так. Предположим, что наша Вселенная – одна из огромного набора, в котором значение космологической постоянной случайно распределено между нулем и единицей⁹⁹. Поскольку мы требуем от галактик благоприятных для жизни условий, мы должны обитать в одной из Вселенных с космологической постоянной ниже критического значения. Но мы могли бы жить в любой из них. Ситуация такова, как если бы космологическая постоянная представляла собой случайно выбранное число между нулем и критическим значением. Следовательно, маловероятно, что величина нашей космологической постоянной гораздо меньше критического значения, потому что ничтожная доля чисел в гипотетической шляпе со случайными числами будет иметь настолько малую величину. В нашей Вселенной следует ожидать космологической постоянной того же порядка, что и критическое значение, потому что существует гораздо больше цифр примерно то же масштаба, чем цифр много меньших.

Вайнберг предсказал, что космологическая постоянная должна быть ниже, но в пределах критического значения. Десять лет спустя, когда космологическая постоянная была измерена¹⁰⁰, она составила около 5 % критического значения. Это может произойти примерно в 1 случае из 20, что не так уж маловероятно. Многое в мире случается с вероятностью 1 к 20. Поэтому некоторые космологи утверждают, что успех предсказания Вайнберга может служить доказательством того, что мы живем в мультивселенной.

Проблема в том, что вывод о критическом значении, при превышении которого галактики перестают формироваться, верен, если космологическая постоянная – единственный настраиваемый параметр теории. Но в теориях ранней Вселенной есть и другие параметры, которые могут меняться. Если мы будем изменять некоторые из них одновременно с изменением космологической постоянной, аргумент потеряет силу¹⁰¹.

⁹⁸ Weinberg, Steven *Anthropic Bound on the Cosmological Constant* // Phys. Rev. Lett. 59:22, 2607–2610 (1987).

⁹⁹ В единицах планковской шкалы.

¹⁰⁰ Riess, Adam G., et al. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant* // Astron. Jour. 116, 1009–1038 (1998).

¹⁰¹ Следует с осторожностью относиться к утверждению, будто аргумент Вайнберга подтверждает существование других Вселенных. Это аналогично заблуждению игрока в кости, описанному философом Иэном Хакингом. Предположим, некто вошел в комнату и увидел, что у игрока выпало две шестерки. Можно

Рассмотрим пример, в котором мы будем варьировать размер флуктуаций плотности, определяющий, насколько равномерно была распространена материя в ранней Вселенной. Если бы флуктуации были больше, космологическая постоянная смогла бы принимать значения гораздо выше критического и галактики по-прежнему образовывались бы в областях с большой плотностью, созданных в результате флуктуаций. В этом случае по-прежнему существует критическое значение для космологической постоянной, однако оно вырастает по мере увеличения масштаба флуктуации плотности материи.

Вы можете повторить аргументы, позволив и космологической постоянной, и размерам флуктуаций варьировать в популяции Вселенных. Теперь для каждой Вселенной выберем наугад (в диапазоне, в котором могут формироваться галактики) два числа – для космологической постоянной и для флуктуаций плотности¹⁰². Вероятность случайного выбора, когда оба числа принимают малые значения, снизилась с 1 к 20 до нескольких единиц к 100 тысячам¹⁰³.

Проблема в том, что, поскольку мы не наблюдаем другие Вселенные, невозможно узнать, какие константы меняются в гипотетическом пространстве мультивселенной. Если мы считаем истинным, что в мультивселенной варьирует лишь космологическая константа, то аргумент Вайнберга работает. Если предположить, что и космологическая константа, и размеры флуктуаций варьируют, он работает хуже. В отсутствие независимых доказательств в пользу этих гипотез (если какая-либо из них верна), аргументы не приводят ни к какому выводу.

Утверждение, будто аргумент Вайнберга помог предсказать грубое значение космологической постоянной, ошибочно и из-за другого заблуждения. Это заблуждение, как известно специалистам по теории вероятностей, возникает всякий раз, когда вы произвольно выбираете распределение вероятностей, описывающее ненаблюдаемые сущности, которое не может быть независимо проверено. Аргумент Вайнберга нелогичен, потому что вы можете прийти к другому выводу, делая другие предположения о ненаблюдаемых вещах¹⁰⁴.

Космологический естественный отбор лучше объясняет те же наблюдения, поскольку он дает основание фиксировать и размер флуктуаций, и космологическую постоянную.

было бы поддаться искушению и сделать вывод о том, что кости уже бросили много раз или бросали одновременно во многих местах. Но это было бы ошибкой, поскольку вероятность выпадения двух шестерок каждый раз одна и та же. Хакинг называет это заблуждением игрока в кости: Hacking, Ian *The Inverse Gambler's Fallacy: The Argument from Design. The Anthropic Principle Applied to Wheeler Universes* // *Mind* 96:383 (July 1987), pp. 331–340. См.: doi:10.1093/mind/XCVI.383.331. Джон Лесли возразил, что это заблуждение не касается антропного принципа, потому что мы должны существовать во Вселенной, пригодной для жизни. *Mind* 97:386 (April 1988), pp. 269–272. См.: doi:10.1093/mind/XCVII.386.269. Но довод Вайнберга не о пригодности Вселенной, а лишь о том, будет ли она полна галактик. Мы могли бы жить в мире, где лишь одна галактика. Так что то обстоятельство, что Вселенная полна галактик, не является необходимым.

¹⁰² См.: Garigga, Jaume, and Alex Vilenkin *Anthropic Prediction for Lambda and the Q Catastrophe* // arXiv: hep-th/0508005v1 (2005). Авторы указывают, в частности, что сочетание двух констант работает лучше, когда применяется к аргументу Вайнберга. Оно оказалось равным космологической постоянной, деленной на размер флуктуаций в кубе. Но здесь возникают две проблемы: во-первых, что определяет размер флуктуаций? Во-вторых, как мы уже знаем, с этим доводом все в порядке, когда учитывается только космологическая постоянная. Существует много комбинаций двух констант. Неудивительно, что одна комбинация работает лучше других, и даже если есть довод в ее пользу, это не является доказательством гипотезы о том, что наша Вселенная – лишь один мир в мультивселенной.

¹⁰³ Graesser, Michael L., Hsu, Stephen D. H., Jenkins, Alejandro, and Mark B. Wise *Anthropic Distribution for Cosmological Constant and Primordial Density Perturbations* // hep-th/0407174, Phys. Lett. B600, 15–21 (2004).

¹⁰⁴ Объяснение значения космологической постоянной, сильно отличающейся от значения Вайнберга, дано Рафаэлем Соркиным и его коллегами на основе теории причинных множеств: Maqbool Ahmed et al. *Everpresent Lambda* // arXiv: astro-ph/0209274v1 (2002).

Напомним, что в некоторых простых моделях инфляции размер флуктуаций антикоррелирован с размером Вселенной. Таким образом, чем меньше размер флуктуаций, тем крупнее Вселенная и, следовательно (при прочих равных условиях), тем больше в ней черных дыр. Поэтому размер флуктуаций должен принимать значения около нижней границы диапазона, необходимого для формирования галактик. Это, в свою очередь, подразумевает малое критическое значение космологической постоянной, также соответствующее образованию галактик. Космологический естественный отбор вместе с простой моделью инфляции предсказывает, что и размер флуктуаций, и космологическая константа должны принимать небольшие значения. Этот прогноз не является произвольным и согласуется с наблюдениями.

Антропный принцип, однако, совместим с гораздо меньшей Вселенной, потому что и одной галактики, вероятно, достаточно, чтобы дать шанс разумной жизни. Наблюдения показывают, что большая доля звезд имеет свои планеты, так что одной галактики с множеством планет должно быть достаточно, чтобы гарантировать возникновение жизни по крайней мере на одной из них. Добавление галактик не повышает вероятность возникновения жизни.

Сторонник антропного принципа возразит, что принцип можно спасти, модифицировав: мы скорее всего выберем для обитания Вселенную с большим количеством планет, пригодных для жизни. Это дает основание предпочитать Вселенные как можно более крупные и предполагает низкое значение как флуктуаций плотности, так и космологической постоянной. Это забавно: предсказание теории меняется без изменения каких-либо фактов. Две версии антропного принципа различаются не каким-либо утверждением о мультивселенной, а лишь тем, как мы выбираем Вселенные (к которым, как мы чувствуем, необходимо присмотреться, учитывая, что популяция негостеприимных Вселенных гораздо больше).

“Позвольте! – воскликнет антропный энтузиаст. – Цивилизация в мультивселенной, скорее всего, возникнет в такой Вселенной, в которой уже существует много цивилизаций и, следовательно, во Вселенной с многими галактиками, а не во Вселенной лишь с одной галактикой”. На первый взгляд это разумно, но придется возразить: “Откуда вы знаете?” В мультивселенной может существовать гораздо больше малых Вселенных, чем крупных, так что Вселенная, случайно выбранная цивилизацией, скорее всего, окажется в малой. Какой сценарий верен, зависит от относительного распределения больших и малых Вселенных в мультивселенной, но это нельзя независимо проверить. Теоретики могли бы, вероятно, построить модели, соответствующие разным распределениям размеров Вселенных, но то, что вы можете настроить ненаблюдаемые характеристики сценария, чтобы выбрать соответствующий своей гипотезе, не является доказательством.

При космологическом естественном отборе наша Вселенная – типичный представитель популяции Вселенных, и здесь нет места для настраиваемого принципа, необходимого, чтобы выбрать из нетипичных случаев.

Заметим, что речь идет не о создании Вселенных в черных дырах либо в качестве пузырей в условиях инфляции. Речь о роли времени и динамики в сценариях, позволяющей объяснять известные свойства Вселенной и предсказывать новые. Инфляционная модель могла бы использовать время и длинные цепи перерождений (пузыри в пузырях, которые, в свою очередь, тоже в пузырях), чтобы уйти от антропного принципа и воспользоваться преимуществами космологического естественного отбора.

Дело не только в том, что теория, постулирующая эволюцию во времени, лучше, чем вневременная, описывает наблюдаемые данные. Теория, апеллирующая к эволюции, позволяет делать научные предсказания, а прогнозы, основанные на антропном принципе, подстраиваются в зависимости от нашего желания. Гипотезы, основанные на идее, что законы с течением времени меняются, проще проверить, чем вечные космологические сценарии. Ну а если идея не поддается экспериментальной проверке, то это уже не наука.

Глава 12

Квантовая механика и освобождение атома

Как мы убедились, реальность времени играет ключевую роль в решении проблемы отбора законов физики. Она подтверждает гипотезу о постепенном их изменении. Принимая время за основу, мы можем решить и другую важную задачу: разобраться в квантовой механике. Реальность времени позволяет по-новому ее сформулировать, а также понять, как изменяются законы. Квантовая механика – наиболее успешная из всех когда-либо предложенных физических теорий. Не будь квантовой механики, почти никаких современных цифровых, химических или медицинских технологий не существовало бы. И все же есть веские основания полагать, что эта теория неполна.

Квантовая механика загадочна. Со времени создания этой теории в 20-х годах XX века физики придумывают странные сценарии, иллюстрирующие внутренние проблемы квантово-механической теории. Вот некоторые из идей, призванных раскрыть тайны мира элементарных частиц: одновременно и живые, и мертвые кошки; бесконечное число одновременно существующих Вселенных; действительность, зависящая от того, что измеряется или кто наблюдатель; частицы, которые, находясь друг от друга на гигантском расстоянии, могут обмениваться сигналами со сверхсветовыми скоростями. Дело в том, что квантовая механика не может предсказать исход отдельно взятого опыта. Предсказания здесь имеют лишь статистический смысл.

Еще Эйнштейн утверждал, что квантовая теория неполна, поскольку она не предсказывает, что происходит в каждом конкретном случае. Что именно делает электрон, когда он перескакивает с одного энергетического уровня на другой? Как частицы, разнесенные на большое расстояние, мгновенно обмениваются информацией? Как они могут одновременно находиться сразу в двух местах? Квантовая теория не отвечает на эти вопросы. Тем не менее, она чрезвычайно полезна – отчасти потому, что объясняет гигантское количество экспериментальных данных. Если даже она не способна объяснить, что конкретно происходит на субатомном уровне, она предлагает алгоритм вероятностного предсказания результатов различных экспериментов. И до сих пор этот алгоритм работал безотказно.

Может ли быть теория успешной в плане предсказаний и в то же время некорректной в том смысле, что будущие теории могут полностью изменить ее предположения об устройстве мира? В истории науки такое случалось. Предположения, лежащие в основе механики Ньютона, были опровергнуты квантовой теорией и теорией относительности. Геоцентрическая модель Птолемея служила нам более тысячи лет, хотя и была основана на ошибочной гипотезе. Эффективность еще не гарантирует истинности.

Я пришел к убеждению, что квантовая механика со временем разделит судьбу теорий Ньютона и Птолемея. Возможно, мы не понимаем смысла квантовой теории именно потому, что она не является истинной. Вероятно, это приближение более глубокой теории, которая будет понятнее. Эта другая теория и есть пока неизвестная нам космологическая теория, о которой я пишу. Ключевым моментом здесь также является реальность времени.

Проблемы с пониманием квантовой механики возникают по трем причинам. Во-первых, квантовая теория не отвечает, что конкретно происходит в каком-либо процессе или эксперименте. В противоположность прежним теориям, квантовая механика не объясняет, как протекает процесс в каждый момент. Во-вторых, в большинстве случаев она не предсказывает точно исход опыта. Вместо этого квантовая теория предсказывает вероятность, с которой произойдет то или иное событие. Третьим (и самым трудным) моментом являются понятия измерения, наблюдения или информации, необходимой для формулировки теории. Эти понятия должны рассматриваться на аксиоматическом уровне. Они не могут быть объяснены исходя из фундаментальных предположений квантовой теории. Она не объясняет, как экспериментатор исследует микроскопические системы. На квантово-механическом языке не описываются ни инструменты, при помощи которых мы

воздействуем на систему, ни часы, ни даже мы сами как наблюдатели. Чтобы построить истинную космологическую теорию, мы обязаны распространить ее на Вселенную в целом, включая нас как наблюдателей, измерительные приборы и часы¹⁰⁵.

Занимаясь поисками этой новой теории, мы должны держать в памяти три свойства природы, установленные в рамках квантово-механической теории: *несовместимые вопросы*, *запутанность* и *нелокальность*.

Каждая система обладает некоторым набором свойств: для элементарных частиц это положение в пространстве и импульс¹⁰⁶, а, например, для обуви – ее цвет и высота каблука. В отношении каждого свойства можно задать вопрос: “Где сейчас находится частица?” или “Какого цвета обувь?” Роль эксперимента как раз в том, чтобы, опросив систему, получить ответы на эти вопросы. Если вы желаете полностью описать систему в рамках классической физики, то должны ответить на все вопросы и получить информацию о всех свойствах системы. Но в квантовой теории, получив ответ на один из вопросов, вы попадаете в ситуацию, в которой ответ на второй вопрос получить невозможно.

Так, вы можете спросить, где находится частица или какой у нее импульс, но не можете узнать то и другое одновременно. Нильс Бор назвал это свойство *комплементарностью* (дополнительностью). Это имеют в виду физики, когда говорят о *некоммутативных переменных*. Если бы существовала квантовая мода, цвет обуви и высота каблука могли бы являться несовместимыми свойствами. В классической физике вам не надо выбирать, какое из свойств измерить, а какое оставить как неизмеряемое. И вот вопрос: влияет ли выбор экспериментатора на свойства исследуемой системы?

Запутанность – также чисто квантово-механическое явление: пары квантовых систем могут обладать определенными свойствами, при этом свойства каждой отдельно остаются неопределенными. То есть вопрос об относительных свойствах двух систем имеет определенный ответ, а ответа на вопрос о свойствах каждой системы отдельно нет. Рассмотрим пару квантовых ботинок. Они могут обладать противоположными свойствами: на любой вопрос каждый ботинок даст противоположный ответ. Если вы спросите ботинки об их цвете, левый ответит “белого”, правый – “черного”, и наоборот. Или поинтересуемся высотой каблука: если левый – высокий, правый обязательно окажется низким, и наоборот. Если спросить лишь левый ботинок о высоте каблука, вы услышите (с вероятностью 50 %) “высокий” либо “низкий”. Аналогично, в отношении цвета ботинка ответ будет “белый” либо “черный” (с той же вероятностью). На самом деле, если квантовая пара имеет противоположные свойства, то на любой вопрос о свойствах одного ботинка будет получен случайный ответ, а на вопрос, адресованный паре, будут определенно даны противоположные ответы.

В классической физике свойства пары частиц сводятся к свойствам каждой из них отдельно. Явление запутанности свидетельствует о том, что для квантовых систем это не так. Для наших рассуждений важно, что благодаря запутанности мы можем создавать системы с новыми свойствами. Если мы запутаем две квантовые системы с противоположными свойствами, которые никогда прежде не взаимодействовали, мы создадим новое свойство, которое ранее в природе не встречалось.

Запутанные пары обычно получаются при взаимодействии двух субатомных частиц. Однажды запутавшись, они так и остаются в запутанном состоянии, даже разлетевшись на большое расстояние. И пока одна из этих частиц не взаимодействует с другой системой, пара

¹⁰⁵ Существуют альтернативные взгляды на квантовую теорию, согласно которым она может быть применена для Вселенной в целом. Причины, по которым я считаю этот подход ошибочным, перечислены на сайте.

¹⁰⁶ Импульс для обычных частиц равен их массе, умноженной на скорость. Другим выражением несовместимости измерений является принцип неопределенности, который гласит, что чем точнее измеряется положение частицы в пространстве, тем менее точно мы можем измерить ее импульс, и наоборот.

остается в запутанном состоянии с противоположными свойствами. Здесь мы подошли к третьему, самому поразительному свойству квантовых систем – *нелокальности*.

Мы в Монреале. Возьмем пару запутанных ботинок с противоположными свойствами: левый отправим в Барселону, а правый – в Токио. Экспериментаторы в Барселоне решают определить цвет ботинка. Это решение мгновенно повлияет на цвет токийского ботинка. Как только наблюдатели в Барселоне определили цвет своего ботинка, они могут предсказать, что ботинок в Токио имеет противоположный цвет.

В XX веке мы привыкли к тому, что физическое взаимодействие локально, то есть передача информации из одного места в другое происходит посредством частиц или волн. Согласно специальной теории относительности, любое воздействие распространяется не быстрее скорости света. Получается, что в квантовой физике этот основной постулат теории относительности нарушается.

Нелокальные эффекты в квантовой теории действительно присутствуют, но они не могут быть использованы для передачи информации между Барселоной и Токио. Какое бы свойство обуви ни выбрали для измерения экспериментаторы в Токио, результат измерений будет случаен. Их ботинок будет с одинаковой вероятностью то белым, то черным. Только тогда, когда они узнают, какого цвета ботинок в Барселоне, они смогут убедиться, что пара разного цвета. А чтобы в этом убедиться, необходимо передать информацию из Барселоны в Токио, то есть передать сигнал со скоростью света или медленнее.

Остается, однако, вопрос: как устанавливается корреляция между ботинками в Токио и Барселоне, где экспериментаторы, вскрыв каждый свою посылку, обнаружат, что цвета ботинок противоположны? Можно предположить, что упаковщик в Монреале послал в Токио и Барселону ботинки разного цвета. Однако теория и эксперимент позволяют доказать, что это не так. Корреляция устанавливается в момент вскрытия посылок в Барселоне и Токио.

Предположим, что перед нами большой ящик с обувью. Мы запутали каждую пару так, чтобы свойства ботинок были противоположными. Отправим все левые ботинки в Барселону, а все правые – в Токио. Теперь позволим экспериментаторам в каждом из этих городов выбрать случайным образом свойство каждого ботинка, которое они измеряют, и запомнить результаты этих измерений. Экспериментаторы отправляют данные в Монреаль, где их сопоставляют. Оказывается, чтобы объяснить результаты этого опыта, необходимо предположить существование нелокальных эффектов, благодаря которым свойство ботинка в каждой паре определяется выбором, сделанным при измерении второго ботинка. Примерно такова суть теоремы, доказанной в 1964 году ирландским физиком Джоном С. Беллом и подтвержденной опытами.

Эти вопросы находились в центре внимания физиков 90 лет, с момента появления квантовой теории, и хотя с тех пор было предложено множество подходов, я думаю, что ни один из них не является верным. Странности квантовой теории обусловлены тем, что она сама является частью более общей космологической теории, применимой к малым подсистемам Вселенной. Предполагая реальность времени, мы открываем путь к пониманию квантовой теории и, возможно, к разрешению ее загадок.

Я думаю, реальность времени предлагает новую формулировку квантовой механики¹⁰⁷. Эта новая формулировка спекулятивна. Пока она не приводит к проверяемым экспериментально предсказаниям, и я не могу утверждать, что она верна. Однако она предлагает принципиально иначе взглянуть на физические законы, по-новому реализуя идею о том, что они эволюционируют со временем. И, как мы убедимся, она, вероятно, может быть проверена на опыте.

Но в самом ли деле можно отказаться от неизменных во времени законов, не утратив

¹⁰⁷ Также см.: Smolin, *Lee Precedence and Freedom in Quantum Physics* // arXiv:1205.3707v1 [quant-ph] (2012).

при этом возможности объяснения множества явлений вокруг нас? Мы привыкли к тому, что законы природы имеют детерминистический характер. Одним из следствий детерминизма является отсутствие в мире по-настоящему нового. Все, что происходит, – это перегруппировка в пространстве элементарных частиц с неизменными свойствами согласно вечным законам.

Есть бесконечно много ситуаций, в которых будущее может быть предсказано исходя из прошлого опыта. Проводя эксперимент, который мы многократно ставили с одним и тем же результатом, мы, несомненно, ожидаем снова получить этот результат. (Даже если исход иногда бывает одним, а иногда другим, величина вероятности этих исходов сохранится.) Каждый раз, когда мы бросаем мяч, мы ждем, что он полетит по параболе. Обычно мы говорим при этом, что движение определяется неизменными во времени законами, которые будут действовать в будущем точно так же, как они действовали в прошлом. Таким образом, законы природы не предполагают появления чего-то принципиально нового.

Но действительно ли предположение о постоянстве законов природы во времени необходимо для объяснения того факта, что будущее отражает прошлое? Понятие закона природы необходимо лишь в случае многократного повторения процесса или эксперимента. Но в действительности для этого достаточно чего-то существенно менее строгого, нежели вечный закон. Можно, например, ввести принцип, согласно которому повторяющиеся опыты должны приводить к одному и тому же результату не потому, что существуют законы природы, а потому, что есть *правило прецедента*. Оно объяснило бы все случаи, которые объясняются с помощью детерминистических законов природы, но при этом не запрещало бы появления чего-либо нового, такого, что невозможно предсказать на основе прежних опытов. Это предполагает небольшую степень свободы для возникновения новых состояний и одновременно не противоречит факту получения одних и тех же результатов при многократном повторении эксперимента. Наши суды общего права выносят решения по аналогии с теми, которые были вынесены ранее в подобных случаях. Предполагаю, что нечто подобное происходит и в природе.

Сформулировав эту мысль, я обнаружил, что меня снова опередил Чарльз С. Пирс. Он рассматривал законы природы как меняющиеся со временем привычки:

Все стремится обрести привычное устройство. Атомы и их составляющие, молекулы и группы молекул, короче, любой мыслимый предмет реального мира с большей вероятностью поведет себя так, как вел себя ранее в подобных обстоятельствах, а не наоборот. Эта тенденция сама составляет закономерность, которая постоянно усиливается¹⁰⁸.

Этот принцип важен для истинно новых явлений. Если в природе действительно действует правило прецедента, а не постоянные во времени законы, то в отсутствие прецедента предсказать поведение системы будет невозможно. Если мы получили истинно новую систему, то результаты опытов, проводимых с ней, будет невозможно предсказать исходя из имеющихся в данный момент знаний. Лишь если мы произведем множество копий

¹⁰⁸ Peirce, Charles Sanders *A Guess at the Riddle* / In: *The Essential Pierce, Selected Philosophical Writings* . Ed. Houser, Nathan, and Christian Kloesel. Bloomington IN: Indiana University Press, 1992, p. 277. Пирс редко изъяснялся внятно, поэтому приведу выдержку из Стэнфордской философской энциклопедии (<http://plato.stanford.edu/entries/peirce/#anti>): “Возможный путь, по которому природа развивается и приобретает привычки, был исследован Пирсом с помощью статистического анализа экспериментальных испытаний, на вероятность исходов которых в последующих испытаниях влияют результаты более ранних испытаний. Пирс показал, что, если мы предположим существование слабой регулярности в природе на раннем этапе развития, то результатом в долгосрочной перспективе часто оказывается высокая степень регулярности. Поэтому Пирс предположил, что в далеком прошлом природа была значительно более спонтанной, чем сейчас, и что, в общем, все закономерности в природе эволюционировали. Как и геологические формации или биологические виды, эволюционировали природные закономерности”.

этой системы, начнет работать правило прецедента и предсказания станут возможны.

Если природа такова, то будущее не предопределено. При этом мы по-прежнему имеем возможность опираться на надежные законы природы в случаях с многократным прецедентом.

Можно утверждать, что классическая механика запрещает появление в природе истинно новых состояний, поскольку все, что происходит, есть не что иное, как движение частиц согласно неизменным законам. В квантовой физике не так. Здесь мы можем заменить неизменные законы правилом прецедента. Тому есть два основания. Во-первых, в результате запутанности появляются принципиально новые состояния. Свойство запутанности, наблюдаемое у пары частиц, не является свойством каждой из них. Во-вторых, результат эксперимента с квантовой системой приобретает вероятностный характер в зависимости от внешних условий. Даже если мы знаем все о прошлом этой квантовой системы, мы не сможем надежно предсказать, как она поведет себя при измерении одного из ее свойств.

Эти две особенности поведения квантовых систем позволяют заменить постоянные законы на правило прецедента и таким образом гарантировать, что будущее станет похожим на прошлое. Этот принцип достаточен для сохранения детерминизма там, где он необходим, но подразумевает, что в природе при встрече с новыми свойствами могут возникать новые, применимые к ним законы.

Приведем простой пример действия правила прецедента в квантовой физике: рассмотрим квантовый процесс, в результате которого приготавливается система и затем с этой системой проводятся измерения. Предположим, что этот процесс повторялся много раз. Это дает набор результатов измерений: X раз система ответила на вопрос экспериментатора “да”, Y раз – “нет”. Исход каждого следующего измерения выбирается случайным образом из набора предыдущих результатов. Теперь предположим, что прецедента не было, поскольку система была приготовлена с новым свойством. В этом случае исход измерения не определен, так как он не предопределен ничем в прошлом.

Означает ли это, что природа вольна выбирать исход опыта? Математики Джон Конвей и Саймон Кохен из Принстонского университета предложили (и доказали) теорему о том, что квантовые системы обладают элементом свободы. Мне не очень нравится их название теоремы – *теорема о свободе воли*, – однако оно отражает суть проблемы¹⁰⁹. Теорема применима к системе, состоящей из двух атомов (или другой квантовой системе), которые приготовлены в запутанном состоянии и разнесены туда, где измеряются их свойства. Теорема гласит: предположим, что экспериментаторы вольны выбирать, какое измерение они будут проводить. Тогда и результаты измерений не предопределены.

Эта необходимость не имеет ничего общего со скользкой концепцией свободы воли. Если мы говорим, что у экспериментаторов есть свобода выбора, какие измерения проводить, это значит, что выбор не предопределен их предыдущим опытом. Никакие знания о прошлом опыте экспериментаторов и окружающего мира не помогут нам предсказать их выбор. В этом случае атомы тоже свободны – в том смысле, что никакая имеющаяся информация не поможет предсказать исход измерений одного из их свойств¹¹⁰.

Меня восхищает мысль о том, что элементарные частицы по-настоящему свободны, пусть и в узком смысле. Отсюда следует: нет причины, в силу которой электрон выберет, как поступить, когда над ним проводятся измерения. Таким образом, поведение небольших систем не подчиняется алгоритму. Эта мысль одновременно и радует, и пугает, поскольку

¹⁰⁹ Conway, John, and Simon Kochen *The Free Will Theorem* // Found. Phys., 36:10, 1441 (2006).

¹¹⁰ Стоит упомянуть, что некоторые физики против этого возражают, принимая крайнюю форму детерминизма, согласно которому наблюдатели не свободны выбирать, что им измерять. Исходя из “сверхдетерминистической” точки зрения, мы можем представить корреляции между выбором, который делают наблюдатели, и выбором, который делают атомы. Учитывая это предположение, мы можем отрицать выводы из теоремы Конвея и Кохена, а также теоремы Белла.

гипотеза о том, что поведение атомов свободно и беспричинно, лишает нас надежды получить ответ на любой заданный природе вопрос.

Можем ли мы количественно оценить, сколько свободы имеет природа, если квантовая механика верна? В классической механике такой свободы нет: она описывает детерминистический мир, будущее которого может быть полностью предсказано на основании знаний о прошлом. Статистика и вероятности также играют роль в классическом описании мира, но они лишь отражают степень нашего незнания. При этом мы всегда можем узнать достаточно много, чтобы сделать предсказания.

Из теоремы Конвея и Кохена следует, что квантовые системы обладают степенью истинной свободы. Существует ли теория, в которой природе отводится еще больше свободы? Я задал себе этот вопрос, и найти ответ на него было не так уж трудно. Я опирался на одну из последних работ по основам квантовой теории, которая позволяет точно определить, сколько свободы может иметь квантовая система.

Около 2000 года Люсьен Арди из Оксфордского университета (позднее он перешел в Институт теоретической физики “Периметр”) рассмотрел общий класс теорий, предсказывающих вероятности исходов измерений (не только классическую и квантовую механику, но и много других теорий). Двумя обязательными требованиями, которые Арди предъявлял к теориям, были: самосогласованное использование понятия вероятности и разумное поведение при описании как замкнутой системы, так и комбинации двух или более систем. Оба эти требования вошли в список “разумных аксиом”¹¹¹. Для того чтобы сделать строгое утверждение, каким количеством свободы обладает теория, я использовал аксиомы Арди, доработанные Луисом Масанесом и Маркусом Мюллером¹¹².

Количество свободы выражается через объем информации о системе, необходимой, чтобы точно предсказать ее поведение. Эта информация может быть получена путем создания множества копий системы и проведением над ними измерений. Предсказания, вытекающие из результатов этих измерений, могут все еще носить статистический характер, но они будут самыми точными, насколько это возможно, в том смысле, что никакие дополнительные измерения не помогут их еще уточнить. Для каждой из систем, рассмотренных Арди, имеется конечный объем информации, необходимой для наиболее точного предсказания результата измерений над этой системой. Чем больше измерений системы необходимо сделать для того, чтобы получить максимально точное предсказание ее поведения, тем большей свободой эта система обладает.

Чтобы понять, какое количество свободы здесь подразумевается, мы должны сравнить объем информации, необходимой для предсказания, с некоей мерой этой системы. Одной из полезных мер является количество ответов, которые система может дать на вопросы экспериментатора. В простейшем случае есть выбор одного из двух: если вы спросите о цвете квантовых ботинок, ответом может быть только “белый” или “черный”. А если спросите о высоте каблука, ответом может быть только “высокий” или “низкий”.

Я показал, что квантовая механика максимизирует количество информации, необходимой для выбора. То есть квантовая механика описывает Вселенную, в которой вы можете делать предсказания о поведении систем на статистическом уровне, но при этом эти системы обладают таким количеством свободы, каким может обладать любая физическая система, описываемая с помощью вероятностей. Таким образом, квантовые системы максимально свободны. Соединив правило прецедента с *принципом максимальной свободы*, мы получаем новую формулировку квантовой физики. Эта формулировка не может

¹¹¹ Hardy, Lucien *Quantum Theory from Five Reasonable Axioms* // arXiv: quant-ph/0101012v4 (2001).

¹¹² Masanes, Lluís, and Markus P. Mueller *A Derivation of Quantum Theory from Physical Requirements* // arXiv:1004.1483v4 [quant-ph] (2011). Также см.: Dakic, Borivoje, and Časlav Brukner *Quantum Theory and Beyond: Is Entanglement Special?* // arXiv:0911.0695v1 [quant-ph] (2009).

существовать вне рамок теории, в которой время реально, поскольку она делает различие между прошлым и будущим. Следовательно, мы можем отказаться от неизменных во времени законов природы и при этом не утратить предсказательную силу физической теории.

Вывод о том, что квантовые системы максимизируют свою свободу, основан на работах Арди, Масанеса и Мюллера. Он почти тривиален. Мой собственный вклад в решение проблемы связан с реальностью времени.

Первой реакцией некоторых друзей и коллег, когда я объяснил им свою идею, был смех. Конечно, остаются детали, например объяснение того, как прецедент рождается из первого случая, обладающего полной свободой выбора, как он многократно повторяется и утверждается¹¹³. Однако правило прецедента имеет неприятную особенность. Как система узнает обо всех прецедентах? Посредством какого механизма она выбирает случайный элемент из “сборника прецедентов”? Возможно, для ответа потребуется ввести новый вид взаимодействия, посредством которого система взаимодействует со всеми своими копиями в прошлом.

Принцип не объясняет, как это происходит, и в этом отношении он ничуть не лучше обычной формулировки квантовой механики. В старой формулировке измерение является примитивным понятием. В новой существование квантовой системы того же вида (так же приготовленной, а затем преобразованной) также является примитивным понятием. Но можно задать похожие вопросы и о природе неизменных во времени законов, с помощью которых мы описываем движение и изменения. Откуда электрон “знает”, что он электрон и должен вести себя в соответствии с уравнениями Дирака, а не какими-либо другими? Откуда кварк “знает”, какого он типа и какова должна быть его масса? Каким образом такие неизменные во времени понятия, как законы природы, работают на временной шкале, действуя на каждый отдельный электрон?

Мы привыкли к мысли, что постоянные законы природы действуют на временной шкале, и мы не находим эту мысль странной. Но если подумать, мысль эта основана на сильных метафизических допущениях, далеких от очевидности. Правило прецедента также основано на метафизических допущениях, но они еще менее известны нам, чем заставляющие нас верить в неизменные законы.

Если правило прецедента предполагает новый метафизический подход, то, по-моему, он гораздо экономнее современного подхода к квантовой теории, согласно которому наш мир – один из бесконечного множества существующих. Работая с квантовой теорией, приходится иметь дело с некоторыми очень странными понятиями. Но мы вольны предложить и свое странное понятие, по крайней мере, до тех пор, пока эксперимент не укажет, что один подход к квантовой теории вернее другого. Готов поспорить, что правило прецедента со временем породит новые идеи экспериментов, результаты которых, возможно, укажут физикам путь вне квантовой механики.

Можно возразить, что квантовая механика уже предлагает предсказания поведения систем, обладающих новыми свойствами. Не противоречит ли новая идея этим предсказаниям? Да, противоречит, и это, вероятно, является причиной того, почему она неверна. Предположим, мы произвели в квантовом компьютере новый вид запутанного состояния, не встречавшегося в природе. В квантовой теории вы можете посчитать, как эта запутанная система поведет себя при измерении. Правило прецедента определяет, что эти предсказания не могли быть получены в ходе эксперимента. Это утверждение эквивалентно утверждению о существовании в природе нового взаимодействия или видоизменении уже известных. Такое новое или видоизмененное взаимодействие никто никогда не наблюдал. Отсюда и мой скептицизм.

Но новые виды запутанных состояний возникают крайне редко. Мы лишь учимся их

¹¹³ Маркус Мюллер готовит к публикации работу по этому вопросу.

создавать, и если новая гипотеза верна, результаты экспериментов с квантовым компьютером могут быть неожиданными. По крайней мере, это, возможно, будет истолковано как ошибка эксперимента с квантовым прибором, который произвел новые запутанные состояния. Это также противоречит основной догме редукционизма, согласно которой будущее сложной системы (неважно, насколько сложной) может быть предсказано, если задано взаимодействие между парами элементарных частиц. Но нарушения редукционизма, о которых идет речь, редки и не радикальны. Поэтому я не позволил бы эксперименту решать судьбу теории.

В новом понимании квантовой физики реализуются два критерия космологической теории. Оно удовлетворяет требованию замкнутости (хотя и в ограниченной форме, которая позволяет новым случаям обладать истинной свободой). Правило прецедента гласит, что коллекция уже произошедших случаев определяет исход будущих измерений. Эти случаи реальны. Таким образом, мы имеем лишь влияние реальных случаев в прошлом на реальные случаи, которые произойдут в будущем. Очевидно, что оно также удовлетворяет критерию эволюции законов природы во времени и при этом предполагает, что беспрецедентные измерения не подчиняются известным ранее законам. По мере накопления результатов такого эксперимента выстраивается набор прецедентов. Как только накопится достаточно прецедентов, исход эксперимента будет таким, как будто он подчиняется законам природы.

По мере появления в природе новых состояний появляются и новые законы. Это означает, что наблюдаемые фундаментальные взаимодействия, описываемые в рамках стандартной модели физики частиц, появились одновременно с электронами и кварками при остывании Вселенной вскоре после Большого взрыва.

Это новое предложение не удовлетворяет принципу достаточного основания. В том смысле, в котором квантовые системы являются реально свободными и исход отдельного измерения остается неопределенным, принцип достаточного основания не работает, поскольку нет рационального основания для исхода отдельного эксперимента. Просто не существует обоснования, в какой момент произойдет радиоактивный распад ядра, или обоснования точного исхода любого другого явления, для которого квантовая механика дает лишь предсказания на статистическом уровне.

Какой бы ни была судьба этой новой идеи – как и в случае любой другой спекулятивной идеи, следует ожидать, что она может не оправдаться, – но мы убеждаемся в плодотворности гипотезы о реальности времени. Это не просто метафизика, а гипотеза, способная порождать идеи и помогающая проводить серьезные исследования.

Глава 13

Между теорией относительности и квантовой теорией

Принцип достаточного основания – ключевой в программе расширения физики на масштаб Вселенной: он стремится к рациональному объяснению любого выбора, который делает природа. Свободное, беспричинное поведение квантовых систем этому принципу противоречит.

Можно ли соблюсти его в квантовой физике? Это зависит от того, можно ли распространить квантовую механику на всю Вселенную и предложить наиболее фундаментальное описание природы из возможных – либо квантовая механика служит лишь приближением к другой космологической теории. Если мы сможем распространить квантовую теорию на Вселенную, теорема о свободе воли станет применима в космологических масштабах. Поскольку мы предполагаем, что нет теории фундаментальнее квантовой, мы подразумеваем, что природа по-настоящему свободна. Свобода квантовых систем в космологических масштабах означала бы ограничение принципа достаточного основания, потому что не может быть рационального или достаточного основания для множества случаев свободного поведения квантовых систем.

Но, предлагая расширение квантовой механики, мы совершаем космологическую

ошибку: применяем теорию за границами области, в которой ее можно проверить. Более осторожным шагом было бы рассмотрение гипотезы о том, что квантовая физика является аппроксимацией, действительной лишь для малых подсистем. Чтобы определить, присутствует ли квантовая система где-то еще во Вселенной или можно ли применить квантовое описание в теории всей Вселенной, необходима дополнительная информация.

Может ли существовать детерминистическая космологическая теория, которая сводится к квантовой физике, когда мы изолируем подсистему и пренебрегаем всем остальным в мире? Да. Но это дается высокой ценой. Согласно такой теории, вероятность в квантовой теории возникает лишь по причине пренебрежения влиянием всей Вселенной. Вероятности уступят место определенным предсказаниям на уровне Вселенной. В космологической теории квантовые неопределенности проявляются при попытке описания небольшой части Вселенной.

Теория получила название *теории скрытых параметров*, поскольку квантовые неопределенности устраняются такой информацией о Вселенной, которая скрыта от экспериментатора, работающего с замкнутой квантовой системой. Теории такого рода служат для получения предсказаний для квантовых явлений, согласующихся с предсказаниями традиционной квантовой физики. Итак, подобное решение проблемы квантовой механики возможно. Кроме того, если детерминизм восстанавливается путем распространения квантовой теории на всю Вселенную, скрытые параметры связаны не с уточненным описанием отдельных элементов квантовой системы, а с взаимодействием системы с остальной Вселенной. Мы можем назвать их *скрытыми реляционными параметрами*. Согласно принципу максимальной свободы, описанному в предыдущей главе, квантовая теория является вероятностной и внутренние неопределенности в ней максимальны. Иными словами, информация о состоянии атома, которая нам необходима, чтобы восстановить детерминизм, и которая кодируется в отношениях этого атома со всей Вселенной, максимальна. То есть свойства каждой частицы максимально закодированы с помощью скрытых связей с Вселенной в целом. Задача прояснения смысла квантовой теории в поисках новой космологической теории является ключевой.

Какова цена “входного билета”? Отказ от принципа относительности одновременности и возвращение к картине мира, в которой абсолютное определение одновременности справедливо во всей Вселенной.

Мы должны действовать осторожно, поскольку не желаем вступать в противоречие с теорией относительности, имевшей множество успешных применений. Среди них квантовая теория поля – успешное объединение специальной теории относительности (СТО) и квантовой теории. Именно она лежит в основе стандартной модели физики частиц и позволяет получать множество точных предсказаний, подтверждаемых экспериментами.

Но и в квантовой теории поля не обходится без проблем. Среди них – сложная манипуляция с бесконечными величинами, которая должна быть проделана, прежде чем получить предсказание. Более того, квантовая теория поля унаследовала все концептуальные проблемы квантовой теории и не предлагает ничего нового для их решения. Старые проблемы вместе с новыми проблемами бесконечностей показывают, что и квантовая теория поля является приближением к более глубокой теории.

Многие физики, начиная с Эйнштейна, мечтали выйти за рамки квантовой теории поля и найти теорию, дающую полное описание каждого эксперимента (что, как мы видели, в рамках квантовой теории невозможно). Это привело к неустрашимому противоречию между квантовой механикой и СТО. Прежде чем перейти к возвращению времени в физику, нам необходимо разобраться, в чем состоит это противоречие.

Есть мнение, что неспособность квантовой теории представить картину происходящего в конкретном эксперименте – одно из ее достоинств, а вовсе не дефект. Нильс Бор утверждал (см. главу 7), что цель физики в том, чтобы создать язык, на котором мы можем сообщить друг другу о том, как мы проводили эксперименты с атомными системами и какие получили

результаты.

Я нахожу это неубедительным. Те же чувства у меня возникают, кстати, в отношении некоторых современных теоретиков, убеждающих, будто квантовая механика имеет дело не с физическим миром, а с информацией о нем. Они утверждают, что квантовые состояния не соответствуют физической реальности, а просто кодируют информацию о системе, которую мы как наблюдатели можем получить. Это умные люди, и я люблю поспорить с ними, однако боюсь, что они недооценивают науку. Если квантовая механика – лишь алгоритм предсказания вероятностей, можем ли мы придумать что-либо лучше? В конце концов, что-то же происходит в конкретном эксперименте, и только это есть реальность, называемая электроном или фотоном. В состоянии ли мы описать существование отдельных электронов на математическом языке? Пожалуй, нет принципа, гарантирующего, что реальность каждого субатомного процесса должна быть понятна человеку и может быть сформулирована на человеческом языке или с помощью математики. Но не должны ли мы попытаться? Здесь я на стороне Эйнштейна. Я верю, что есть объективная физическая реальность и нечто, поддающееся описанию, происходит тогда, когда электрон перескакивает с одного энергетического уровня на другой. Я постараюсь построить теорию, способную дать такое описание.

Впервые теорию скрытых параметров представил герцог Луи де Бройль на знаменитом V Сольвеевском конгрессе в 1927 году, вскоре после того, как квантовая механика приобрела свою окончательную формулировку¹¹⁴. Де Бройля вдохновила идея Эйнштейна о дуальности волновых и корпускулярных свойств (см. главу 7). Теория де Бройля разрешила загадку волны-частицы простейшим образом. Он утверждал, что физически существуют и частица, и волна. Ранее, в диссертации 1924 года, он писал, что корпускулярно-волновой дуализм универсален, так что такие частицы, как электроны, также представляют собой волну. В 1927 году де Бройль заявил, что эти волны распространяются, как на поверхности воды, интерферируя друг с другом. Частице соответствует волна. Кроме электростатической, магнитной и гравитационной сил, на частицы действует квантовая сила. Она притягивает частицы к гребню волны. Следовательно, в среднем частицы, скорее всего, будут находиться именно там, но связь эта носит вероятностный характер. Почему? Потому что мы не знаем, где частица находилась сначала. А если так, мы не можем предсказать, где она окажется после. Скрытой переменной в данном случае является точное положение частицы.

Позднее Джон Белл предложил называть теорию де Бройля теорией реальных переменных (*beables*), в отличие от квантовой теории наблюдаемых переменных¹¹⁵. Реальные переменные присутствуют всегда, в отличие от наблюдаемых: последние возникают в результате эксперимента. Согласно де Бройлю, и частицы, и волны реальны. Частица всегда занимает определенное положение в пространстве, даже если квантовая теория не может точно его предсказать.

Теория де Бройля, в которой и частицы, и волны реальны, не получила широкого признания. В 1932 году великий математик Джон фон Нейман опубликовал книгу, в которой доказывал, что существование скрытых параметров невозможно¹¹⁶. Несколько лет спустя Грета Герман, молодой немецкий математик, указала на уязвимость доказательства фон

¹¹⁴ См.: Bacciagaluppi, Guido, and Antony Valentini *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. New York: Cambridge University Press, 2009.

¹¹⁵ См.: Bell, John S. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy*. New York: Cambridge University Press, 2004.

¹¹⁶ Neumann, John von *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin, Julius Springer Verlag, 1932, pp. 167 ff.; Neumann, John von *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996.

Неймана¹¹⁷. По всей видимости, тот совершил ошибку, изначально полагая доказанным то, что желал доказать (то есть выдал предположение за аксиому и обманул себя и других). Но работу Герман проигнорировали.

Прошло два десятилетия, прежде чем ошибку снова обнаружили. В начале 50-х годов американский физик Дэвид Бом написал учебник квантовой механики¹¹⁸. Бом независимо от де Бройля открыл теорию скрытых параметров, но когда он отправил статью в редакцию журнала, то получил отказ: его выкладки противоречили хорошо известному доказательству фон Неймана невозможности скрытых параметров. Бом быстро нашел ошибку у фон Неймана¹¹⁹. С тех пор подход де Бройля – Бома к квантовой механике использовали в своих работах немногие. Это один из взглядов на основы квантовой теории, который обсуждается и сегодня.

Благодаря теории де Бройля – Бома мы понимаем, что теории скрытых параметров представляют собой вариант разрешения парадоксов квантовой теории. Многие черты этой теории оказались присущи любым теориям скрытых параметров.

Теория де Бройля – Бома имеет двойственное отношение к теории относительности. Ее статистические предсказания согласуются с квантовой механикой и не противоречат специальной теории относительности (например, принципу относительности одновременности). Но, в отличие от квантовой механики, теория де Бройля – Бома предлагает больше, нежели статистические предсказания: она дает подробную физическую картину того, что происходит в каждом эксперименте. Волна, которая изменяется во времени, влияет на движение частиц и нарушает относительность одновременности: закон, согласно которому волна влияет на движение частицы, может быть верен лишь в одной из систем отсчета, связанных с наблюдателем. Таким образом, если мы принимаем теорию скрытых параметров де Бройля – Бома как объяснение квантовых явлений, мы должны принять на веру, что есть выделенный наблюдатель, чьи часы показывают выделенное физическое время.

Такое отношение к теории относительности распространяется на любые теории скрытых параметров¹²⁰. Статистические предсказания, которые согласуются с квантовой механикой, согласуются и с теорией относительности. Но любая детальная картина явлений нарушает принцип относительности и будет иметь интерпретацию в системе лишь с одним наблюдателем.

Теория де Бройля – Бома не подходит на роль космологической: она не соответствует нашим критериям, а именно требованию о том, чтобы действия были взаимны для обеих сторон. Волна влияет на частицы, но частица не имеет никакого влияния на волну. Впрочем, существует и альтернативная теория скрытых параметров, в которой эта проблема устранена.

Будучи убежденным, как и Эйнштейн, в существовании в основе квантовой теории иной, более глубокой теории, я со времен учебы изобретал теории скрытых параметров. Каждые несколько лет я откладывал в сторону всю работу и пытался решить эту важнейшую проблему. Много лет я разрабатывал подход, основанный на теории скрытых параметров,

¹¹⁷ Hermann, Grete *Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik* // *Abhandlungen der Fries'schen Schule* (1935).

¹¹⁸ Bohm, David *Quantum Theory*. New York: Prentice Hall, 1951.

¹¹⁹ Bohm, David *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. II* // *Phys. Rev.*, 85:2, 180–193 (1952).

¹²⁰ Valentini, Antony *Hidden Variables and the Large-scale Structures of Space=Time* / In: *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*. Eds. Craig, W. L., and Q. Smith. London: Routledge, 2008. Pp. 125–155.

которую предложил принстонский математик Эдвард Нельсон. Этот подход работал, но в нем присутствовал элемент искусственности: чтобы воспроизвести предсказания квантовой механики, определенные силы приходилось точно сбалансировать. В 2006 году я написал статью, объяснив неестественность теории¹²¹ техническими причинами, и отказался от этого подхода.

Однажды вечером (это было в начале осени 2010 года) я зашел в кафе, открыл блокнот и задумался о своих многочисленных неудачных попытках выйти за рамки квантовой механики. И вспомнил о *статистической интерпретации* квантовой механики. Вместо того чтобы пытаться описывать то, что происходит в конкретном эксперименте, она описывает воображаемую коллекцию всего, что *должно* произойти. Эйнштейн выразил это так: “Попытка представить квантово-теоретическое описание как полное описание отдельных систем приводит к неестественным теоретическим интерпретациям, которые становятся не нужны, если принять то, что описание относится к ансамблям (или коллекциям) систем, а не к отдельным системам”¹²².

Рассмотрим одинокий электрон, вращающийся вокруг протона в атоме водорода. По мнению авторов статистической интерпретации, волна ассоциируется не с отдельным атомом, а с воображаемой коллекцией копий атома. У разных образцов в коллекции электроны имеют разное положение в пространстве. И если вы наблюдаете за атомом водорода, результат окажется таким, как если бы вы случайно выбрали атом из мнимой коллекции. Волна дает вероятность нахождения электрона во всех различных положениях.

Мне эта идея долго нравилась, но теперь показалось сумасшедшей. Как может воображаемый набор атомов влиять на измерения в отношении одного реального атома? Это противоречило бы тому принципу, что ничего за пределами Вселенной не может влиять на то, что находится внутри нее. И я задался вопросом: могу ли я заменить мнимый набор коллекцией реальных атомов? Будучи реальными, они должны существовать где-то. Во Вселенной великое множество атомов водорода. Могут ли они составить “коллекцию”, о которой трактует статическая интерпретация квантовой механики?

Представьте, что все атомы водорода во Вселенной играют в игру. Каждый атом признает, что другие находятся в аналогичной ситуации и имеют похожую историю. Под “аналогичной” я имею в виду, что они будут описаны вероятностно, с помощью такого же квантового состояния. Две частицы в квантовом мире могут иметь одинаковую историю и описываться тем же квантовым состоянием, но различаться в точных значениях реальных переменных, например по своему положению. Когда два атома имеют подобную историю, один копирует свойства другого, в том числе точные значения реальных переменных. Чтобы скопировать свойства, атомам не обязательно находиться рядом.

Это нелокальная игра, но любая теория скрытых параметров обязана выражать тот факт, что законы квантовой физики нелокальны. Хотя идея может показаться бредовой, она менее сумасшедшая, чем представление о воображаемой коллекции атомов, оказывающих влияние на атомы в реальном мире. Я взялся развить эту мысль.

Одно из копируемых свойств – положение электрона относительно протона. Поэтому положение электрона в конкретном атоме будет меняться по мере того, как он копирует положение электронов в других атомах во Вселенной. В результате этих прыжков измерение положения электрона в конкретном атоме окажется эквивалентным тому, как если бы я выбрал атом наугад из коллекции всех подобных атомов, заменяющей квантовое состояние. Чтобы это работало, я придумал правила копирования, которые приводят к предсказаниям

¹²¹ Smolin, Lee *Could Quantum Mechanics Be an Approximation to Another Theory?* // arXiv: quant-ph/0609109v1 (2006).

¹²² Einstein, Albert *Remarks to the Essays Appearing in This Collective Volume* / In: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Ed. P. A. Schilpp. New York: Tudor, 1951. P. 671.

для атома, точно согласующимся с предсказаниями квантовой механики¹²³.

И тут я понял нечто такое, что безмерно меня обрадовало. Что если у системы нет аналогов во Вселенной? Копирование не может продолжаться, и результаты квантовой механики не будут воспроизведены. Это объяснило бы, почему квантовая механика неприменима к сложным системам вроде нас, людей, или кошек: мы уникальны. Это позволило разрешить давние парадоксы, возникающие при применении квантовой механики к большим объектам, например кошкам и наблюдателям. Станные свойства квантовых систем ограничены для атомных систем, потому что последние встречаются во Вселенной в великом множестве. Квантовые неопределенности возникают потому, что эти системы постоянно копируют свойства друг друга.

Я называю это *реальной статистической интерпретацией* квантовой механики (или “интерпретацией белой белки” – в честь белок-альбиносов, изредка встречающихся в парках Торонто). Представьте, что все серые белки похожи друг на друга в достаточной степени и к ним применима квантовая механика. Найдите одну серую белку, и вы, вероятно, скоро встретите еще. А вот мелькнувшая белая белка, кажется, не имеет ни одной копии, и, следовательно, она не квантово-механическая белка. Ее (как меня или вас) можно рассматривать как обладающую уникальными свойствами и не имеющую аналогов во Вселенной.

Игра с прыгающими электронами нарушает принципы специальной теории относительности. Мгновенные скачки через сколь угодно большие расстояния требуют понятия одновременных событий, разделенных большими расстояниями. Это, в свою очередь, подразумевает передачу информации со скоростью, превышающей скорость света. Тем не менее, статистические предсказания согласуются с квантовой теорией и могут быть приведены в соответствие с теорией относительности. И все же в этой картине имеется выделенная одновременность – и, следовательно, выделенная шкала времени, как в теории де Бройля – Бома.

В обеих описанных выше теориях скрытых параметров соблюдается принцип достаточного основания. Есть детальная картина происходящего в отдельных событиях, и она объясняет то, что в квантовой механике считается неопределенным. Но цена этому – нарушение принципов теории относительности. Это высокая цена.

Может ли существовать теория скрытых параметров, совместимая с принципами теории относительности? Нет. Она нарушала бы теорему о свободе воли, из которой следует, что пока выполняются ее условия, невозможно определить, что произойдет с квантовой системой (и, следовательно, что никаких скрытых параметров не существует). Одно из этих условий – относительность одновременности. Теорема Белла также исключает локальные скрытые параметры (локальные в том смысле, что они причинно связаны и обмениваются информацией со скоростью передачи меньшей, чем скорость света). Но теория скрытых параметров возможна, если она нарушает принцип относительности.

Пока мы лишь проверяем предсказания квантовой механики на статистическом уровне, нет необходимости интересоваться, каковы на самом деле корреляции. Но если мы попытаемся описать передачу информации внутри каждой запутанной пары, потребуется понятие мгновенной связи. А если мы попытаемся выйти за рамки статистических предсказаний квантовой теории и перейти к теории скрытых параметров, мы вступим в конфликт с принципом относительности одновременности.

Чтобы описать корреляции, теория скрытых параметров должна принять определение одновременности с точки зрения одного выделенного наблюдателя. Это, в свою очередь, означает, что имеется выделенное понятие положения покоя и, следовательно, что движение абсолютно. Оно приобретает абсолютный смысл, поскольку вы можете утверждать, кто

¹²³ См.: Smolin, Lee *A Real Ensemble Interpretation of Quantum Mechanics* // arXiv:1104.2822v1 [quant-ph] (2011).

относительно кого движется (назовем этого персонажа Аристотелем). Аристотель находится в состоянии покоя, и все, что он видит как движущееся тело – это реально движущееся тело. Вот и весь разговор.

Иными словами, Эйнштейн был неправ. И Ньютон. И Галилей. В движении нет относительности.

Это наш выбор. Либо квантовая механика является окончательной теорией и нет возможности проникнуть за ее статистическую завесу, чтобы достичь более глубокого уровня описания природы, либо Аристотель был прав и выделенные системы движения и покоя существуют.

Глава 14

Теория относительности и возвращение времени

Итак, признание реальности времени открывает новые подходы к пониманию того, как Вселенная выбирает законы, а также способы разрешения затруднений квантовой механики. Однако нам предстоит еще преодолеть серьезное препятствие – сильный довод общей (ОТО) и специальной (СТО) теории относительности в пользу блочной Вселенной. Он сводится к тому, что реальна лишь история Вселенной как вневременное целое¹²⁴.

Доводы в пользу блочной модели основаны на принципе относительности одновременности СТО (см. главу 6). Но если время реально (в том смысле, что настоящее время существует), то все наблюдатели могут согласиться, что существует граница между реальным настоящим и пока нереальным будущим. Это подразумевает универсальное, физическое понятие одновременности, которое включает в себя далекие события во Вселенной. Его можно назвать *выделенным глобальным временем*. Здесь мы сталкиваемся с прямым противоречием между доводом в пользу выделенного глобального времени и принципами теории относительности, не допускающими существования такого времени. Кроме того, как мы видели в главе 13, глобальное время – необходимый ингредиент любой теории со скрытыми параметрами, которая могла бы полностью описать процессы в индивидуальных квантовых системах. Таким образом, налицо противоречие между принципом относительности одновременности и принципом достаточного основания.

Цель настоящей главы – разрешить указанный конфликт в пользу принципа достаточного основания. Это подразумевает отказ от относительности одновременности и принятие противоположного утверждения – о существовании выделенного глобального времени. Заметим, что здесь не требуется отказ от теории относительности в целом. Для этого достаточно ее переформулировать. Главным для разрешения этого конфликта является более глубокое понимание ОТО и новой концепции реальности времени.

Понятие глобального времени подразумевает присутствие во Вселенной некоторого количества наблюдателей с часами. Это означает существование выделенной системы покоя, напоминающей состояние покоя у Аристотеля или эфир в физике XIX века. И то, и другое Эйнштейн разрушил своей СТО. До Эйнштейна эфир был необходим, поскольку световые волны нуждались в среде распространения. Принцип относительности одновременности подразумевает, что эфира нет, как нет и состояния покоя¹²⁵.

Это не только противоречие, но и повод впасть в уныние. Устранение эфира стало триумфом над умственной ленью: так легко жилось в мире Аристотеля! Галилей и Ньютон установили относительность инерциальных систем отсчета, что сделало невозможным

¹²⁴ Уточню: блочной картине не противоречит соображение о том, что законы природы с течением времени меняются, но я утверждаю, что в ее рамках нельзя объяснить, как и почему.

¹²⁵ Многие думают, что гипотеза о существовании эфира была опровергнута в опыте Майкельсона – Морли, но лишь Эйнштейн в 1905 году это понял.

обнаружение выделенного состояния покоя при наблюдении за движением тел. Но идея состояния покоя осталась в умах физиков и, когда им понадобилась среда для распространения света, породила эфир. Лишь Эйнштейн смог отказаться от этих идей. И все-таки, похоже, у нас есть все основания вернуться к идее выделенного глобального времени. То, что это противоречит победе Эйнштейна над эфиром, представляет психологический барьер для принятия доводов в пользу реальности времени (по крайней мере, в моем случае).

Прежде чем говорить о том, как теория может разрешить противоречие, оценим возможности экспериментов. Понятие выделенного глобального времени подразумевает существование выделенного наблюдателя, чьи часы измеряют это время. Это противоречит теории относительности инерциальных систем отсчета, согласно которой нет способа отличить якобы покоящихся наблюдателей от наблюдателей,двигающихся с постоянной, но произвольной скоростью.

Вселенная устроена так, что существует выделенное состояние покоя. Мы это знаем, поскольку видим в телескоп, что подавляющее большинство галактик удаляется от нас во всех направлениях примерно с одной скоростью. Но это верно лишь для одного наблюдателя. Тот же, кто стремительно удаляется от нас, видит другую картину: галактики, которые он догоняет, движутся медленнее тех, что остаются позади. Кроме того, у нас достаточно доказательств того, что галактики равномерно распределены в пространстве. По крайней мере, их расположение усредняется на достаточно больших масштабах, то есть Вселенная одинакова в любом направлении. Отсюда следует, что в каждой точке пространства может находиться один наблюдатель, который видит галактики, удаляющиеся от него с одной и той же скоростью во всех направлениях¹²⁶. Так, с помощью движения галактик в каждой точке пространства можно выбрать выделенного наблюдателя и, следовательно, выделенное состояние покоя. Другой способ выбрать выделенных наблюдателей связан с измерением реликтового или микроволнового фонового излучения (МФИ). Такие наблюдатели регистрируют МФИ с одной и той же температурой во всех направлениях небесной сферы¹²⁷.

К счастью, группы наблюдателей, выбранных первым и вторым способом, совпадают. В среднем галактики находятся в состоянии покоя в той же системе отсчета, в которой МФИ обладает одной и той же температурой независимо от направления. Вселенная устроена так, что существует выделенное состояние покоя. Но это не должно противоречить принципу относительности движения. Теория может иметь симметрию, которая в ее решениях не соблюдается, и, напротив, решения нередко нарушают симметрию теории. Тот факт, что в пространстве нет принципиально предпочтительного направления, не мешает ветру дуть сегодня с севера. Наша Вселенная представляет собой лишь одно из решений уравнений ОТО. И это решение может быть асимметричным, то есть содержать выделенное состояние покоя, при этом не нарушая принцип наличия симметрии в теории. Возможно, наша Вселенная образовалась с самого начала с нарушением симметрии.

С другой стороны, мы хотели бы знать, почему во Вселенной явно существуют выделенные наблюдатели. Это еще один вопрос о том, почему начальные условия Вселенной были особенными. И на этот вопрос ОТО не может ответить (еще один признак того, что она не является полной теорией). Поэтому, возможно, выделенное состояние покоя во Вселенной

¹²⁶ Это можно найти в учебнике по ОТО.

¹²⁷ Предположим, вы двигаетесь на север относительно выделенного наблюдателя. Спектр реликтового излучения в северном направлении будет смещен в синюю область вследствие эффекта Доплера, который увеличивает энергию фотонов и, следовательно, температуру излучения, приходящего с севера. Спектр реликтового излучения с юга, напротив, смещен в красную область, его температура понижена. Поэтому можно сделать вывод, что вы находитесь в движении по отношению к МФИ. И наоборот, наблюдатель, который регистрирует одинаковую температуру МФИ во всех направлениях, может заключить, что он покоится относительно МФИ.

представляет нечто более фундаментальное, чем ОТО.

Если так, то это состояние должно проявиться в других экспериментах. Однако в масштабах меньших, чем космологические, принцип относительности инерциальных систем отсчета тщательно проверен, и множество экспериментальных данных подтверждает предсказания специальной теории относительности. Многие из этих предсказаний можно интерпретировать как проверку того, существует ли выделенное состояние покоя¹²⁸.

Таким образом, наблюдения противоречивы. В самом крупном масштабе получены доказательства существования выделенного состояния покоя, которое должно быть объяснено присутствием чего-либо особенного в начальных условиях Вселенной. А во всех меньших масштабах опыт говорит нам, что принцип относительности верен. Недавно был найден выход. Оказывается, ОТО можно элегантно переформулировать как теорию, в которой присутствует понятие выделенного времени. Это просто иной способ ее представления, но он предлагает новую физически выделенную синхронизацию часов во Вселенной. Более того, выбор синхронизации часов зависит от распределения материи и гравитационного поля во всей Вселенной и поэтому не сводится к ньютонову абсолютному времени. Его также невозможно обнаружить с помощью любых локальных измерений. Поэтому он полностью совместим с принципом относительности для малых подсистем Вселенной.

Эта теория называется формодинамикой¹²⁹. Ее главный принцип: все реальное в физике связано с формой объектов, и все реальные изменения – это просто изменения форм. Размер, в сущности, не имеет значения, и то, что объекты кажутся нам имеющими размер – лишь иллюзия.

Формодинамика появилась благодаря Джулиану Барбуру (см. главу 7). Он большой поклонник реляционной концепции пространства и времени, и работа над формодинамикой началась с его попыток сделать физическую картину мира настолько реляционной, насколько это возможно. В последнее десятилетие он очень продвинулся по этому пути вместе с Ниаом О’Модала и несколькими молодыми коллегами, однако теорию доработали летом и осенью 2010 года трое ученых из института теоретической физики “Периметр”: аспиранты Шон Гриб и Энрике Гомес и постдок Тим Козловски¹³⁰.

¹²⁸ В последние годы справедливость принципа относительности была проверена экспериментально в экстремальных ситуациях, в которых протоны перемещаются в пространстве со скоростью, равной 99999 скорости света. При этой невероятной скорости эффекты теории относительности важны, так как энергия, которой обладают протоны, в 10 миллиардов раз больше энергии, соответствующей их массе. Я не удивился бы, если бы эти эксперименты выявили отклонения от предсказаний теории относительности, так как такие отклонения ожидаются в рамках некоторых подходов к квантовой гравитации примерно при тех же энергиях. Другие недавние наблюдения подтвердили утверждение теории, что все фотоны имеют одинаковую скорость, с такой точностью, что можно было бы зарегистрировать разницу во времени прихода двух фотонов, проделавших расстояние в 10 миллиардов световых лет. Эти результаты разочаровали теоретиков, ожидавших, что квантово-гравитационные эффекты могли бы изменить скорость света на коэффициент, который зависит от энергии фотона. Другой эксперимент с высокой степенью точности подтвердил, что нейтрино имеют такое же ограничение скорости, как и свет (исключая преждевременные сообщения о сверхсветовых нейтрино в 2011 году).

¹²⁹ Другое определение выделенного понятия времени было предложено в ОТО. Какое из них верно, будет решаться путем дальнейшего развития теории и, возможно, с помощью эксперимента. Поэтому мы можем предполагать, что существует привилегированное понятие времени, и оставим открытым вопрос о его происхождении. Также см.: Chopin Soo and Hoi-Lai Yu *General Relativity Without Paradigm of Space-Time Covariance: Sensible Quantum Gravity and Resolution of the Problem of Time* // arXiv:1201.3164v2 [gr-qc] (2012); Ó Murchadha, Niall, Chopin Soo, and Hoi-Lai Yu *Intrinsic Time Gravity and the Lichnerowicz-York Equation* // arXiv:1208.2525v1 [gr-qc] (2012); Ellis, George F. R., and Rituparno Goswami *Space Time and the Passage of Time* // arXiv:1208.2611v3 (2012).

¹³⁰ Gomes, Henrique, Gryb, Sean, and Tim Koslowski *Einstein Gravity as a 3D Conformally Invariant Theory* // arXiv:1010.2481v2 [gr-qc] (2011).

Если вы знакомы с основными положениями теории относительности, вы легко разберетесь и в формодинамике – естественном ее продолжении. Давайте вспомним некоторые аспекты одновременности. Имеет смысл говорить о двух соседних событиях, происходящих одновременно. Мы также можем упорядочить их во времени. Это важно, поскольку одно событие может быть причиной другого. Но когда мы попытаемся упорядочить события, далекие друг от друга, мы увидим, что в этом случае отсутствует абсолютный порядок их следования во времени, о котором все наблюдатели могут прийти к согласию. Для некоторых наблюдателей два события могут быть одновременными, для других первое событие может опережать второе.

Барбур утверждает, что размер ведет себя точно так же. Если у нас имеются два объекта рядом, имеет смысл упорядочить их по размеру: если мышь помещается в коробку, имеет смысл сказать, что мышь меньше коробки. Если у вас два футбольных мяча, имеет смысл сказать, что у них одинаковый диаметр. Эти сравнения имеют физический смысл, все наблюдатели соглашаются с результатом.

Но зададимся вопросом: размер нашей мыши меньше, чем размер мыши в коробке в соседней галактике? Этот вопрос имеет смысл? Все ли наблюдатели согласятся с ответом? Проблема в том, что, поскольку они далеко друг от друга, вы не можете посадить мышь в коробку, чтобы сравнить. Можно переместить коробку ближе к мыши и проверить, помещается ли она в коробку. Но это ответ на другой вопрос, потому что тогда коробка и мышь окажутся в одном месте. Можно ли быть уверенным, что нет физического эффекта расширения всего, что мы перемещаем в нашу Галактику? Не увеличивается ли коробка размером с мышиный глаз настолько, что вмещает мышь целиком? Конечно, мы можем оставить коробку там, где она есть, и вместо этого отправить в другую галактику линейку. Но можно ли быть уверенным, что с линейкой не произойдет обратное, что она не уменьшится по мере продвижения от мыши к коробке?

Эти рассуждения привели Барбура и его коллег к выводу: не стоит сравнивать размеры объектов, удаленных один от другого. Можно сравнить их форму, потому что она произвольно не изменяется. Единственным исключением из относительности размеров является вся Вселенная, объем которой зафиксирован. Это непросто объяснить. Если вы сжали все предметы в одном месте, то в другом, чтобы скомпенсировать сжатие, все настолько же увеличится, и общий объем Вселенной останется прежним.

Хотя формодинамика и радикальна по отношению к размерам, в отношении времени она занимает консервативную позицию: ход времени одинаков во всей Вселенной, и вы не можете изменить его. В ОТО, напротив, размеры объектов остаются неизменными при их перемещении в пространстве, так что имеет смысл сравнивать размеры удаленных друг от друга предметов. При этом в ОТО скорость хода времени относительна. Нет смысла спрашивать, отстают или спешат часы далеко от нас по сравнению с часами рядом: ускорение и замедление далеких часов для различных наблюдателей неодинаковы. Даже если вам удастся синхронизировать свои часы с удаленными, они легко могут рассинхронизироваться, потому что нет физического смысла синхронного хода времени.

Словом, в ОТО размер универсален, а время относительно, а в формодинамике наоборот. Примечательно, что эти две теории эквивалентны друг другу, потому что вы можете (с помощью некоего математического приема, о котором нет нужды здесь рассказывать) заменить относительность времени на относительность размеров. Можно описать историю Вселенной двумя способами: на языке ОТО и формодинамики. Физическое содержание обоих описаний будет одним и тем же, и любой вопрос о количественных наблюдаемых будет иметь один ответ.

Когда история описывается на языке ОТО, определение времени произвольно. Время относительно, и нет смысла говорить о времени в удаленных областях Вселенной. Но когда история описана на языке формодинамики, универсальным понятием является время. Ценой,

которую вы платите за это, является размер, который в этом описании становится относительным, и лишается смысла сравнение размеров объектов, разделенных большим расстоянием.

Как и дилемма “волна – частица” в квантовой теории, это пример дуальности: два описания одного и того же феномена используют два подхода, каждый из которых завершен, но не совместим с другим. Такая двойственность – одно из самых глубоких открытий современной теоретической физики. Она была предложена в несколько иной форме¹³¹ в 1995 году Хуаном М. Малдасеной в контексте теории струн и стала наиболее плодотворной идеей в этой области. Сейчас точная связь между формодинамикой и дуальностью Малдасены остается неясной, но, похоже, она существует¹³².

Хотя в ОТО нет выделенного времени, оно присутствует в дуальной теории. Мы можем использовать тот факт, что обе теории являются взаимозаменяемыми, и перевести время из мира формодинамики в мир теории относительности. Там оно проявит себя в качестве выделенного времени, скрытого в уравнениях¹³³.

Понятие глобального времени подразумевает, что для каждого события в пространстве-времени найдется наблюдатель. Но нет способа определить такого наблюдателя с помощью эксперимента, проведенного в небольшой области. Выбор специального глобального времени определяет то, как материя распределена во Вселенной. При этом эксперименты согласуются с принципом относительности в масштабах меньших, чем Вселенная. Так в формодинамике достигается согласие между экспериментальными подтверждениями принципа относительности и необходимостью глобального времени. Последнее необходимо в теории эволюционирующих законов и для объяснения квантовых явлений с помощью скрытых параметров. Как я отмечал, лишь один количественный параметр не разрешается изменять, когда вы растягиваете или сжимаете шкалу: объем Вселенной. Это придает понятию полного объема Вселенной универсальный смысл и может быть принято за универсальные физические часы. Время вернулось.

Глава 15

Появление пространства

Ничего нет обычнее пространства. Но нет ничего и таинственнее его. Я считаю, что время реально и имеет значение для фундаментального описания природы. А вот пространство, возможно, – иллюзия вроде температуры или давления: полезный способ организации представлений о вещах в больших масштабах, который, однако, едва ли годен для того, чтобы видеть мир как целое.

Теория относительности объединила пространство и время и привела к модели блочной Вселенной, в которой пространство и время понимаются как субъективные способы

¹³¹ Это известно как *AdS/CFT* -соответствие.

¹³² Подробнее о формодинамике см. на сайте.

¹³³ В этой главе я упоминал, что в некоторых симметричных решениях ОТО присутствует выделенное состояние покоя и, следовательно, выделенное время. Этот случай относится только к специальным решениям, в которых выделенное время определяется динамикой форм в общем смысле и присутствует даже в пространстве-времени, не имеющем никакой симметрии. В этих решениях существует слабое ограничение на пространство-время, которое называется слайсингом с постоянной средней кривизной. Считается, что это не препятствует применению теории к космологическому пространству-времени. Это понятие времени является глобальным и динамически определяется гравитационным полем и распределением вещества. Так что это не отступление к абсолютному времени Ньютона. Грубо говоря, выбранные слои пространства-времени минимально изогнуты. В том же смысле, как мыльные пузыри принимают форму, которая сводят к минимуму их кривизну, слои пространства-времени также могут минимизировать свою кривизну.

разделения четырехмерной реальности. Гипотеза о реальности времени освобождает его от ложных ограничений этого объединения. Мы можем развивать идеи о времени, понимая, что оно принципиально отлично от пространства. Отделение времени от пространства освобождает и пространство, открывая путь к его пониманию. Пространство на квантовомеханическом уровне не является фундаментальным понятием, а возникает из более глубокого свойства природы.

То, что мир повседневности организован вокруг “близко” и “далеко”, – следствие двух основных свойств реальности: наличия пространства и *локальности*, подразумевающей, что вещи, оказывающие на нас влияние, должны находиться поблизости от нас. Мир полон вещей, которые представляют для нас опасность или дают шанс ими воспользоваться, но большинство их нас не интересует. Почему? Потому что они далеко. Тигры за морем съели бы нас, если бы им представилась такая возможность. Но здесь нам бояться тигров не стоит. Это – подарок пространства. Почти все, что далеко, может быть проигнорировано.

Представьте мир с множеством объектов безо всякой пространственной организации и представьте, что нечто одно в любой момент может повлиять на нечто другое. Нет расстояний, разделяющих предметы. Мы воспринимаем то, что близко, органами чувств. Но пространство организовано так, что вблизи оказывается не так уж много вещей. Это следствие невысокой размерности пространства. Сколько у вас соседей? Две семьи. А сколько может быть? Две семьи рядом, одна через улицу, одна сзади. Если вы живете в многоквартирном доме, число ближайших соседей вырастет до шести: прибавляем людей, живущих под вами, а еще тех парней сверху, которые смотрят телевизор до трех часов ночи. Число соседей растет пропорционально числу измерений: до 2 соседей – одно измерение, до 4 – два, до 6 – три измерения. Количество соседей вдвое превышает число измерений. И если бы мы жили в 50-мерном пространстве, у нас было бы до 100 ближайших соседей. Но мы застряли в трех измерениях, и если бы мы хотели жить в доме с сотней других семей, дом должен быть большим и большинство соседей не будут близкими. В трехмерном пространстве у нас будут и такие соседи, которых мы никогда не встретим.

Эта проблема возникла при планировании научно-исследовательского института, в котором мы хотели максимизировать возможности взаимодействия людей с разными идеями и интересами. При открытии института “Периметр” там работало всего 7 ученых. Теперь, когда нас больше 100, проблема налицо. Мы, физики-теоретики, пошли бы по пути увеличения размерности пространства, но не смогли найти архитекторов, которые взяли бы за эту задачу¹³⁴.

Итак, мы застряли в низкоразмерном мире. Это самая надежная защита от тигров, бессонницы, соседей с ТВ и других неприятностей, но это и основное препятствие, с которым мы сталкиваемся при попытке расширить свои возможности.

До эпохи высоких технологий то обстоятельство, что поверхность Земли двумерна, изолировало людей друг от друга. Большинство за свою жизнь встречалось лишь с несколькими сотнями людей, живущих на расстоянии пешей прогулки. Они устраивали праздники и ярмарки для взаимодействия (как это сегодня делают ученые) с жителями соседних деревень, а отважные торговцы даже ездили за рубеж. Пространство превратило в путешественников почти всех нас. Теперь мы живем в мире, в котором техника помогает преодолеть ограничения, накладываемые на нас низкоразмерным пространством. Рассмотрим влияние сотовых телефонов. Я могу поднять трубку и заговорить почти с любым на планете: у 5 из 7 миллиардов землян есть сотовый телефон. Это “растворяет” пространство. Мы живем в 2500000000-мерном пространстве, и почти все наши собратья по разуму – одновременно наши ближайшие соседи.

Интернет сделал то же самое. Разделявшее нас пространство “растворено” Сетью. В

¹³⁴ Когда мы объяснили архитекторам из “Сосье и Перрот”, какую площадь должны занимать доски для записей, они предложили построить здание только из шифера и стекла, чтобы мы могли писать где угодно.

сущности, теперь мы живем в пространстве высокой размерности. Все больше людей может жить почти исключительно в высокоразмерном пространстве. Все, что необходимо, – немного больше виртуальной реальности (например, чтобы сотовый телефон создавал голограмму собеседника).

В многомерном мире с неограниченным потенциалом для подключения предоставляется гораздо больше возможностей, чем в физическом мире трех измерений. Представьте детей, воспитанных в высокоразмерном мире, где пространство не играет никакой роли. Они будут видеть мир как огромную сеть, в которой гибкая система связей держит всех на расстоянии шага друг от друга. Представьте теперь, что некто вытащил вилку из розетки. Произошел сбой, и населявшие сеть люди обнаружили, что живут в трех измерениях и большинство их разделено пространством. Число соседей уменьшилось с 5 миллиардов до одного десятка, и почти все они почему-то очень далеко.

Это иллюстрация представления некоторых физиков о пространстве. Мы (и я тоже) считаем, что пространство есть иллюзия и что реальные отношения, которые формируют мир, представляют собой динамическую сеть (почти как интернет или сотовая связь). Мы ощущаем эту иллюзию потому, что отключение большинства возможных связей разделит всех большими расстояниями.

Такая картина возникает в целом классе подходов в квантовой гравитации, где пространство не столь же важно, как время. В их основе лежат фундаментальные квантовые структуры, которые можно определить, не нуждаясь в пространстве. Пространство возникает так же, как термодинамика вытекает из физики атомов. Такие подходы являются фоновезависимыми, потому что не предполагают существование фона с фиксированной геометрией. Наиболее примитивным примером является граф или сеть, которые определяются, по сути, без привязки к пространству.

Первым таким подходом стала теория каузальной динамической триангуляции, предложенная Яном Амбьорном и Ренате Лолл и доработанная их сотрудниками¹³⁵. За ней последовала теория квантовых графов (она предполагает, что фундаментальными сущностями в природе выступают графы) Фотини Маркопулу¹³⁶, развитая ее коллегами¹³⁷. Интуитивная картина, в которой пространство возникает в результате отключения соединений сети, лучше всего подходит для характеристики этого подхода. Третий подход, при котором глобальное время принимается как фундаментальное, но пространство не возникает, предложил Петр Хоравы¹³⁸. Некоторые подходы в теории струн – матрично-модельные – также могут быть описаны этим способом¹³⁹.

¹³⁵ См.: Ambjorn, J., et al. Nonperturbative *Quantum Gravity* // arXiv:1203.3591v1 [hep-ph] (2012); Ambjorn, J., et al. *Emergence of a 4-D world from Causal Quantum Gravity* // Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 131301 [hep-th/0404156].

¹³⁶ Markopoulou, Fotini *Space Does Not Exist, So Time Can* // arXiv:0909.1861v1 [gr-qc] (2009).

¹³⁷ Konopka, Tomasz, Markopoulou, Fotini, and Lee Smolin *Quantum Graphity* // arXiv: hep-th/0611197v1 (2006); Konopka, Tomasz, Markopoulou, Fotini, and Simone Severini *Quantum Graphity: A Model of Emergent Locality* // arXiv:0801.0861v2 (2008); Hamma, Alioscia, et al. *A Quantum Bose-Hubbard Model with Evolving Graph as Toy Model for Emergent Spacetime* // arXiv:0911.5075v3 [gr-qc] (2010).

¹³⁸ Horava, Petr *Quantum Gravity at a Lifshitz Point* // arXiv:0901.3775v2 [hep-th] (2009).

¹³⁹ Banks, T., et al. *M Theory as a Matrix Model: A Conjecture* // arXiv: hep-th/9610043v3 (1997).

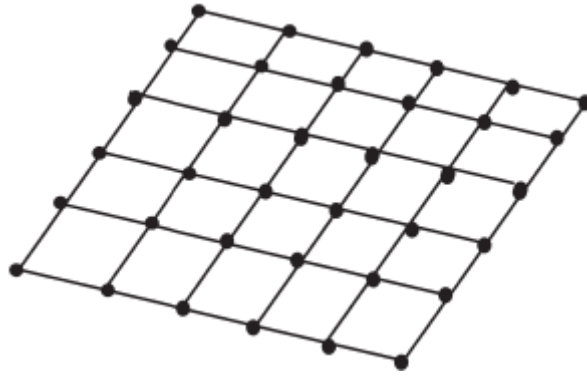


Рис. 13. Пространство в виде решетки. Частица может находиться лишь в одном из узлов, и движение заключается в прыжках от узла к узлу.

Эти подходы, принимающие время как фундаментальное понятие, отличаются от прежних фоновезависимых подходов. Они подразумевают, что пространство-время (как в блочной Вселенной) должно вытекать из более фундаментального описания, в котором ни пространство, ни время не являются простейшими понятиями. Такое описание включает теорию петлевой квантовой гравитации, теорию причинных множеств и некоторые подходы в теории струн.

Представьте, что пространство не непрерывно, а являет собой дискретную решетку из точечных узлов (рис. 13). Частицы “живут” на узлах решетки и могут передвигаться прыжками к соседям. Две частицы оказывают влияние друг на друга, если они оказываются по соседству. Если решетка имеет низкую размерность, то число частиц, доступных для взаимодействия, незначительно. Оно растет вместе с размерностью. Мы можем представить, что фотоны перемещаются по узлам. Чтобы отправить фотон к далекой частице, надо совершить множество прыжков, а это требует времени.

Теперь представьте мир, основанный на сети с множеством дополнительных подключений. Он компактнее в том смысле, что требует меньше шагов и времени для передачи сигнала между узлами.

Один из принципов новой космологии предусматривает, что ничего не действует без того, чтобы самому не испытывать воздействие. Так, если сеть определяет перемещение частиц, не должна ли она меняться? Такой физический мир не слишком отличается от социума. Мир – это динамическая сеть связей. Все, что живет в сети (и сама структура сети), эволюционирует. Так выглядит мир в фоновезависимых подходах в квантовой гравитации.

Теория петлевой квантовой гравитации – первый и наиболее развитый фоновезависимый подход к квантовой гравитации. Здесь пространство описывается как динамическая сеть связей. Типичное квантовое состояние геометрии пространства можно представить в виде графа – фигуры с множеством ребер, соединяющих узлы или вершины (рис. 14). Ребра, которые показывают некие примитивные отношения между узлами, имеют метки с указанием связей между соответствующими узлами. Эти метки могут быть целыми числами: целое число соответствует маркировке ребра. (Узлы также имеют метки, но это более сложное описание.)

Напомним, в квантовой физике энергия атома квантуется и лишь некоторые состояния с определенными дискретными уровнями энергии обладают определенными ее значениями. В теории петлевой квантовой гравитации области пространства также квантуются и могут иметь лишь определенные дискретные значения объема. Квантуются и площади поверхностей¹⁴⁰. Петлевая квантовая гравитация дает точные предсказания для спектров

¹⁴⁰ Эксперты могут сказать, что объем и площадь не являются физическими характеристиками, поскольку они не инвариантны относительно диффеоморфизма пространства-времени. Но бывают случаи, когда они выступают физическими характеристиками – либо потому, что являются свойствами границ, на которых зафиксирован диффеоморфизм, либо потому, что зафиксирована шкала и физическое описание эволюции системы дается при помощи гамильтониана.

объемов и площадей, которые можно экспериментально проверить. Например, отсюда следуют точные предсказания для спектров излучения, исходящего от маленьких черных дыр¹⁴¹.

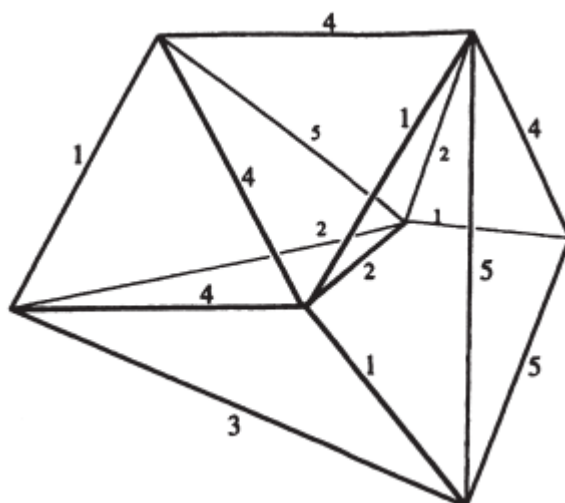


Рис. 14. Типичное состояние квантовой геометрии пространства в виде графа.

Возьмем швейную иглу. Она гладкая. При этом известно, что она сложена из атомов, организованных в кристаллическую решетку (и это видно в микроскоп). Пространство видится “гладким”, но если верна теория петлевой квантовой гравитации, оно состоит из блоков – “атомов” пространства. Если бы мы могли наблюдать природу на планковских масштабах, то увидели бы: гладкость пространства трансформируется именно так.

В общей теории относительности (ОТО) геометрия пространства становится динамичной. Она меняется во времени в соответствии с перемещением материи или распространением гравитационных волн. Но если на планковских масштабах геометрия пространства действительно имеет квантовую природу, то изменения в ней должны вытекать из изменений на таких же масштабах. В квантовой геометрии должны, например, возникать колебания пространства, соответствующие прохождению гравитационных волн. Триумф петлевой квантовой гравитации состоит в том, что динамика пространства-времени, которая описывается уравнениями ОТО, может быть закодирована в простых правилах эволюции графов (рис. 15)¹⁴².

¹⁴¹ См.: Barrau, Aurelien, et al. *Probing Loop Quantum Gravity with Evaporating Black Holes* // arXiv:1109.4239v2 (2011).

¹⁴² В какое время? Любое! В теории петлевой квантовой гравитации время является произвольным, так как оно возникает в результате квантования ОТО.

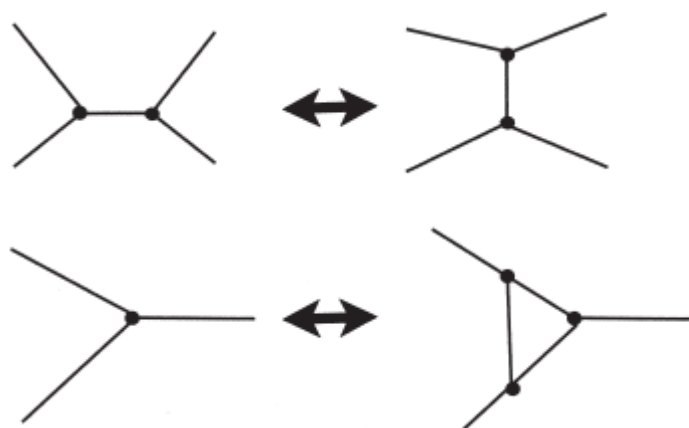


Рис. 15. Правила эволюции графов во времени в петлевой квантовой гравитации. Каждое движение может действовать на отдельные части графика, как показано на рисунке.

Это преобразование уравнений Эйнштейна в правила изменения графов работает в обоих направлениях. Вы можете начать с теории Эйнштейна и преобразовать классическую теорию в квантовую. Эта процедура испытана на множестве теорий. Применить ее к ОТО технически сложно, однако если эта задача решена верно, складывается картина с четкими правилами изменения графов во времени. Мы называем петлевую квантовую гравитацию “квантовой ОТО”¹⁴³.

Или же можно начать с квантовых правил для изменения графов во времени и потребовать, чтобы в качестве приближения к ним соблюдались правила классической ОТО. Это аналогично выводу уравнений, описывающих поток воды, из фундаментальных законов, которым подчиняются атомы в воде. Это упражнение называется построением классической физики исходя из классического предела квантовой механики. Это сложно, но в последнее время ученые достигли успехов в построении теории петлевой квантовой гравитации¹⁴⁴, где используется пространственно-временной подход к квантовому пространству-времени: модель спиновой пены (в которой геометрия пространства считается частью сети, охватывающей пространство и время). Спиновая пена предлагает квантовую версию блочной картины Вселенной, в которой пространство и время объединены. Особенно впечатляет, что некоторые независимые результаты показывают, как из ОТО возникают модели спиновой

¹⁴³ В оригинальном подходе к петлевой квантовой гравитации граф рассматривался в простейшем трехмерном пространстве. Все, что могло быть измерено (длина, площадь, объем), не было зафиксировано. Зато были зафиксированы размерность пространства, его связанность или топология. (Под топологией мы подразумеваем то, как пространство связано. Топология не изменяется, когда форма претерпевает изменения без разрывов.) Топологию легче всего объяснить на примерах и визуализировать в двух измерениях. Рассмотрим замкнутую двумерную поверхность. Это может быть сфера или поверхность тора (бублика). Вы можете плавно деформировать сферу, но не можете плавно перевести сферу в тор. Другие топологии двумерных поверхностей могут напоминать пончики с многочисленными отверстиями. Как только мы зафиксируем топологию пространства, мы можем рассмотреть способы, с помощью которых граф может быть погружен в него. Например, ребра графа могут быть связаны узлом, заплетены или как-то иначе связаны друг с другом. Каждый из способов встраивания графа в пространство соответствует различным квантовым состояниям геометрии (хотя в большинстве современных работ по квантовой гравитации графы определяются без указания на эти способы).

¹⁴⁴ См.: Han Muxin and Zhang Mingyi *Asymptotics of Spinfoam Amplitude on Simplicial Manifold: Lorentzian Theory* // arXiv:1109.0499v2 (2011); Magliaro, Elena, and Claudio Perini *Emergence of Gravity from Spinfoams* // arXiv:1108.2258v1 (2011); Bianchi, Eugenio, and Ding You *Lorentzian Spinfoam Propagator* // arXiv:1109.6538v2 [gr-qc] (2011); Barrett, John W., Dowdall, Richard J., Fairbairn, Winston J., Hellmann, Frank, and Roberto Pereira *Lorentzian Spin Foam Amplitudes: Graphical Calculus and Asymptotics* // arXiv:0907.2440; Conrady, Florian, and Laurent Freidel *On the Semiclassical limit of 4d Spin Foam Models* // arXiv:0809.2280v1 [gr-qc] (2008); Smolin, Lee *General Relativity as the Equation of State of Spin Foam* // arXiv:1205.5529v1 [gr-qc] (2012).

пены. Далее несложно добавить материю в квантовую геометрию пространства. Это делается как и в решеточной модели, но теперь может меняться сама решетка. Мы можем поместить частицы в узлы или вершины. Частицы перемещаются от узла к узлу по граням решетки, как и в решеточной модели. Если вы взглянете на все это издали, то не увидите ни узлов, ни графов, а лишь непрерывную гладкую геометрию пространства. Частицы будут выглядеть так, как будто они перемещаются в пространстве. Так что, возможно, когда мы бросаем мяч, это атомы мяча перепрыгивают в пространстве.

Но как бы ни были важны результаты, показывающие возникновение ОТО из петлевой квантовой гравитации, они ограничены. В некоторых случаях описание ограничивается небольшой областью пространства-времени. Наличие границы говорит, что петлевая квантовая гравитация годится для описания небольшой области пространства-времени и, следовательно, вписывается в рамки ньютоновой парадигмы. В теории струн также предполагается, что пространство-время может возникать в ограниченной области, по крайней мере тогда, когда космологическая постоянная принимает отрицательное значение. Такие результаты получаются в контексте дуальности ОТО и масштабно-инвариантной теории Хуана М. Малдасены (см. главу 14). Если это предположение верно (а многие результаты его подтверждают), то классическое пространство-время может возникать в областях, граница которых обладает фиксированной классической геометрией.

Таким образом, и теория петлевой квантовой гравитации, и теория струн предполагают, что квантовая гравитация описывает ограниченные области пространства-времени и уместается в рамки ньютоновой парадигмы. Наиболее впечатляющие результаты достигнуты в контексте физики “в ящике”, не рассматривающей вопрос расширения теории до масштабов Вселенной.

Еще одно предположение петлевой квантовой гравитации, приводящее к появлению пространства-времени, таково: графы, описывающие квантовую геометрию пространства, ограничены его низкой размерностью¹⁴⁵. В этом случае каждая вершина (или узел в графе) связана с небольшим числом других вершин. (Как и в пригороде, каждый транспортный узел имеет лишь несколько ближайших соседей.) Перемещаясь между двумя узлами, разнесенными на большое расстояние, частице приходится совершить много прыжков. Частице или кванту, несущим информацию, потребуется немало времени, чтобы пройти этот путь. Так возникает описание мира с конечной скоростью света. Однако существует много состояний квантовой геометрии, в которых версия локальности не наблюдается. Есть графы, в которых каждый узел связан со всеми остальными всего несколькими шагами. Но подобную квантовую геометрию пока не удастся описать в рамках петлевой квантовой гравитации.

Рассмотрим пример с двумя пространственными измерениями. Это большая область плоскости (рис. 13). Плоскость может быть представлена на языке квантовой геометрии в виде графа. Рассмотрим два узла, которые расположены в графе на расстоянии многих шагов друг от друга, и назовем их Тед и Мэри. Мы можем построить новый граф, который отличается добавлением ребра, непосредственно связывающего Теда и Мэри (рис. 16). Этот граф изображает квантовую геометрию, в которой Мэри и Тед являются соседями. Это как если бы оба они только что купили сотовые телефоны и пространство, разделяющее их, сжалось.

¹⁴⁵ Дуальная триангуляция трехмерного многообразия.

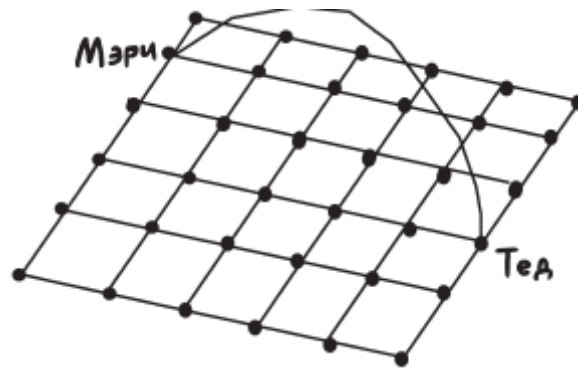


Рис. 16. Дополнительная нелокальная связь нарушает локальность, сближая две точки, разнесенные в пространстве на большое расстояние.

Если геометрия действительно имеет квантовую природу, то, возможно, в нашей наблюдаемой Вселенной 10180 узлов: один узел в масштабе планковской длины. Если каждый узел связан лишь с ближайшими соседями, квантовая геометрия в крупных масштабах может выглядеть как классическая. Локальность пространства в этом случае следует из особенностей квантовой геометрии. Число ребер и число узлов примерно одинаково, поскольку каждый узел соединен лишь с соседями, но при добавлении всего одного ребра к огромному числу ребер, образующих квантовую геометрию, мы радикально нарушим локальность, и это позволит разнесенным на большие расстояния узлам, таким как Тед и Мэри, общаться, по сути, мгновенно. Мы называем это *нарушением локальности*, а добавленное ребро – *нелокальной связью*¹⁴⁶.

Нарушить локальность путем добавления одной нелокальной связи оказалось очень просто. Она может быть одним из 10180 ребер в наблюдаемой Вселенной, но есть 10360 способа встроить ее. Если бы вы добавили ее случайным образом в граф с 10180 узлами, она скорее стала бы нелокальной связью, чем локальной, поскольку число способов добавить нелокальные связи гораздо больше. Узел на одном конце ребра может быть связан с небольшим числом других узлов, если вы желаете встроить локальную связь. Но если вы не заботитесь о локальности, второй конец может быть соединен с любым узлом во Вселенной. Мы снова видим, каким строгим ограничением является требование локальности. Вы можете поинтересоваться: сколько нелокальных связей можно добавить в квантовую геометрию пространства, прежде чем это проявится в макром мире? Поскольку обычные частицы обладают квантовой длиной волны на много порядков больше масштаба Планка, вероятность того, что фотон видимого света окажется на конце нелокальной связи и сможет перепрыгнуть от Теда сразу к Мэри, очень мала. Грубые расчеты показывают, что можно безболезненно добавить не менее 10100 таких нелокальных связей, прежде чем факт распространения сигналов быстрее скорости света обнаружится экспериментально. Это огромное число (но не столь большое, как 10180). Тем не менее, узлов, подключенных нелокально куда-то на другом конце Вселенной, будет достаточно много (в среднем более узла на 1 нм³ пространства).

Если мы позволяем образовывать нелокальные связи, появляется множество способов нарушить локальность. Мы также могли построить связь нескольких узлов со многими другими узлами. Эти очень социализированные узлы будут каналировать много информации.

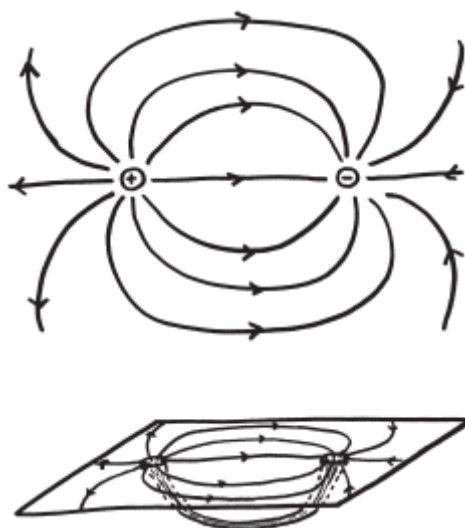
Возможно ли, что Вселенная наполнена такими нелокальными связями? Как обнаружить их присутствие? Очевидный ответ – запутанность и другие проявления нелокальности в квантовой теории являются примерами нарушения локальности. Возможно, фундаментальный уровень описания природы, в котором пространства не существует, а есть

¹⁴⁶ См.: Markopoulou, Fotini, and Lee Smolin *Disordered Locality in Loop Quantum Gravity States* // arXiv: gr-qc/0702044v2 (2007).

только сеть взаимодействий, где все связано со всем, — это и есть теория скрытых параметров, существование которой я доказывал в главе 14? Если так, то квантовая теория и пространство выступают вместе¹⁴⁷.

Вот еще одна (умеренно безумная) гипотеза: нелокальные связи помогают объяснить природу темной энергии, которая приводит к ускорению расширения Вселенной¹⁴⁸. Еще более смелым (и менее вероятным) предположением является их способность объяснить природу темной материи¹⁴⁹. И вот, наконец, самая смелая гипотеза: заряженные частицы есть не что иное, как концы нелокальных связей¹⁵⁰. Это напоминает давние идеи Уилера, что заряженные частицы могут представлять собой вход в кротовую нору в пространстве.

Кротовые норы — это гипотетические туннели между двумя областями, разнесенными на большое расстояние. Силовые линии электрического поля замыкаются на заряженных частицах, но они также появляются на выходах кротовых нор, куда они предположительно проходят по туннелю. Один конец будет действовать как частица с положительным зарядом, второй — как частица с отрицательным зарядом¹⁵¹. Нелокальная связь может сделать то же самое. Она перехватывает линии электрического поля и выглядит как частица и античастица, расположенные далеко друг от друга (рис. 17).



¹⁴⁷ Это определило программу исследований, которые я вел (с перерывами) много лет. См.: Markopoulou, F., and L. Smolin *Quantum Theory from Quantum Gravity* // arXiv: gr-qc/0311059v2 (2004). Также см.: Barbour, Julian, and Lee Smolin *Extremal Variety as the Foundation of a Cosmological Quantum Theory* // arXiv: hep-th/9203041v1 (1992); Smolin, Lee *Matrix Models as Nonlocal Hidden Variables Theories* // arXiv: hep-th/0201031v1 (2002); Smolin, Lee *Quantum Fluctuations and Inertia* // Phys. Lett. A, 113:8, 408–412 (1986); Smolin, Lee *On the Nature of Quantum Fluctuations and Their Relation to Gravitation and the Principle of Inertia* // Class. Quant. Grav. 3: 347–359 (1986); Smolin, Lee *Stochastic Mechanics, Hidden Variables, and Gravity* / In: *Quantum Concepts in Space and Time*. Ed. Penrose, R., and C. J. Isham. New York: Oxford University Press, 1986; Smolin, Lee *Derivation of Quantum Mechanics from a Deterministic Nonlocal Hidden Variable Theory. I. The Two-Dimensional Theory*. IAS preprint, July 1983 (<http://inspirehep.net/record/191936>).

¹⁴⁸ Prescod-Weinstein, Chanda, and Lee Smolin *Disordered Locality as an Explanation for the Dark Energy* // arXiv:0903.5303v3 [hep-th] (2009).

¹⁴⁹ Темная материя — гипотетическая материя, которая не излучает свет, но необходима для объяснения вращения галактик на основе законов Ньютона.

¹⁵⁰ Smolin, Lee *Fermions and Topology* // arXiv: gr-qc/9404010v1 (1994).

¹⁵¹ Misner, C. W., and J. A. Wheeler. Ann. Phys. (USA) 2, 525–603 (1957), reprinted in: *Wheeler Geometrodynamics*. New York: Academic Press, 1962.

Рис. 17. Нелокальная связь, как кротовая нора, захватила силовые линии электрического поля. Электрическое поле в районе одного из отверстий кротовой норы выглядит как образованное точечной заряженной частицей.

Небольшое число нелокальных соединений может быть даже выгодно, если одна из упомянутых идей верна. Но если нелокальных соединений слишком много, вы столкнетесь с проблемами при возникновении пространства. Это проблема *обратной задачи*. Легко аппроксимировать гладкую двумерную поверхность, скажем, поверхность сферы, сетью треугольников (рис. 18). Такой граф называется *триангуляцией поверхности*. (Именно это архитектор Ричард Бакминстер Фуллер сделал, изобретая геодезический купол. Очень скоро такие постройки появились во многих местах, а после люди вспомнили о преимуществах прямоугольных комнат.) Но давайте рассмотрим обратную задачу. У вас много треугольников. Я прошу, склеивая их по краям, построить случайную фигуру. Очень маловероятно, что у вас выйдет сфера. Скорее вы получите странные формы (рис. 19) с шипами и другими излишествами.

Проблема в том, что есть гораздо больше способов, сложив треугольники, получить невообразимые фигуры, чем двумерную сферическую поверхность. Во всех этих диких формах проступает строение атома, потому что в масштабе отдельных треугольников присутствует множество деталей и неоднородностей. Так что идеального пространства не возникает.

Результаты того, как общая теория относительности (ОТО) строится на основе теории петлевой квантовой гравитации, не содержат обратной задачи: они основаны на конкретном выборе графов, которые можно построить путем триангуляции пространства. Эти результаты, хоть и впечатляющие, не говорят, как описать эволюцию более общих графов с множеством нелокальных связей.

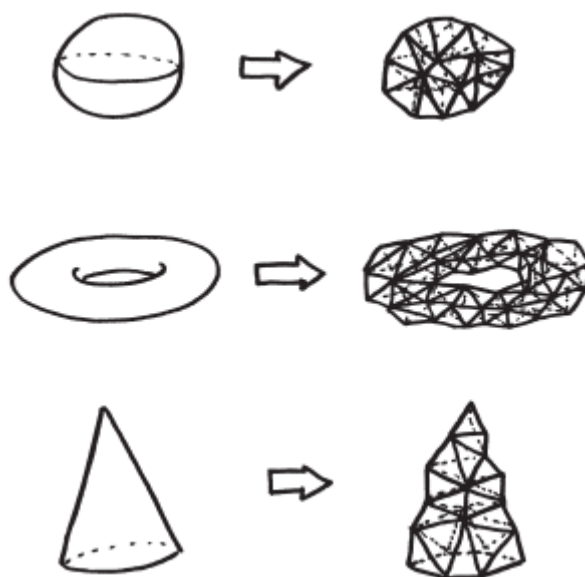


Рис. 18. Триангуляция гладких двумерных поверхностей.

Это подчеркивает, насколько стесняющим является условие локальности пространства. Это важный урок. Если пространство возникает из квантовой структуры, должен существовать некий принцип (или сила), который заставляет “кирпичики” пространства собираться так, чтобы оно выглядело, как наше. В частности, должен работать механизм, обеспечивающий “кирпичику” соседство лишь с несколькими другими соседями: при случайной сборке пространства этого не произойдет.

Я рассказывал о квантовой ОТО, но обратная задача присутствует в квантовой гравитации и в других подходах, включая подходы теории причинных множеств, в матричной модели теории струн и динамической триангуляции. Каждый из них по-своему

привлекателен, и каждый сталкивается с описанной проблемой.

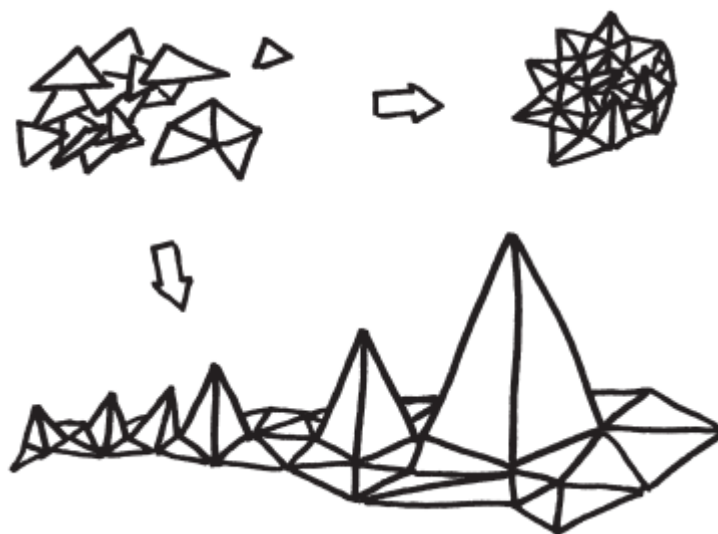


Рис. 19. Формы, полученные случайным склеиванием треугольников по краям.

Главный вопрос заключается в том, почему реальный мир похож на трехмерное пространство, а не на сильно связанные между собой сети. Чтобы понять сложность этого вопроса, представьте, что мы среди обладателей сотовых телефонов. Пространство исчезло, как и понятие расстояния, и кто ближний, а кто нет, определяется лишь тем, кто кому звонит. Если вы разговариваете с кем-либо по меньшей мере однажды в день, вас обоих сочтут ближайшими соседями. Чем реже вы звоните кому-либо, тем дальше вы от этого человека. Это понимание расстояния более гибко, чем понятие расстояния в пространстве. В пространстве, как мы видели, у всех одинаковое количество потенциальных ближайших соседей. В трехмерном пространстве, в отличие от сотовой сети, ни у кого не может быть более 6 соседей.

В сотовой сети вы можете быть так близко от любого пользователя, как пожелаете. Если я знаю, как далеко вы находитесь от, скажем, 50 тысяч других пользователей, это ничего не скажет о том, как далеко вы от пользователя № 50001. Следующий может оказаться незнакомцем – или вашей собственной матерью. Но в пространстве понятие близости становится жестким. После того, как вы скажете мне, кто ваши ближайшие соседи, я узнаю, где вы живете. Я смогу сказать, как далеко вы от остальных.

Следовательно, для того, чтобы определить устройство сети, требуется гораздо больше информации, чем для того, чтобы определить расположение объектов в двух- или трехмерном пространстве. Чтобы указать, как подключены 5 миллиардов сотовых телефонов, мне необходима информация для каждой пары пользователей. Это примерно 5 миллиардов в квадрате или $2,5 \times 10^{19}$ чисел. Но чтобы указать, где на Земле находится каждый пользователь, мне нужно знать лишь два числа: долготу и широту, то есть 12 миллиардов чисел. И если пространство возникает посредством выключения соединений, должно быть отключено огромное количество потенциальных соединений.

Как отключаются эти соединения? Теория квантовых графов предполагает, что создание и поддержание связей в сети требует энергии. Для создания двух- или трехмерной решетки (рис. 13) требуется гораздо меньше энергии, чем для формирования многомерных решеток. Это подразумевает простую картину происходящего на ранней стадии образования Вселенной. Вначале было очень жарко, и было достаточно энергии, чтобы включить большинство соединений. Следовательно, ранняя Вселенная представляла собой мир, в котором все было связано со всем. По мере охлаждения Вселенной соединения начали отключаться, пока не осталось лишь нескольких необходимых для формирования трехмерной решетки. Так, возможно, появилось пространство (некоторые мои коллеги охотнее говорят о Большом охлаждении, чем о Большом взрыве). Этот процесс называют *геометрогенезисом*.

Геометрогенезис помогает объяснить некоторые загадки начальных условий Вселенной, например, почему микроволновое фоновое излучение во всех направлениях имеет одинаковую температуру и одинаковый спектр флуктуаций. Это происходит потому, что Вселенная изначально была высоковзаимосвязанной системой. Геометрогенезис, таким образом, является альтернативой гипотезе о сильнейшей инфляции в самом начале жизни Вселенной.

Как и почему Большое охлаждение привело к трехмерной структуре, которая выглядит так же регулярно, как и двумерная решетка (рис. 13), а не к более хаотичной структуре? Ученые продолжают искать ответ на этот вопрос¹⁵³.

Решение обратной задачи преподнесло нам два урока о природе времени. Первый заключается в том, что пространство скорее всего возникает в моделях квантовой Вселенной, предполагающих наличие глобального времени. Это проиллюстрировано на динамической триангуляционной модели. Триангуляцией является поверхность из множества треугольников, как в случае геодезического купола (рис. 18). Трехмерное искривленное пространство может быть построено аналогичным образом: присоединением тетраэдров – трехмерных аналогов треугольников.

В динамической триангуляционной модели тетраэдры используются как атомы пространства. Квантовая геометрия описывает не граф, а расположение тетраэдров, склеенных по поверхности их граней¹⁵⁴. Такая конфигурация пространства изменяется во времени. Согласно правилам строится дискретная триангулированная версия четырехмерного пространства-времени (рис. 20).

Существует два вида подходов к динамической триангуляции: те, в которых пространство-время атомизировано, как в блочной картине Вселенной, и те, в которых предполагается универсальное понятие времени, а пространство возникает как вторичное. В остальных отношениях эти конструкции очень похожи. В результате когерентное пространство-время возникает лишь в моделях, в которых время, как предполагается, реально. Другие модели – те, которые не предполагают глобального времени, – неизбежно сталкиваются с проблемой решения обратной задачи, то есть избылируют геометриями, очень не похожими на наше пространство (рис. 19).

¹⁵² Markopoulou, Fotini *Conserved Quantities in Background Independent Theories* // arXiv: gr-qc/0703027v1 (2007).

¹⁵³ Caravelli, Francesco, and Fotini Markopoulou *Disordered Locality and Lorentz Dispersion Relations: An Explicit Model of Quantum Foam* // arXiv:1201.3206v3 (2012); Caravelli, Francesco, and Fotini Markopoulou *Properties of Quantum Graphity at Low Temperature* // arXiv: 1008.1340v3 (2011); Caravelli, Francesco, et al. *Trapped Surfaces and Emergent Curved Space in the Bose-Hubbard Model* // arXiv:1108.2013v3 (2011); Conrady, Florian *Space as a Low-temperature Regime of Graphs* // arXiv:1009.3195v3 [gr-qc] (2011). Иной подход к геометрогенезису предложен в работе: Magueijo, João, Smolin, Lee, and Carlo R. Contaldi *Holography and the Scale-Invariance of Density Fluctuations* // arXiv: astro-ph/0611695v3 (2006).

¹⁵⁴ Графы и триангуляция тесно связаны. Задав триангуляцию, можно построить граф, в котором узлы представляют тетраэдры, а два узлы соединены ребром, если соответствующие тетраэдры граничат друг с другом.

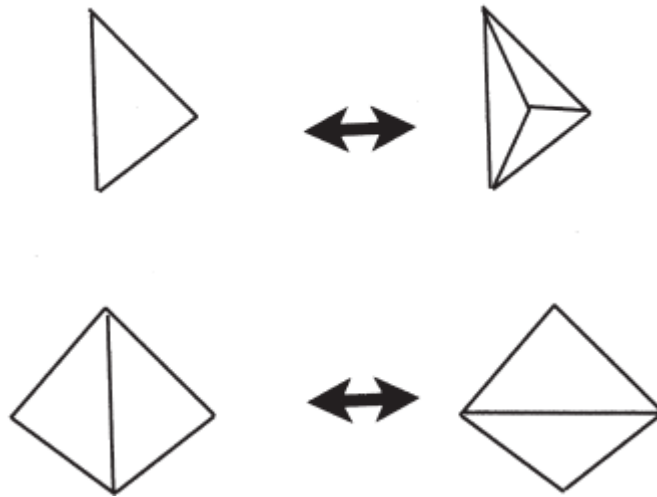


Рис. 20. Эволюционные правила для триангуляции поверхности.

Модели, в рамках которых найдено решение обратной задачи, известны как модели каузальной динамической триангуляции Амбьорна и Лолл. В этих моделях возникающее пространство-время реалистично в том отношении, что оно имеет три измерения пространства и одно – времени. Некоторые модели показаны на рис. 21. Это первые примеры квантовых Вселенных, которые на больших масштабах выглядят как решения уравнений теории относительности. Они даже демонстрируют, что объем пространства растет во времени, как того требуют уравнения Эйнштейна. Остаются некоторые вопросы, например, соответствует ли возникающее пространство-время решениям уравнений ОТО в деталях, необходимых для воспроизведения явлений вроде гравитационных волн и черных дыр. Другая задача – выяснить судьбу присущего этим моделям глобального времени. Нарушает ли его наличие симметрии ОТО (см. главу 6)? Может ли ОТО (после некоторой корректировки модели) быть восстановлена в виде формодинамики, которая является теорией с глобальным временем, эквивалентной ОТО (см. главу 14)?



Рис. 21. Типичная геометрия пространства-времени, возникающая в модели каузальной динамической триангуляции ¹⁵⁵.

Второй урок таков: если пространство второстепенно, то на самом глубоком уровне теории не может существовать относительности одновременности, потому что все связано со

¹⁵⁵ На рисунке – пример квантовой Вселенной с одномерными пространством и временем из кн.: Loll, R., Ambjorn, J., and K. N. Anagnostopoulos *Making the Gravitational Path Integral More Lorentzian, or: Life Beyond Liouville Gravity* // arXiv: hep-th/9910232, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 88, 241–244 (2000).

всем. Так как можно передать сигнал между любыми двумя узлами всего за нескольких шагов, проблемы синхронизации часов больше нет. Следовательно, на этом уровне время должно быть глобальным.

Этот урок проиллюстрирован моделью квантовых графов. Модель основана на графе с большим числом узлов, причем любые два из них либо соединены, либо нет. Квантовая геометрия включает любой граф, который только может быть нарисован подключением всех узлов. Динамические законы включают и выключают соединения. Исследованы несколько моделей, в каждой из которых предполагаются свои правила включения и выключения соединений между узлами. Оказалось, что эти модели имеют две фазы, аналогично двум фазам состояния воды. В высокотемпературной фазе почти все соединения включены и каждый узел тесно связан со всеми остальными через один или несколько шагов. В этой фазе отсутствует локальность, поскольку информация может быть легко и быстро передана. В этой фазе модели нет ничего напоминающего пространство. Но если вы остудите модель, почти все связи окажутся выключены. В таком низкоразмерном пространстве каждый узел имеет лишь несколько ближайших соседей и образуется много переходов между большинством пар узлов.

Вы также можете поместить материю в модель квантовых графов. Частицы будут жить в узлах и прыгать из одного узла в другой лишь тогда, когда узлы будут связаны. Гипотеза о динамике может быть основана на принципе взаимных действий, как в ОТО. Согласно этому принципу, геометрия определяет движение частиц, а частицы материи определяют изменения геометрии. Эти модели демонстрируют некоторые свойства возникающего пространства, а также включают гравитационные явления, например аналоги квантовых черных дыр, которые могут долго удерживать частицы. Эти черные дыры не постоянны. Они медленно испаряются. Это напоминает процесс, описанный Стивеном Хокингом.

Чтобы эти модели стали реалистичными, над ними следует потрудиться, однако они уже принесли огромную эвристическую пользу. Они показывают, что если все потенциально связано со всем, должно существовать глобальное время. Относительность одновременности в специальной теории относительности (СТО) – следствие локальности. Определить, являются ли отдаленные события одновременными, невозможно, поскольку скорость света накладывает верхнее ограничение на скорость передачи сигналов. В СТО можно определить одновременность лишь тогда, когда два события происходят в одном месте. Но в квантовой Вселенной, где каждая частица потенциально находится в шаге от всех остальных частиц, все, по сути, находится в одном и том же месте. В такой модели нет проблемы синхронизации часов.

Когда в такой модели возникает пространство, возникает и локальность. Кроме того, возникает ограничение скорости передачи сигналов. (Это детально показано в модели квантовых графов¹⁵⁶.) Пока вы наблюдаете явления в возникающем пространстве-времени, но не зондируете пространство-время на атомных масштабах, СТО будет казаться приблизительно верной. Это подтверждает урок моделей и теории, описанных в этой главе: *пространство может быть иллюзией, но время должно быть реально*.

Наше понимание квантовой гравитации углубляется. Все описанные выше теоретические подходы важны. Каждый учит чему-либо важному о возможных квантово-гравитационных явлениях. Они также указывают следствия из различных гипотез, затруднения и пути их преодоления. Наиболее успешные подходы либо укладываются в рамки ньютоновой парадигмы и учат о квантовом пространстве-времени “в ящике”, либо (если вырастают до космологического масштаба) указывают на реальность времени.

Глава 16

¹⁵⁶ Hamma, Alioscia, et al. *Lieb – Robinson Bounds and the Speed of Light from Topological Order* // arXiv:0808.2495v2 (2008).

Жизнь и смерть Вселенной

Теперь обратимся к самому важному вопросу, который можно задать о нашей Вселенной: почему в ней возможно существование жизни? В основном потому, что время реально.

Вселенная должна обладать свойствами, объяснимыми лишь если время является фундаментальным понятием. (А если предположить обратное, эти свойства должны казаться таинственными и случайными.) Действительно, есть такие свойства. Они связаны с тем, что наша Вселенная обладает историей и развивалась от простой к сложной. Это определяет направленность времени. Мы говорим о Вселенной, имеющей стрелу времени. Такая направленность маловероятна в мире, в котором время является несущественным или второстепенным.

Посмотрите вокруг – все равно, невооруженным глазом либо с помощью самых мощных телескопов, – и вы убедитесь, что Вселенная структурирована и сложна. Сложность, конечно, является маловероятным явлением. Это требует объяснения. Ничто не может перейти сразу от простой организации к очень сложной. Высокая сложность требует нескольких шагов. Это происходит последовательно, что предполагает упорядочивание событий во времени.

Все научные объяснения сложности требуют истории, в ходе которой сложность возрастает медленно и постепенно. (Похоже на “восхождение на пик Невероятности” у Ричарда Докинза¹⁵⁷.) Таким образом, у Вселенной должна быть история, которая разворачивалась во времени. Чтобы объяснить, как Вселенная развилась до своего нынешнего состояния, необходим причинно-следственный порядок.

Согласно физикам XIX века и некоторым современным космологам-теоретикам, принимающим вневременную картину природы, сложность, которую мы наблюдаем, является случайной и, следовательно, преходящей. По их мнению, Вселенная обречена на то, чтобы завершить эволюцию в состоянии равновесия. В этом состоянии (“тепловая смерть”) материя и энергия равномерно распределены по Вселенной, и ничто не происходит, кроме редких случайных флуктуаций¹⁵⁸. Практически без исключений эти флуктуации сразу же рассеиваются, не образуя ничего нового. Но, как я объясню в этой и в следующей главах, принципы новой космологической теории (см. главу 10) помогут понять, почему развитие Вселенной с возрастающей сложностью естественно и необходимо.

Итак, перед нами два сценария, описывающие очень разное будущее Вселенной. В первом сценарии будущего нет, потому что нет времени. Время – это иллюзия, в лучшем случае – мера изменения. Эта иллюзия пройдет, когда закончатся изменения. В моем сценарии, привязанном к времени, Вселенная – это процесс воспроизводства новых явлений и состояний. Она постоянно обновляется по мере того, как эволюционирует во все более сложные и высокоорганизованные состояния. Результаты наблюдений однозначно говорят, что с течением времени Вселенная становится все интереснее. Вначале она была заполнена равновесной плазмой. Из простейшего состояния она превратилась в очень сложную структуру, наблюдаемую на всех уровнях в широком диапазоне масштабов – от скоплений галактик до молекул¹⁵⁹.

¹⁵⁷ Dawkins, Richard *Climbing Mount Improbable*. New York: W. W. Norton, 1996.

¹⁵⁸ Флуктуация – небольшое случайное изменение в небольшой части системы. Флуктуация может дезорганизовать систему, как, например, краска, капнувшая с кисточки, может испортить портрет. Но флуктуация может самопроизвольно привести и к повышению степени организации, как, например, мутация в молекуле ДНК производит более совершенных существ.

¹⁵⁹ Любопытно, что органические молекулы обнаружены не только на Земле, но и в метеоритах, кометах, облаках межзвездного газа и пыли.

Постоянство роста и усложнения этой структуры вызывает недоумение, потому что оно исключает простое объяснение, гласящее, что все это случайность. Трудно представить случайное образование структур, которые сохраняются миллиарды лет и сложность которых при этом растет. И если бы наблюдаемая нами сложность была случайной, со временем она почти наверняка уменьшалась бы, а не росла.

Предсказание о “тепловой смерти” – еще один шаг к изгнанию времени из физики и космологии. Оно сродни догадке древних о том, что естественное состояние Вселенной – неизменность. Старейшая космологическая концепция гласит, что естественным состоянием мира является равновесие, при котором все на своих местах и не испытывает каких-либо побуждений к организации. В этом суть космологии Аристотеля (см. главу 2), в рамках которой всему присуще естественное движение: земля стремится к центру мира, а воздух – вверх.

Единственной причиной изменений в подлунном мире, по Аристотелю, могут быть другие источники движения, заставляющие вещи менять положение. Источниками *насильственного движения* являются, например, люди и животные. Есть и другие источники. Горячая вода включает в себя воздух и, частично принимая естественное его восходящее движение, поднимается до тех пор, пока воздух не остынет. В этот момент вода изгоняет из себя воздух – и выпадает дождь. Так или иначе, источником любого насильственного движения выступает Солнце. Если бы подлунный мир был отсоединен от небесного и предоставлен сам себе, то все пришло бы в равновесие.

Современные физики имеют собственное понятие о равновесии, которое характеризуется законами термодинамики. Это относится к физике в “ящике”. Законы термодинамики работают в случае замкнутых систем, которые с окружающей средой не обмениваются ни энергией, ни материей.

Не следует путать равновесие Аристотеля и Ньютона с современным понятием термодинамического равновесия. Равновесие по Аристотелю и Ньютону проистекает из баланса сил. Мост держится, потому что силы, действующие на каждую его ферму и заклепку, сбалансированы. Равновесие в современной термодинамике совершенно иное. Оно относится к системам с очень большим числом частиц и оперирует понятиями теории вероятностей.

Прежде чем говорить о “тепловой смерти” Вселенной, следует убедиться, что мы точно понимаем термины, прежде всего энтропию и второе начало термодинамики.

Современная термодинамика включает два уровня описания: 1) *микроскопический*, то есть точное описание положения и движения всех атомов в любой системе (микросостояние), и 2) *макроскопический* (макросостояние системы – приблизительное описание в терминах нескольких переменных, таких как температура и давление газа). Изучение системы в термодинамике сводится к исследованию взаимосвязи между этими двумя уровнями.

Вот простой пример – кирпичное здание. Макросостоянием здесь выступает чертеж. Микросостояние описывает каждый кирпич. Архитектор должен лишь распорядиться возвести стены с определенными параметрами, с проемами для окон и дверей. Его не интересует, где какие кирпичи окажутся. Большинство кирпичей идентичны, и если два кирпича поменять местами, никакого влияния на постройку это не окажет. Таким образом, существует огромное количество микросостояний, которые описываются одинаковым макросостоянием.

Теперь рассмотрим Музей им. Гуггенхайма, построенный в Бильбао по проекту Фрэнка Гери. Внешняя поверхность здания состоит из металлических листов. Чтобы сделать криволинейные поверхности для этой конструкции, каждый лист должен быть индивидуален, и важно, куда его установят. Здание примет форму, соответствующую замыслу архитектора, лишь если каждый лист окажется на своем месте. В данном случае чертеж также представляет собой макросостояние, а набор инструкций для каждого листа –

микросостояние. Но, в отличие от большинства кирпичных зданий, здесь нет свободы изменять микросостояния. Существует лишь одно микросостояние, которое соответствует своему макросостоянию.

Концепция, объясняющая, сколько микросостояний могут соответствовать одному макросостоянию, позволяет нам оценить, почему Гери является революционером. Эта концепция называется *энтропией*. Энтропия здания – это мера количества способов сложить части так, чтобы воплотить чертеж. Здание из обычного кирпича характеризуется очень высокой энтропией. Здания по проекту Гери могут иметь энтропию, равную нулю¹⁶⁰.

Энтропия является величиной, обратной по отношению к информации. Чтобы описать здание Гери, требуется много информации, потому что вы должны точно указать, как изготовить каждый элемент, и точно определить его место. Гораздо меньше информации нужно, чтобы определить дизайн кирпичного здания: все, что вам нужно знать – это параметры стен.

Как это работает в физике? Рассмотрим контейнер, заполненный газом, состоящим из очень большого количества молекул. Фундаментальное описание системы – микроскопическое. Оно говорит, где каждая молекула находится и как движется. Это огромное количество информации. Но есть и макроскопическое описание, в котором газ описывается через плотность, температуру и давление.

Описание плотности и температуры требует гораздо меньше информации, чем необходимо, чтобы сказать, где находится каждый атом. Следовательно, есть простой способ переводить микроскопическое описание в макроскопическое, но не наоборот. Если известно, где каждая из молекул, то вы знаете плотность и температуру, которая является средней энергией движения. Но наоборот сделать невозможно: есть множество способов того, как атомы могут быть организованы микроскопически, что в результате даст такое же состояние с теми же плотностью и температурой. Переходя от микросостояний к макросостоянию, полезно подсчитать, сколько микросостояний согласуется с данным макросостоянием. Как и в архитектурном примере, это число задается энтропией макроскопической конфигурации. Обратите внимание: энтропия – свойство лишь макроскопического описания. Энтропия, следовательно, является системным свойством, и нет смысла приписывать ее микросостояниям системы.

Следующий шаг: связываем понятия энтропии и вероятности. Это можно сделать, предположив, что все микросостояния одинаково вероятны. Данный физический постулат подтверждается тем, что атомы газа находятся в хаотическом движении, которое делает их перемещения равновероятными. Чем выше энтропия макросостояния, тем вероятнее, что оно реализуется. Наиболее вероятное макросостояние, учитывая, что микросостояния случайны, называется состоянием равновесия. Оно также обладает наибольшей энтропией.

Разделите кошку на атомы. Перемешайте их. Существует гораздо больше микросостояний кошачьих атомов, случайным образом перемешанных в воздухе комнаты, чем микросостояний собранной из тех же атомов кошки на диване. Кошка – в высшей степени невероятный случай организации атомов, и, следовательно, по сравнению с теми же рассеянными в воздухе атомами, она характеризуется низким значением энтропии и высоким – информации.

Атомы газа движутся хаотично. Когда они сталкиваются, направление их движения меняется более или менее произвольно. Таким образом, время, как правило, делает микросостояния случайнее. Если микросостояние не было случайным, то довольно скоро оно станет таковым. И если мы начнем с равновесного макросостояния с низкой энтропией, то, скорее всего, его энтропия возрастет. Это второе начало термодинамики.

Поставим эксперимент. Для этого нужны игральные карты. Предположим, что карты в

¹⁶⁰ Потому что логарифм единицы равен нулю. Мы, как правило, принимаем энтропию равной логарифму числа эквивалентных микросостояний.

колоде расположены по порядку. После этого раз в секунду они перетасовываются. Каждая перетасовка делает порядок более случайным. Энтропия, как правило, возрастает. После нескольких перетасовок порядок карт нельзя будет отличить от случайного. Ни намека на первоначальный порядок, по сути, уже нет.

Эта закономерность отражена во втором начале термодинамики. В контексте нашего эксперимента этот закон гласит: перетасовка колоды будет стремиться уничтожить любой начальный порядок карт, заменив его случайным.

Но энтропия возрастает не всегда. Так, возвращение к первоначальному порядку в колоде снижает энтропию. Однако гораздо вероятнее разупорядочение карт и, соответственно, увеличение энтропии. Чем больше в колоде карт, тем меньше вероятность того, что их перетасовка восстановит начальный порядок. Следовательно, тем больше интервалы времени между такими перетасовками, которые восстанавливают порядок в колоде. Тем не менее, пока число карт конечно, есть конечное время, за которое (при ежесекундной перетасовке) порядок с некоторой конечной вероятностью восстановится, — *время возвращения Пуанкаре*. Если вы следите за системой гораздо более короткое время, то, скорее всего, заметите лишь возрастание энтропии. А если наблюдать за системой в течение времени более длительного, чем время возвращения Пуанкаре, то, скорее всего, отметите и уменьшение энтропии.

Пример справедлив и для газа. Здесь также упорядоченная конфигурация атомов, например конфигурация, в которой все атомы находятся в одной половине объема и движутся в одном направлении. Эти конфигурации аналогичны тем, в которых все карты упорядочены. Но, хотя эти упорядоченные конфигурации атомов и существуют, они гораздо менее вероятны, нежели конфигурации, в которых атомы размещены в случайном порядке по всему объему и двигаются в случайных направлениях.

Если начать с конфигурации, в которой все атомы находятся в одном углу объема и движутся в одном направлении, мы увидим, что по мере того, как они рассеиваются, они распределятся по всему объему. Через некоторое время атомы полностью перемешаются и плотность атомов в объеме станет однородной.

Примерно с той же скоростью направления, в которых атомы движутся, а также их энергии приобретут случайные значения, поскольку атомы сталкиваются. В итоге большинство атомов приобретет энергию, близкую к средней, которая и является температурой.

Как бы необычен ни был порядок начальной конфигурации, через некоторое время плотность и температура газа в объеме будут распределены равномерно. Это состояние равновесия. Достигнув равновесия, газ, скорее всего, останется в этом состоянии.

Второе начало термодинамики в этом контексте утверждает, что за короткое время наиболее вероятное изменение энтропии является положительным или, по крайней мере, нулевым. Если вы начинаете с неравновесного состояния, то начинаете с менее вероятной конфигурации и, следовательно, с более низкого значения энтропии. Наиболее вероятно, что в дальнейшем конфигурация из-за столкновений атомов станет более вероятной. Энтропия возрастет. Если вы начинаете с равновесного состояния, в котором энтропия максимальна, то, поскольку конфигурация уже разупорядочена, то, скорее всего, она таковой и останется. Но если наблюдать за поведением атомов очень долго, то, как отмечалось, маловероятные флуктуации могут привести газ в более упорядоченное состояние. Наиболее вероятными среди флуктуаций являются незначительные отклонения плотности газа от среднего значения в ту или иную сторону в разных частях объема. Гораздо менее вероятно, что все атомы снова соберутся в одном углу объема. Но если наблюдать достаточно долго, то такие ситуации тоже будут возникать. Пока число атомов конечно, будут происходить флуктуации, приводящие к любой конфигурации атомов, какими бы редкими они ни были.

Впрочем, ждать физических последствий таких флуктуаций не придется. Эйнштейн исследовал флуктуации молекул в жидкости, чтобы продемонстрировать существование атомов. Он предположил, что жидкости, например вода, состоят из молекул, находящихся в

случайном движении, и задумался, как это движение влияет на пыльцу растений в воде. Молекулы воды слишком малы, чтобы их увидеть, но их влияние прослеживается в движении пыльцы, размеры зерен которой достаточно крупны, чтобы рассмотреть их в микроскоп. Зерно пыльцы, бомбардируемое множеством молекул воды, совершает некий танец.

Измеряя, насколько энергичен танец зерна, можно вывести, сколько молекул и с какой силой ударяют по его поверхности каждую секунду. В одной из статей 1905 года Эйнштейн сделал проверяемые предсказания (позднее они подтвердились) о свойствах атомов и, кроме прочего, определил количество атомов в грамме воды¹⁶¹. Из этого и подобных экспериментов мы знаем, что флуктуации реальны.

Существование флуктуаций решает парадокс, озадачивавший первых исследователей термодинамики. Первоначально законы термодинамики не учитывали атомы и вероятности. Газы и жидкости рассматривались как непрерывные вещества, энтропия и температура были определены без понятия вероятности, как если бы они имели фундаментальное значение. Второе начало в оригинальной формулировке гласило, что в любом процессе энтропия либо остается на прежнем уровне, либо возрастает. Другой закон гласил, что если энтропия максимальна, температура в системе везде одинакова.

В середине XIX века Джеймс Клерк Максвелл и Людвиг Больцман разработали гипотезу о том, что материя состоит из хаотично двигающихся атомов, и пытались вывести законы термодинамики, опираясь на статистические законы движения большого числа атомов. Они предположили, что температура – лишь мера средней энергии случайного движения атомов. Максвелл и Больцман ввели понятие энтропии и сформулировали второе начало термодинамики в том виде, как я привожу его здесь.

Большинство физиков тогда не верили в существование атомов. Следовательно, они отвергли усилия, направленные на обоснование законов термодинамики движением атомов, и предложили убедительные доводы в пользу того, что законы термодинамики не могут быть выведены из этого движения. Вот один из таких доводов: законы движения, которым атомы (если они существуют) должны подчиняться, обратимы во времени (см. главу 5). Если снять фильм о группе атомов, движущихся в соответствии с законами Ньютона, и прокрутить пленку наоборот, движение атомов также будет соответствовать законам Ньютона. Но второе начало термодинамики не является обратимым, поскольку оно предполагает, что энтропия всегда увеличивается либо остается на прежнем уровне. Скептики говорили: нельзя необратимый во времени закон вывести из законов, обратимых во времени, регулирующих движение гипотетических атомов.

Верный ответ дали Пауль и Татьяна Эренфест, протеже Больцмана и позднее друзья Эйнштейна¹⁶². Они показали, что второе начало в первоначальной формулировке неверно. Энтропия иногда уменьшается, просто это маловероятно. Если ждать достаточно долго, то флуктуации иногда приводят к уменьшению энтропии системы. Поэтому флуктуации являются необходимой частью истории о том, как термодинамика смирилась с существованием атомов, подчиняющимся фундаментальным законам, обратимым во времени.

Но и правильная картина мира кажется лишенной надежды на светлое будущее: любая замкнутая система, построенная на этих принципах, в конце концов перейдет в состояние равновесия, после чего уже не будет никакого реального накопительного изменения, никакого роста структуры и увеличения сложности, – а лишь бесконечное равновесие, нарушаемое случайными флуктуациями.

¹⁶¹ *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* // Ann. der Phys. 17 (8): 549–560 (1905).

¹⁶² Klein, Martin J. *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*. New York: Elsevier, 1970.

Вселенная в равновесии не может быть сложной, поскольку случайные процессы, которые приводят ее в равновесие, уничтожают организацию. Но это означает, что сложность системы сама по себе может быть измерена в рамках понятия энтропии. Чтобы в полной мере охарактеризовать сложность системы, мы должны выйти за рамки понятий термодинамики равновесия (см. главу 17).

Когда мы рассматриваем космологию с точки зрения термодинамики, вопрос, почему Вселенная становится все интереснее, озадачивает. С точки зрения ньютоновой парадигмы, Вселенная представляет собой решение уравнений некоего закона. Этот закон природы может быть аппроксимирован с помощью объединения общей теории относительности и стандартной модели физики элементарных частиц. Но детали такого объединения здесь не имеют значения. Решение, которое управляет Вселенной, отбирается из бесконечного множества и может быть получено путем выбора начальных условий в момент Большого взрыва.

Из термодинамики известно, что почти каждое решение уравнений физики описывает Вселенную в равновесии: определение равновесного состояния заключается в том, что оно состоит из наиболее вероятных конфигураций. Вот еще следствие равновесия: типовое решение уравнений симметрично по времени. То есть локальные флуктуации в более упорядоченные состояния столь же вероятны, как и в менее упорядоченные. Прокручивая пленку вперед-назад, мы получаем равновероятные истории. Общей стрелы времени нет.

Наша Вселенная совсем не похожа на эти типовые решения уравнений. Даже сейчас, спустя более чем 13 миллиардов лет после Большого взрыва, она не находится в равновесии. И решение, которое ее описывает, время-асимметрично. Эти свойства чрезвычайно маловероятны, если предположить, что решения уравнений, описывающие Вселенную, выбраны случайно. Вопрос, почему Вселенная сложна, по-видимому, сродни вопросу о том, почему второе начало термодинамики, которое должно было привести Вселенную к тепловому равновесию, до сих пор этого не сделало.

Первичным признаком того, что Вселенная не находится в тепловом равновесии, выступает стрела времени. Его ход сильно асимметричен. Мы ощущаем себя в движении из прошлого в будущее. Бесчисленные явления свидетельствуют о направленности времени. Многие вещи необратимы: автомобильная авария, неудачная фраза. Горячая чашка остывает. Сахар растворяется в кофе. Чашка разбивается. Мы стареем. Книги и фильмы, персонажи которых проживают жизнь от старости до младенчества, – фантастика¹⁶³.

В равновесии нет стрелы времени. Здесь порядок можно увеличить лишь временно, посредством случайной флуктуации. Эти отклонения от равновесия выглядят в среднем одинаково вне зависимости от времени. Если вы сняли фильм о движении атомов в газе в состоянии равновесия и прокрутили его наоборот, вы не сможете указать оригинальную версию. Но наша Вселенная совсем не такая.

Стрела времени требует объяснения, потому что фундаментальные законы физики симметричны относительно времени. Любое решение уравнений для этих законов имеет парное решение, со временем, развернутым в обратном направлении (правда, левое здесь заменено на правое, а частицы – на античастицы). Таким образом, фундаментальные законы не будут нарушены, если некоторые люди проживут свой век в обратном направлении, или кофе, оставленный на столе, вдруг нагреется, или соберется разбитая чашка.

Но почему этого не случится? И почему разные асимметрии времени направлены в сторону увеличения беспорядка? Иногда эта проблема называется *проблемой стрелы времени*. Во Вселенной их несколько.

¹⁶³ См., например, “Стрелу времени” Мартина Эмиса или “Загадочную историю Бенджамина Баттона” – фильм, снятый по рассказу Фрэнсиса Скотта Фицджеральда.

Вселенная расширяется, а не сжимается. Это *космологическая стрела времени*. Малые части Вселенной, предоставленные сами себе, имеют тенденцию разупорядчиваться (пролитое молоко, равновесный газ и так далее). Это *термодинамическая стрела времени*. Люди, животные и растения рождаются, растут, умирают. Это *биологическая стрела времени*. Мы ощущаем время, текущее из прошлого в будущее. Мы помним прошлое, но не будущее. Это *эмпирическая стрела времени*. Менее очевидная, но не менее важная стрела времени – *электромагнитная*. Свет движется из прошлого в будущее. Следовательно, свет, который достигает наших глаз, дает нам представление о прошлом мира, а не о его будущем. Световые волны возникают при движении электрических зарядов. Стоит пошевелить электрический заряд, и начнет распространяться свет, причем всегда в направлении будущего. Это, вероятно, применимо и к гравитационным волнам. Поэтому существует *гравитационная стрела времени*.

В нашей Вселенной, по-видимому, множество черных дыр. Черная дыра сильно асимметрична во времени. Любое тело может быть поглощено ею, но выходит из нее лишь тепловое излучение Хокинга. Черная дыра превращает все в равновесный газ фотонов. Этот необратимый процесс производит много энтропии.

А белые дыры? Эти гипотетические объекты возникают в решениях уравнений ОТО. Они получаются при изменении направления времени в решении для черных дыр. Белые дыры ведут себя противоположным черным дырам образом. Ничто не может упасть в белую дыру, но выйти из нее может все. Белая дыра может выглядеть как самопроизвольное появление звезды. Вы получите белую дыру, если снимете фильм про коллапс звезды в черную дыру и запустите его наоборот. Астрономы пока не наблюдали ничего, что можно было бы считать белой дырой.

Даже если вы принимаете во внимание лишь черные дыры, наша Вселенная кажется странной. Согласно уравнениям ОТО, она вполне могла быть изначально заполнена черными дырами. Но, возможно (см. главу 11), в ранней Вселенной вообще не было черных дыр. Все черные дыры, которые мы знаем, образовались вскоре после Большого взрыва в результате коллапса массивных звезд.

Почему есть лишь черные дыры, но не белые? И почему в ранней Вселенной черные дыры отсутствовали? Возможно, стрела времени указывает на отсутствие черных дыр в ранней истории Вселенной.

Может быть, в галактике на другой стороне Вселенной некоторые из стрел времени смотрят в обратную нашей сторону? Этому нет свидетельств. Мы могли бы жить в мире, в котором некоторые стрелы времени меняют направление в зависимости от места, но, очевидно, здесь этого не происходит. Почему?

Стрелы времени являются такими свойствами нашей Вселенной, которые требуют объяснения. Любое объяснение опирается на допущения о природе времени. Объяснение, предложенное теми, кто полагает, что время возникает из вневременного мира, будет отличаться от основанного на гипотезе о том, что время фундаментально и реально. С этим связан вопрос, обратимы ли во времени законы физики. В главе 5 отмечалось: тот факт, что законы природы обратимы во времени, может быть принят в качестве доказательства того, что время не является основополагающим понятием. Как объяснить стрелы времени, если законы обратимы во времени? Как стрелы времени, каждая из которых представляет асимметрию во времени, могли возникнуть из симметричных относительно времени законов?

Ответ в существовании начальных условий. Законы могут быть симметричны относительно направления времени, но начальные условия не должны быть таковыми. Начальные условия могут эволюционировать в конечные, которые легко отличить. Фактически это и произошло: начальные условия нашей Вселенной, вероятно, были точно настроены на создание такой Вселенной, которая является асимметричной во времени.

Начальная скорость расширения Вселенной, которая определяется начальными условиями, возможно, была оптимизирована для эффективного производства галактик и

звезд. Если бы расширение шло гораздо быстрее, плотность Вселенной быстро снижалась бы, не позволяя звездам и галактикам формироваться. Если бы расширение шло гораздо медленнее, Вселенная могла схлопнуться в сингулярность задолго до того, как сформируются галактики и звезды. Скорость расширения была идеальной для образования множества звезд. Именно они миллиарды лет излучают горячие фотоны в холодный космос и удерживают Вселенную от равновесия. Так объясняется термодинамическая стрела времени.

Электромагнитная стрела времени также может быть объяснена симметричными во времени начальными условиями¹⁶⁴. В ранней Вселенной не было электромагнитных волн. Свет появился позднее, после возникновения материи. Это объясняет то, почему световые изображения несут информацию о материи. Если бы мы жили просто по законам электромагнетизма, все могло быть иначе. Уравнения электромагнетизма допускают существование Вселенной, в которой свет распространяется свободно. То есть свет мог сформироваться непосредственно в момент Большого взрыва, а не позднее. В такой Вселенной, как наша, любые изображения и информация о материи, переносимые светом, были бы задавлены светом, исходящим непосредственно от Большого взрыва. Мы не увидели бы ни звезд, ни галактик. Мы могли бы увидеть просто беспорядок. Свет, образованный в результате Большого взрыва, мог переносить изображения событий, которые никогда не происходили, например образы сада со слонами, жующими гигантскую спаржу.

Так Вселенная могла бы выглядеть, если бы мы сняли кинофильм о ней в далеком будущем и прокрутили его наоборот. В далеком будущем будет распространяться много световых изображений – образы вещей, которые существовали. Но если мы прокручиваем фильм назад, мы видим, что Вселенная наполнена образами событий, которые еще не происходили. Действительно, световое изображение будет “втекать” в событие, представленное этим изображением, и заканчиваться в нем. Свет, который мы увидели бы, рассказал бы нам лишь о тех событиях, которых не было. Мы не живем в такой Вселенной, но могли бы, если возможные Вселенные соответствуют решениям уравнений физики. Чтобы объяснить, почему мы видим лишь то, что происходит или произошло, и никогда не видим того, что еще не случилось и не случится, мы должны ввести жесткие начальные условия. Они запрещают свободное распространение любых световых изображений в ранней Вселенной. Это сильно асимметричное условие необходимо для объяснения электромагнитной стрелы времени.

Похожие начальные условия требуются для стрел времени, соответствующих гравитационным волнам и черным дырам. Если фундаментальные законы симметричны относительно хода времени, нагрузка в ответе на вопрос, почему наша Вселенная асимметрична во времени, ложится на выбор начальных условий. Так что придется наложить условие отсутствия в ранней Вселенной свободно распространяющихся гравитационных волн, черных и белых дыр.

Об этом писал Роджер Пенроуз. Для объяснения он предложил *гипотезу кривизны Вейля*¹⁶⁵. Кривизна Вейля – это математическая величина, которая принимает ненулевое значение в присутствии гравитационного излучения, белых или черных дыр. Принцип Пенроуза заключается в том, что в начальной сингулярности эта величина была равна нулю. Это, указывает Пенроуз, согласуется с тем, что мы знаем о рождении Вселенной. Это асимметричное относительно времени условие, поскольку оно, конечно, не выполняется в более поздней Вселенной: там множество гравитационных волн и черных дыр.

¹⁶⁴ Стивен Вайнштейн из Университета Ватерлоо убедил меня в важности электромагнитной стрелы времени. Его работа *Electromagnetism and Time-Asymmetry* (arXiv:1004.1346v2) оказала сильное влияние на содержание следующего раздела.

¹⁶⁵ Penrose, Roger *Singularities and Time-Asymmetry* / In: Hawking, S. W., and W. Israel, eds. *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1979. Pp. 581–638.

Следовательно, утверждает Пенроуз, чтобы описать наблюдаемую Вселенную, это асимметричное условие должно быть наложено на выбор (время-симметричного) решения уравнений ОТО. То, что для описания нашей Вселенной требуются асимметричные начальные условия, ослабляет довод в пользу нереальности времени из-за симметричных относительно времени законов. Нельзя игнорировать роль начальных условий и заявлять, что прошлое похоже на будущее. Чтобы хотя бы грубо описать Вселенную, начальные условия должны быть очень не похожими на нынешние¹⁶⁶.

Упор делается на начальные условия. Но у нас нет рационального объяснения, как они были выбраны, так что мы зашли в тупик и оставили важнейший вопрос о нашей Вселенной без ответа.

Есть и другой, гораздо более простой вариант. Мы считаем, что наши законы являются аппроксимацией некоторого фундаментального закона. Что если этот закон асимметричен относительно стрелы времени?

Если основной закон асимметричен, такими же будут и большинство его следствий¹⁶⁷. Не будет составлять проблему объяснение того, почему мы не наблюдаем несурзности при протекании природных процессов обратно во времени. Действительно, обратимые во времени решения уравнений не будут следовать из этого закона. И тогда тайна, почему мы видим изображения прошлого, но не будущего, будет раскрыта. То, что Вселенная сильно

¹⁶⁶ Многие физики и философы задавались вопросом, действительно ли существует несколько стрел времени. Возможно, одна или несколько стрел времени могут быть объяснены другими? Космологическая стрела времени, вероятно, к ним не относится. Легко представить, что Вселенная расширяется настолько быстро, что никакие гравитационно-связанные структуры не успевают сформироваться. Такая Вселенная останется в равновесии, и в ней не будет термодинамической стрелы времени. Следовательно, тот факт, что Вселенная расширяется, сам по себе недостаточен для объяснения термодинамической стрелы времени. Можно также представить, что Вселенная расширяется до своего максимального размера, а затем сжимается. Насколько мы знаем, наша Вселенная сейчас не такая, но есть решения уравнений ОТО, которые ведут себя таким же образом. Это был бы мир, где космологическая стрела времени разворачивается вспять на полпути. Развернется ли вспять в таком случае термодинамическая стрела времени? Соберется ли в чашку разлитое молоко, восстановится ли разбитая чашка? Писатели-фантасты любят такие сюжеты, однако, это неправдоподобно. Биологическая стрела времени может быть следствием термодинамической. Мы стареем, потому что в клетках накапливается разупорядоченность. Предпринимаются также попытки объяснить по крайней мере некоторые из эмпирических стрел времени с помощью термодинамической стрелы времени. Мы помним прошлое, но не будущее, потому что память – это форма организации, а организация со временем уменьшается. В конце концов, может, термодинамическая стрела времени сводится к выбору начальных условий? Это предположил Пенроуз. Он утверждал, что его гипотеза кривизны Вейля могла бы объяснить существование термодинамической стрелы времени, потому что ранняя Вселенная без черных или белых дыр обладала значительно меньшей энтропией, чем могла бы, если бы случайным образом была заполнена черными и белыми дырами. Пенроуз опирается на идею о том, что черные дыры обладают энтропией. Это удивительный факт, обнаруженный Джекобом Бекенштейном в 1972 году и подробно изученный Стивеном Хокингом. Черные дыры обладают огромной энтропией, поскольку в высшей степени необратимое действие, которое вы можете совершить – это отправить что-то в черную дыру. Учитывая огромное количество энтропии, которое может существовать во всех черных дырах в ранней Вселенной, реальная Вселенная без каких-либо начальных черных дыр образовалась в состоянии почти минимальной энтропии. Гипотеза Пенроуза будет успешно работать в случае, если Вселенная расширяется достаточно медленно и равномерно, что необходимо для формирования гравитационно-связанных структур. С этой точки зрения, высокоорганизованная Вселенная весьма маловероятна, поскольку большинство начальных условий приведет к Вселенной, которая образуется и остается в состоянии равновесия. Она с самого начала была бы наполнена светом и гравитационными волнами, переносящими образы прошлого или будущего. Черные и белые дыры будут доминировать с самого начала. В мире, управляемом время-симметричными законами, объяснение, почему мы живем в сложной Вселенной, основано на крайне маловероятном выборе время-асимметричных начальных условий.

¹⁶⁷ Из основополагающего время-асимметричного закона должны следовать время-симметричные законы приближительной эффективной теории, применимые в низкоэнергетических пределах и для случаев малой кривизны пространства-времени. Таким образом, временная асимметрия могла быть сильно выраженной на самых ранних этапах формирования Вселенной, что могло бы объяснить потребность в высоко время-асимметричных начальных космологических условиях.

асимметрична во времени, будет объясняться асимметрией во времени основного закона. Время-асимметричная Вселенная не будет представляться маловероятной. Она станет необходимостью.

Это, насколько я понимаю, имел в виду Пенроуз. Различие между физикой в районе начальной сингулярности и физикой более поздней Вселенной вытекает из квантовой теории гравитации, которая в представлении Пенроуза должна быть сильно время-асимметричной теорией. Но во время-асимметричной теории неестественно представить время возникающим. Если фундаментальная теория не содержит понятия времени, нет возможности отличить прошлое от будущего. В таком случае невероятность нашей Вселенной по-прежнему требует объяснений.

В рамках время-асимметричной теории гораздо естественнее считать время фундаментальным понятием. Действительно, нет ничего естественнее фундаментальной теории, в которой прошлое отличается от будущего, поскольку прошлое и будущее разные. В рамках метафизического представления поток моментов времени из прошлого в будущее реален, и совершенно естественно иметь время-асимметричные законы, управляющие время-асимметричной Вселенной. Это говорит о реальности времени, поскольку позволяет избежать необходимости оставить невероятное свойство асимметрии Вселенной без объяснения. Давайте считать это шагом к возвращению времени.

Можем ли мы говорить о Вселенной как о невероятном явлении? В этой главе я объявлял нашу Вселенную или ее начальные условия невероятными (например, когда утверждал, что маловероятно, чтобы Вселенная, подчиняясь время-симметричным законам, обладала стрелой времени). Но что это значит – что Вселенная маловероятна? Она уникальное явление, единственное в своем роде. Имеет ли смысл описывать какие-либо ее свойства на языке вероятности?

Мы должны понимать, что имеем в виду, когда говорим: некая система находится в невероятной конфигурации. В рамках ньютоновой парадигмы это имеет смысл, поскольку описание относится к подсистеме Вселенной, которая может быть одной из многих своего рода. Но это не относится к Вселенной в целом.

Можно попытаться определить вероятность наличия у нашей Вселенной определенных свойств, предполагая, что начальные условия выбраны случайно из конфигурационного пространства. Но мы знаем, что это неверно. Мы знаем, что наша Вселенная не является результатом случайного выбора, потому что в этом случае многие ее свойства были бы чрезвычайно маловероятны.

Можно избежать этих затруднений, представив, что есть много Вселенных. Однако (см. главу 11) существует два класса теорий мультивселенной: те, в которых наша Вселенная является нетипичной и, следовательно, маловероятной (например в теориях, в которых Вселенные порождаются в результате бесконечной инфляции), и те, в которых генерируется ансамбль Вселенных, где такая Вселенная, как наша, вероятна (например модель космологического естественного отбора). Я указывал в главе 11, что экспериментально проверяемые предсказания возможны лишь во втором классе. В первом классе теорий для выбора из невероятных Вселенных должен быть применен антропный принцип, и никакие предсказания не могут быть независимо проверены. Мы должны сделать вывод: неважно, существует множество Вселенных или лишь одна. В утверждении, что наша Вселенная маловероятна, нет никакого эмпирического содержания.

Но целая наука – термодинамика – основана на применении понятия вероятности к микросостоянию системы. Отсюда следует, что мы, применяя термодинамику для описания свойств Вселенной в целом, совершаем космологическую ошибку¹⁶⁸. Единственный способ

¹⁶⁸ Обратите внимание, что мы говорим о свойствах всей Вселенной, которые не являются свойствами малых подсистем. Мы всегда можем применить понятие вероятности к небольшим подсистемам или областям Вселенной, но этим не исчерпывается все, что мы хотим знать о ней.

избежать ее (и парадокса невероятной Вселенной) – обосновать, почему Вселенная сложна и интересна, время-асимметричной физикой, делающей такую Вселенную, как наша, неизбежной, а не невероятной.

Это не единственный случай, когда физики, ошибочно применяя термодинамику к Вселенной в целом, приходят к парадоксальным выводам. Людвиг Больцман, предложивший статистическое объяснение энтропии и второго начала термодинамики, кажется, первым дал ответ, почему Вселенная не находится в равновесии. Он не знал ни о расширяющейся Вселенной, ни о теории Большого взрыва. В его космологической модели Вселенная была вечной, статической – и загадочной: вечность означала, что Вселенная должна уже достичь состояния равновесия, поскольку у нее бесконечно много времени, чтобы это сделать.

Возможно, объяснением того, почему Вселенная не находится в равновесии, для Больцмана служило следующее обстоятельство: Солнечная система и область вокруг нее стала относительно недавно областью очень большой флуктуации, в которой Солнце, планеты и окружающие звезды образовались спонтанно из газа, находившегося в равновесии. Энтропия в нашей области постоянно увеличивается по мере нашего движения к равновесному состоянию. Это был, наверное, лучший ответ, который вписывался в картину космологии конца XIX века. Но она неверна. Мы это знаем, поскольку теперь можем наблюдать за эволюцией Вселенной почти с момента Большого взрыва и на расстояниях до 13 миллиардов световых лет. Мы не видим оснований, чтобы наша область Вселенной представляла собой флуктуацию в статичном, равновесном мире. Вместо этого Вселенная эволюционирует во времени, по мере расширения образуя структуры всех масштабов.

Больцман не мог этого знать, но вот довод, который он и его современники могли взять на вооружение. Он вытекает из наблюдения: чем меньше флуктуация, чем чаще она происходит в состоянии равновесия. Следовательно, чем меньше пространственная область, выведенная из равновесия, тем выше вероятность такого явления.

Астрономы во времена Больцмана знали, что размер Вселенной составляет по крайней мере десятки тысяч световых лет в поперечнике и что в ней много миллионов звезд. Так, если наша область пространства является областью флуктуации, то это, должно быть, очень редкая флуктуация – гораздо более редкая, чем другие. Рассмотрим область флуктуации, которая содержит лишь Солнечную систему. Мы знаем, что объем флуктуации гораздо больше, иначе ночью мы ничего не видели бы, кроме инфракрасного излучения от окружающего газа, находящегося в равновесии. Но, согласно предположению Больцмана, такие флуктуации, как наша, должны в равновесной Вселенной происходить гораздо чаще, чем то, что мы видим: миллиарды звезд, каждая из которых представляет собой неравновесное состояние, подобно Солнечной системе. Вероятность неравновесного состояния размером с Солнечную систему гораздо выше, чем для области галактического размера¹⁶⁹.

Мы можем развить эту логику. Мы знаем, что мы – мыслящие существа, ощущающие свое присутствие в мире. Но чтобы создать мозг, воспоминания и образы, потребуется флуктуация гораздо меньшего объема, чем та, которая сотворила живую планету у огромной звезды. Мы можем называть флуктуацию, в результате которой образовался лишь один мозг с воспоминаниями о воображаемом мире, *больцмановским мозгом*.

Существует целый спектр возможностей объяснить наше невероятное существование как флуктуацию Больцмана в равновесной Вселенной. Мы можем быть частью флуктуации размером с Солнечную систему или с Галактику с миллионами живых существ – либо флуктуацией в один мозг с образами и воспоминаниями. Последний вариант требует гораздо меньше информации, это не такое сильное понижение энтропии. Флуктуация в один мозг в вечной Вселенной встречается гораздо чаще, чем флуктуации размером с Солнечную

¹⁶⁹ Конечно, учитывая бесконечное время, флуктуации любого масштаба происходят бесконечное число раз. Поэтому сложно утверждать, что редкие флуктуации происходят реже, так как отношение двух бесконечных чисел плохо определено.

систему или с галактику с целыми популяциями мозгов.

Это *парадокс больцмановского мозга* : в бесконечный период времени во Вселенной существует гораздо больше мозгов, сформированных в результате небольших флуктуаций, чем мозгов, возникших в процессе эволюции, требующем флуктуаций, которые длятся миллиарды лет. Как сознательные существа мы, наиболее вероятно, представляем собой больцмановские мозги. Но тогда, скорее всего, наш опыт и воспоминания были бы бессвязными и некоррелированными. Столь же маловероятно, что наш мозг будет удерживать образы необъятной Вселенной, галактик и звезд вокруг. Таким образом, сценарий Больцмана оказывается примером *reductio ad absurdum* . Это не должно нас удивлять: мы совершили космологическую ошибку, и это привело нас к парадоксальному выводу. Вневременной взгляд на физику, основанный на ньютоновой парадигме, показал свою несостоятельность перед элементарными вопросами о Вселенной: почему она интересна, почему мы существуем и любимся ею?

Но если мы принимаем гипотезу о реальности времени, мы открываем возможности для физики, асимметричной с точки зрения стрелы времени, в которой Вселенная может естественно развиваться от простого к сложному. Так мы разрешим парадокс невероятной Вселенной.

Глава 17

Возрождение времени из света и тепла

Выше мы рассмотрели одну из главных космологических головоломок: почему Вселенная интересна и со временем становится все интереснее. Попытки ответить на этот вопрос, опираясь на ньютонову парадигму и вытекающую из нее вневременную картину мира, привели к двум парадоксам: утверждению, что уникальная Вселенная маловероятна, и парадоксу больцмановского мозга. Теперь я объясню, как принципы новой космологической теории (см. главу 10) помогут понять, почему Вселенная интересна, и избежать парадоксов, описанных в главе 16.

Начнем с вопроса: может ли Вселенная содержать два одинаковых момента времени? Существование стрелы времени означает, что каждый миг уникален. Вселенная в разные моменты времени различна. Эти различия проявляются в свойствах галактик или, скажем, в относительном содержании химических элементов. Случайна ли смена моментов времени, или она отражает глубокий принцип? В теориях, основанных на ньютоновой парадигме, существование стрелы времени случайно. В вечной Вселенной, пребывающей в равновесии, найдется множество пар идентичных или очень сходных моментов времени.

Есть и более глубокий принцип, утверждающий, что нет двух идентичных моментов времени. Это *принцип тождества неразличимых* (см. главу 10), следствие принципа достаточного основания Лейбница. Он гласит: во Вселенной не может быть двух различных объектов, которые неразличимы. Это диктует нам здравый смысл. Принцип Лейбница вытекает из идеи, что физические свойства тел являются реляционными. Рассмотрим два электрона, один из которых в атоме в нашем одеяле, а второй – на вершине горы на обратной стороны Луны. Они не тождественны, потому что их местоположение является одним из их свойств. С реляционной точки зрения они различимы, поскольку имеют различное окружение¹⁷⁰.

Абсолютного пространства нет, и невозможно спросить, что происходит в определенной точке, не указав, как отличить эту точку. Поэтому мы не можем локализовать объект, если не найдем способ указать место. Один из способов определить, где вы, –

¹⁷⁰ Противоречит ли принцип тождества неразличимых Лейбница правилам статистики Бозе, которая позволяет бозонам находиться в одном и том же квантовом состоянии? Краткий ответ (развернутый ищите на сайте) таков: принцип Лейбница запрещает двум событиям иметь одно и то же математическое ожидание значения квантового поля.

отметить уникальность видимого из этой точки. Допустим, некто утверждает, что два объекта в пространстве обладают точно такими же свойствами и расположены в точно таком же окружении. Значит, неважно, как далеко эти два объекта: вы обнаружите одинаковые конфигурации всего остального в космосе. Если бы такая странная ситуация имела место, то не было бы способа указать наблюдателю, как отличить один объект от другого.

Поэтому требовать, чтобы мир содержал два одинаковых объекта, – значит требовать невозможного. Тогда во Вселенной должны существовать два места, в которых вид Вселенной точно совпадает. Вселенная как целое в значительной степени определяется, казалось бы, простым требованием того, что она не должна содержать двух одинаковых объектов¹⁷¹.

Тот же довод применим к событиям в пространстве-времени. Принцип тождества неразличимых требует: в пространстве-времени не может быть двух событий с абсолютно одинаковыми наблюдаемыми свойствами. Не может быть и двух идентичных моментов времени. Рассматривая ночное небо, мы видим Вселенную с определенного места в определенный момент. Вид этот включает в себя все фотоны, источники которых находятся на различном расстоянии от нас. Если физика реляционная наука, эти фотоны определяют внутреннюю реальность данного события – взгляда на ночное небо в конкретном месте в конкретное время. Принцип тождества неразличимых тогда гласит, что вид Вселенной, который наблюдатель может видеть в каждый момент в истории Вселенной, уникален. Предположим, пока вы спали, вас похитили пришельцы. Они забрали вас с собой на машине времени. В принципе, если бы вы проснулись и обнаружили, что находитесь в далекой галактике, вы смогли бы сказать, где именно вы во Вселенной, описав то, что видите вокруг. В дальнейшем вы сможете точно сказать, в какой момент в истории Вселенной вас транспортировали.

Это значит, что наша Вселенная не может иметь точной симметрии (см. главу 10). Наличие симметрий полезно для анализа моделей малой части Вселенной, однако все симметрии, до сих пор предлагаемые физиками, оказались приблизительными или нарушенными.

В соответствии с принципом тождества неразличимых наша Вселенная уникальна: каждый момент и любое место в каждый момент однозначно отличаются от любого другого. В такой Вселенной не может быть условий, необходимых для реализации ньютоновой парадигмы. Этот метод, как отмечалось, требует, чтобы мы могли многократно повторить эксперимент, а также отличать эффект действия закона природы от эффектов, связанных с изменением начальных условий. Эта цель может быть достигнута лишь приблизительно: чем подробнее наблюдения, тем очевиднее, что ни одно событие или эксперимент не может быть точной копией другого. Мы будем называть *лейбницианскими* Вселенные, удовлетворяющие принципу тождества неразличимых.

С точки зрения Больцмана, наибольшая часть истории Вселенной состоит из периодов теплового равновесия, когда энтропия максимальна и Вселенная не имеет структуры или организации. Эти долгие мертвopodobные периоды перемежаются периодами сравнительно короткими, в которых структура и организация возникают из-за статистических флуктуаций и затем снова растворяются, что обусловлено тенденцией возрастания энтропии.

В какой Вселенной мы живем: Больцмана или Лейбница? В лейбницианской Вселенной время реально в том смысле, что нет двух идентичных моментов. Во Вселенной Больцмана моменты повторяются если не точно, то с любой заранее заданной степенью точности. В первом приближении все моменты во Вселенной Больцмана одинаковы, потому что в состоянии равновесия, грубо говоря, они неразличимы. Глобальные свойства, такие как температура и плотность, характеризующие средние значения микросостояний, в равновесной Вселенной однородны. Правда, атомы колеблются около этих средних

¹⁷¹ Как я указывал в главе 10, это запрещает Вселенной быть абсолютно симметричной.

значений, но этих колебаний почти никогда не бывает достаточно, чтобы проявиться на макроскопическом уровне в виде новой структуры и организации. Вселенная Больцмана, если ждать достаточно долго, повторится с любой заранее заданной точностью. В среднем промежутки между такими повторами определяются *временем возвращения Пуанкаре*. Но если время бесконечно, каждый миг повторяется бесконечное число раз.

Вселенная не может быть одновременно миром и Больцмана, и Лейбница. Если время реально, то не существует двух разных, но идентичных моментов. Время полностью реально лишь во Вселенной Лейбница. Она сложна и наполнена прекрасными уникальными структурами. Она постоянно изменяется, как бы гарантируя, что каждый момент со своими структурами уникален. Наша Вселенная именно такова.

Приятно сознавать, что наш мир удовлетворяет великим принципам вроде принципа тождества неразличимых, но это не раскрывает всех тайн, поскольку принципы не воздействуют на материю: это делают законы природы. И мы отчасти знаем ответ. Он связан с термодинамикой и гравитацией.

Один из элементов нашей лейбницианской Вселенной находится почти в тепловом равновесии. Это реликтовое или микроволновое фоновое излучение (МФИ). Но МФИ, как мы знаем, – это отпечаток ранней Вселенной, возникший около 400 тысяч лет после Большого взрыва. В состоянии равновесия находятся обширные области межзвездного и межгалактического пространства. Тем не менее, значительная часть Вселенной далека от равновесия. Самые распространенные объекты в ней – звезды, и они не находятся в равновесии со своим окружением. Звезда всегда в состоянии динамического равновесия между энергией, генерируемой в реакциях в звездном ядре (она стремится разорвать звезду), и гравитацией, которая стремится ее сжать. Звезда достигнет состояния, которое Больцман называет равновесным, тогда, когда ядерное топливо иссякнет и она закончит свой путь как белый карлик, нейтронная звезда (тогда она может образовать систему) или черная дыра. Такие системы находятся не в равновесии, а в динамичном стационарном состоянии.

Звезда может быть охарактеризована как система, находящаяся далеко от равновесного состояния, за счет постоянного потока энергии, проходящего через нее. Источниками этой энергии являются ядерные реакции и гравитация. Энергия преобразуется в звездный свет в определенном диапазоне частот. Свет падает на планеты вроде нашей и выводит их из состояния равновесия.

Это пример общего принципа¹⁷²: *потоки энергии, проходящие через открытые системы, как правило, приводят их в состояние с более высоким уровнем организации*. (Открытые – это ограниченные системы, которые могут обмениваться энергией со своим окружением.) Мы можем назвать этот принцип *принудительной самоорганизацией*. Если принципы достаточного основания и тождества неразличимых имеют первостепенную важность, то принцип принудительной самоорганизации трудится в мириадах звезд и галактик и обеспечивает разнообразие во Вселенной.

Налейте в кастрюлю воды и поставьте на плиту. Система (кастрюля и вода) является открытой, поскольку к ней подводится энергия. Она нагревает воду и уходит через воду в воздух. Чтобы упростить систему, накроем кастрюлю крышкой, чтобы вода не уходила даже в виде пара. Через некоторое время вода придет к стационарному состоянию, в котором ни ее температура, ни плотность не распределены равномерно. Температура воды будет высокой внизу и уменьшаться по направлению к поверхности (плотность изменяется в обратном порядке). Энергия вывела воду из равновесия. Вскоре образуется структура: циклы конвекции, в которых вода движется упорядоченным образом. Эти циклы возникают благодаря теплу. Вода, нагреваясь, расширяется и движется вверх в виде столба. На

¹⁷² Более подробно о самоорганизации см. книги Бака, Кауфмана и Моровица. Одна из версий принципа принудительной самоорганизации – это теорема о циклах, описанная в книге Моровица, а другая – явление самоорганизующейся критичности, описанное в книге Бака.

поверхности она отдает часть тепла, становится плотнее окружающей среды и опускается, создавая столб. Поскольку вода не может подниматься и опускаться по одной и той же траектории, складывается структура в виде колонны в объеме кипящей воды.

Постоянный поток энергии, идущий через систему, может привести к образованию сложных структур, и такая система далека от термодинамического равновесия. Другой пример – песчаные волны на дюнах. На другом конце спектра сложности – жизнь. Оба примера, как и множество явлений между ними, – результат последовательного воздействия потока энергии. Это, кроме прочего, означает, что сложные самоорганизующиеся системы не бывают замкнутыми.

Потоки энергии образуют системы типа Вселенной Лейбница. Живая материя, как правило, представлена множеством копий, но каждая копия отличается от остальных. И чем выше вы поднимаетесь по лестнице сложности, тем сильнее различаются копии. Второе начало термодинамики применимо лишь к замкнутым системам, не обменивающимся материей и энергией с миром. Но ни одна живая система не является замкнутой. Мы живем за счет потоков вещества и энергии, генерируемых, в конечном счете, Солнцем. Если нас поместить в ящик (прообраз погребения!), мы погибнем.

Аристотель, полагавший, что подлунный мир сохраняется вне равновесия за счет проходящей сквозь него энергии, был прав. Непонимание этого привело некоторых ученых и философов к конфликту между вторым началом термодинамики и тем фактом, что естественный отбор производит все менее вероятные структуры. Здесь нет противоречия: закон возрастания энтропии неприменим к незамкнутой биосфере. Естественный отбор – это механизм спонтанной самоорганизации.

Очень сложные системы не могут быть равновесными, потому что порядок не случаен. Высокая энтропия и сложность системы несовместимы. Но сложность еще не означает, что система обладает низкой энтропией. Группа атомов, выстроенная по прямой, обладает низкой энтропией, но эта система вряд ли сложна. Джулиан Барбур и я определили сложность через неоднородность. Система отличается высокой неоднородностью, если можно отличить каждую из ее подсистем, имея минимальный объем сведений об их связи или соотношении с системой¹⁷³. Город характеризуется высокой неоднородностью, потому что, взглянув вокруг, легко понять, где мы. Такие условия возникают в результате самоорганизации в природе в системах, далеких от равновесия.

Общей особенностью самоорганизующихся систем является стабилизация с помощью механизмов обратной связи. Любое существо представляет собой сложную сеть процессов обратной связи, которые регулируют, каналируют и стабилизируют проходящие через него потоки энергии и материи. Обратная связь может быть положительной. Это означает, что она ускоряет производство чего-либо (вспомните визг микрофона, если его поднести к динамику). Отрицательная обратная связь приглушает сигнал (как термостат, который включает печь, когда дома холодно, и выключает ее, когда становится жарко).

Структуры в пространстве и времени образуются благодаря работе конкурирующих механизмов обратной связи. Когда положительная обратная связь конкурирует с отрицательной на разных уровнях, образуются сложные структуры в пространстве. Это основной механизм биологической самоорганизации, обнаруженный Аланом Тьюрингом¹⁷⁴. Он создает у эмбриона структуры, обозначающие части тела. Этот механизм может включиться и позднее, чтобы определить, например, окрас кошки или рисунок крыльев бабочки.

Что мы видим, когда наблюдаем за Вселенной в масштабе крупнее звезд и солнечных систем? Звезды сгруппированы в галактики – там они рождаются. Сами галактики также

¹⁷³ Barbour, Julian, and Lee Smolin *Variety, Complexity and Cosmology* // hep-th/9203041.

¹⁷⁴ Turing, Alan *The Chemical Basis of Morphogenesis* // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 237:641, 37–72 (1952).

далеки от термодинамического равновесия. Наш Млечный Путь – типичная спиральная галактика. В ней имеются не только звезды, но и межзвездные облака газа и пыли, из которых формируются звезды. Газ, поступая снаружи, медленно накапливается на галактическом диске. Это один из факторов, вызывающих изменения в Галактике. Когда звезды в конце жизни взрываются, как сверхновые, они производят пыль, тоже попадающую в галактический диск. Газ и пыль существуют в разных фазах: некоторые очень горячие, некоторые конденсируются в очень холодные облака. Процессами самоорганизации в Галактике движет звездный свет – энергетические потоки, идущие от звезд. Время от времени массивная звезда взрывается как сверхновая, и это также дает Галактике много энергии и материи. Мы наблюдаем космические структуры гораздо более крупные, нежели галактики (объединенные в скопления и “блины”, разделенные пустотами). Считается, что эти структуры образуются благодаря темной материи и удерживаются вместе с помощью ее взаимодействий.

Поэтому наша Вселенная характеризуется структурой и сложностью в широком диапазоне масштабов: от организации молекул в клетках до организации галактик в скоплениях. Существует иерархия самоорганизующихся систем, возникающих благодаря потокам энергии и стабилизовавшихся за счет процессов обратной связи. Это Вселенная, которая сильнее напоминает Вселенную Лейбница, чем Больцмана.

Итак, Вселенная развивается от менее сложной к более структурированной, от равновесия к сложности. Есть веские основания полагать, что материя и излучение в ранней Вселенной находились почти в тепловом равновесии. Материя и излучения были в горячем состоянии, с заметно более равномерно распределенной температурой, которая растет по мере того, как мы идем все дальше в прошлое. До отделения фотонов от материи (400 тысяч лет после Большого взрыва) материя находилась в равновесии с излучением. Это равновесие, насколько известно, нарушалось лишь случайными флуктуациями плотности материи. Все структуры, которые мы сейчас наблюдаем во Вселенной, образовались после отделения вещества от излучения. Зародышевые начальные структуры были посеяны в виде малых случайных флуктуаций плотности, и эти структуры росли по мере того, как Вселенная расширялась. Сначала сформировались галактики, затем звезды и, наконец, жизнь.

Это, конечно, не является примером наивного применения второго начала термодинамики. Оно утверждает, что замкнутые системы увеличивают свою случайность, становясь со временем более беспорядочными и менее сложными и структурированными. Но это противоречит тому, что мы видим: сложность растет по мере формирования структур на всех уровнях Вселенной. При этом самые замысловатые конструкции сформировались совсем недавно.

Увеличение сложности означает время. Не существует статической и одновременно сложной системы. У Вселенной есть история, и она рассказывает о возрастающей сложности.

Это не отменяет второго начала термодинамики. Замкнутые системы со временем приходят к равновесию. Кроме того, формирование сложных систем на самом деле не противоречит увеличению энтропии, поскольку приращение энтропии и усложнение системы происходят в разных местах. Биосфера Земли формируется почти 4 миллиарда лет. Эта самоорганизующаяся система развивается благодаря солнечной энергии. Свет, в основном в видимом диапазоне спектра, используется растениями в фотосинтезе. При фотосинтезе энергия фотонов расходуется на образование химических связей. Энергия может катализировать химические реакции, в результате которых могут, например, формироваться белковые молекулы. Энергия, таким образом, проходит через биосферу, выделяется в виде тепла и в конечном счете излучается в виде инфракрасных фотонов в космос. Эти фотоны затем, может быть, нагревают межзвездную пыль в Солнечной системе.

Один квант энергии, возможно, стал катализатором формирования сложной молекулы и, следовательно, снизил энтропию биосферы, но, когда он переизлучился в виде инфракрасного света в пространство, это увеличило энтропию Солнечной системы в целом.

Пока увеличение энтропии, вызванное разогревом межзвездной пыли где-то в космосе, превышает уменьшение энтропии за счет создания молекулярных связей, долгосрочный суммарный результат согласуется со вторым началом термодинамики.

Поэтому, если рассматривать Солнечную систему как замкнутую, то и ее самоорганизация совместима с общим увеличением энтропии. Система в целом старается прийти к равновесию и увеличивает энтропию там, где может. Второе начало термодинамики делает все, чтобы привести Солнечную систему к равновесию. Но пока в ней есть большая звезда, излучающая горячие фотоны в холодное космическое пространство, достижение равновесия откладывается. Так как звезды светят миллиарды лет, у нас еще много времени. Само существование звезд тесно связано с вопросом, почему Вселенная сейчас, спустя почти 14 миллиардов лет после своего рождения, далека от равновесия.

А почему существуют звезды? Если Вселенная должна стремиться к увеличению энтропии и беспорядку, как случилось, что ее наводняют звезды, выводящие Вселенную из равновесия? Если наша Вселенная является Вселенной Лейбница, в ней должно существовать нечто вроде звезд.

Физика звезд основывается на двух необычных особенностях законов природы. Первый – это невероятно тонкая настройка параметров современной физики. Эта настройка включает массы элементарных частиц и константы связи четырех взаимодействий. Она обеспечивает возможность ядерного синтеза. Водород в составе звезд ведет себя не так, как в отсутствие ядерных сил. Вместо того чтобы беспорядочно перемещаться, атомы водорода собираются в центре звезды и взаимодействуют по-новому. Они сливаются, образуя гелий и несколько других элементов. (Представьте, что вы оказались в клетке. Все одно и то же скучное равновесие, и каждый час похож на любой другой. И вдруг открывается дверь, и вы оказываетесь в абсолютно новом мире!) Законы термодинамики, примененные к атомам, не могут предсказать ядерный синтез и его возможности.

Вторая необычная особенность законов природы связана с поведением системы, части которой удерживаются вместе за счет силы тяжести. Гравитация нарушает наши наивные представления о термодинамике. Обыденное наблюдение, которое также является следствием второго начала термодинамики, говорит нам, что тепло распространяется от горячих тел к холодным: лед тает, вода в чайнике кипит. Тепло перестает перетекать, когда температура двух тел сравняется и они достигнут состояния равновесия. Обычно, когда мы забираем энергию у тела, его температура падает, а когда передаем, температура растет. Поэтому, когда поток тепла распространяется от горячего тела к холодному, последнее нагревается, а первое остывает. Это продолжается до тех пор, пока их температура не станет одинаковой. Поэтому воздух в помещении имеет одну температуру. Если бы это было не так, энергия перетекала бы из теплой стороны комнаты в холодную, пока не было бы достигнуто общее значение температуры.

Такое поведение делает равновесную систему устойчивой к эффектам, вызываемым небольшими флуктуациями. Предположим, в результате флуктуации в одной части комнаты стало чуть теплее. Энергетический поток будет распространяться от теплой части, охлаждая ее, в сторону холодной части, нагревая ее, и вскоре температура снова выровняется. Большинство систем работает так. Но это не все.

Представьте: есть газ, который при передаче ему энергии охлаждается, и нагревается, когда энергию забирают. Это может показаться парадоксальным, но такие газы существуют. Они должны быть нестабильными. Предположим, наша комната наполнена таким газом при одной температуре. Флуктуация переместит немного энергии из левой части комнаты в правую. Тогда левая сторона нагреется, правая остынет. Это приведет к увеличению потока энергии из левой, горячей части, к холодной. И чем больше энергии передается прохладной части комнаты, тем сильнее она остывает. Это пример нестабильности, в котором разница температур между двумя частями комнаты постоянно растет.

Теперь рассмотрим нагретую часть комнаты. Предположим, произошла другая

флуктуация, в результате которой в центре теплой части температура немного снизилась. Благодаря тому же феномену с положительной обратной связью произойдет дальнейшее охлаждение центра и разогрев области вокруг него. Со временем небольшая флуктуация перерастает в сильно выраженную особенность. Это может происходить снова, и скоро появится сложная структура из чередующихся холодных и горячих объемов газа.

Система, которая так работает, со временем превращается в сложную. Сказать, что из нее получится, трудно, потому что есть огромное количество конфигураций, в которые такая система может эволюционировать. Мы называем эти системы *антитермодинамическими*. Для них второе начало термодинамики действует, однако раз передача энергии в объем газа его охлаждает, состояние, в котором равномерно распределен газ, крайне нестабильно.

Гравитационно-связанные системы ведут себя таким необычным образом. Звезды и звездные системы, галактики, черные дыры – все это антитермодинамические системы. Они остывают, когда вы затрачиваете на них энергию. Все они неустойчивы. Это не допускает однородности и стимулирует формирование структур в пространстве и времени.

Это во многом объясняет, почему Вселенная не находится в равновесии сейчас, спустя 13,7 миллиарда лет после своего рождения. Рост структуры и сложности Вселенной во многом объясняется тем, что наполняющие ее гравитационно-связанные системы (от скоплений галактик до звезд) антитермодинамические.

Нетрудно понять, почему такие системы антитермодинамические. Гравитацию от других сил отличают два основных свойства: во-первых, она дальнедействующая, во-вторых, повсеместно действующая. Рассмотрим планету на орбите вокруг звезды. Если вы затратите на нее энергию, она перейдет на орбиту дальше от звезды, где скорость ее вращения уменьшится. Таким образом, увеличение энергии снижает скорость планеты, и это уменьшает температуру в системе (температура – лишь мера средней скорости тел в системе). И наоборот: если вы заберете энергию, планета переместится ближе к звезде и начнет вращаться быстрее. Таким образом, отдача энергии нагревает систему.

Мы можем сравнить это с поведением атома, части которого удерживаются вместе электрическими силами между зарядами. Электрическая сила, как и гравитационная, действует на больших расстояниях, но лишь между противоположными зарядами. Положительно заряженный протон притягивает отрицательно заряженный электрон, но когда электрон связан с протоном, получившийся атом имеет нулевой суммарный заряд. В этом случае говорят, что система *насыщена*, атом не притягивает другие частицы. Солнечная система работает противоположным образом, потому что когда звезда притягивает несколько планет, получившаяся система будет притягивать пролетающие мимо тела еще с большей силой, чем звезда без планет. Это еще пример нестабильности: гравитационно-связанная система притягивает все больше тел.

Это антитермодинамическое поведение проявляется, например, как деволюция звездных скоплений. Если бы звездное скопление представляло собой термодинамическую систему, оно могло бы достичь равновесия (в данном случае – состояния, в котором все его звезды имели одну среднюю скорость), и скопление осталось бы навсегда скоплением. Вместо этого скопление рассеивается. Всякий раз, когда звезда приближается к двойной звезде (две звезды на орбите друг вокруг друга), это может привести к изменению орбиты двойной звезды так, что расстояние между ними сокращается. При орбитальном сжатии выделяется энергия, которая передается третьей звезде. У третьей звезды теперь достаточно энергии, чтобы покинуть скопление. В итоге от скопления мало что остается, кроме некоторых двойных звезд на близких орбитах друг вокруг друга и облака быстро расходящихся во все стороны звезд.

Это противоречит не второму началу термодинамики, а лишь его наивной интерпретации. Закон, гласящий, что энтропия, как правило, возрастает, лишь кодифицирует банальную истину: чем больше возможностей того, что нечто случится, тем выше вероятность, что это произойдет. Нормальные термодинамические системы кончают свое существование одинаково: приходят к скучному равновесию. Гравитационно-связанные,

антитермодинамические системы в итоге переходят в одно из многообразных состояний.

Тому, что наша Вселенная интересна, есть три объяснения. Во-первых, *принцип принудительной самоорганизации* управляет мириадами подсистем в разных масштабах, начиная с молекулярного и заканчивая галактическим, и направляет их эволюцию. Двигателем этого процесса выступают звезды, которые существуют благодаря сочетанию *тонкой настройки фундаментальных законов* с антитермодинамическим характером гравитационно-связанных систем. Но эти силы могут воспроизвести Вселенную со звездами и галактиками лишь в случае, если ее начальные условия сильно асимметричны относительно стрелы времени.

Все это в определенной степени может быть принято в рамках ньютоновой парадигмы. Но если мы остановимся на ней, то мироздание окажется основанным на невероятных событиях, например уникальности законов природы и начальных условий. Печально, но единственная Вселенная, которая естественно появляется в ньютоновой парадигме, мертва. Очевидно, что это не наш случай. А с точки зрения реальности времени естественно, что и Вселенная, и ее фундаментальные законы асимметричны во времени.

Глава 18

Бесконечное пространство или бесконечное время?

Итак, принимая реальность времени, можно объяснить нетривиальность устройства Вселенной. Но как долго она сможет оставаться сложной и структурированной? Может ли неравновесное состояние сохраняться бесконечно? Может быть, мы живем в “пузыре сложности” в равновесной Вселенной?

Это подводит нас к самым скользким темам в современной космологии: бесконечности пространства и времени. Нет понятия романтичнее бесконечности, но в науке эта концепция приводит к путанице. Представьте, что Вселенная бесконечна в пространстве, а одни и те же законы действуют повсеместно, но начальные условия выбраны случайно. Такова Вселенная Больцмана. Почти все в бесконечной Вселенной находится в термодинамическом равновесии. Если что-то интересное и случается, то лишь вследствие флуктуаций. Эти флуктуации возникают где-то во Вселенной, и если существует бесконечно много “где-то”, то каждая флуктуация, какой бы маловероятной она ни была, происходит бесконечное число раз¹⁷⁵.

Поэтому наша часть наблюдаемой Вселенной может быть просто статистической флуктуацией. Если Вселенная бесконечна, а протяженность нашей наблюдаемой Вселенной составляет около 93 миллиардов световых лет, то такая часть будет бесконечно повторяться в бесконечном пространстве. Так что если Вселенная представляет собой модель Больцмана, мы существуем бесконечное число раз.

Это нарушает принцип Лейбница: нет и не может быть двух идентичных мест во Вселенной. Но не только его. Представьте, что сегодняшний день мог оказаться совершенно иным. Я мог бы не родиться. Вы женились бы на своей первой подружке. Некто, не вняв совету друзей, сел нетрезвым за руль и сбил насмерть ребенка. Ваш кузен родился в другой, неблагополучной, семье и совершил в итоге массовое убийство. Разумные динозавры эволюционировали, решили проблему климатических изменений, и млекопитающие не взяли верх над пресмыкающимися. Все это могло случиться и изменить нынешнюю конфигурацию Вселенной. Каждая такая конфигурация – возможная конфигурация атомов. Поэтому в бесконечном пространстве каждая из них возникает бесконечное число раз.

Ужасающая перспектива! Встает, например, вопрос: почему я должен заботиться о последствиях своих решений, если все другие решения уже приняты другими экземплярами

¹⁷⁵ См.: Greene, Brian *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*. New York: Knopf, 2011.

меня в других областях бесконечной Вселенной? Я могу воспитать своего ребенка в этом мире, но должен ли я заботиться о других детях, страдающих из-за других меня?

Кроме этих этических вопросов есть и касающиеся полезности науки. Если случается все, что может случиться, то области, требующие объяснений, значительно сокращаются. Принцип достаточного основания требует наличия рациональной причины в каждом случае, когда во Вселенной реализуется один сценарий, а не другой. Но если во Вселенной уже все сценарии реализованы, объяснять ничего не надо. Конечно, наука сможет дать нам понимание локальных условий, но и это бесперспективно, потому что истинный закон будет гласить: все, что может произойти, происходит бесконечное число раз, прямо сейчас. Это своего рода *reductio ad absurdum* ньютоновой парадигмы, примененной к космологии, – еще один пример космологической ошибки. Я называю это бесконечной трагедией Больцмана.

Одна из ее причин в том, что предсказательная сила физики значительно снижается: значение понятия вероятности уже не то, что вы думаете. Предположим, вы проводите эксперимент, для которого квантовая механика предсказывает исход А в 99 % случаев, Б – в 1 % случаев. Эксперимент поставлен тысячу раз. Примерно в 990 случаев можно ожидать результата А. Поставив на А, вы чувствовали бы себя уверенно, потому что А выпадет примерно в 99 из 100 случаев, а Б – в 1 из 100 случаев. Хороший шанс подтвердить предсказания квантовой механики! Но в бесконечной Вселенной бесконечное число копий эксперимента. Бесконечное число раз вы наблюдаете результат А, бесконечное число – Б. Так что предсказание квантовой механики о том, что один из исходов эксперимента наблюдается в 99 раз чаще другого, в бесконечной Вселенной не поддается проверке.

В квантовой космологии это называется *проблемой измерения*. Почитав и расспросив знатоков, я пришел к выводу, что проблема нерешаема. Я предпочитаю принять как факт: квантовая механика доказывает, что мы живем в конечной Вселенной, содержащей лишь один экземпляр меня.

Мы можем избежать трагедии бесконечной Вселенной, отрицая, что Вселенная бесконечна в пространстве. Принимая во внимание, конечно, что мы можем наблюдать ее до определенного расстояния, можно смело высказать гипотезу, что Вселенная конечна, но неограниченна, как полагал Эйнштейн. Следовательно, Вселенная имеет топологически замкнутую поверхность в виде сферы или тора.

Это не противоречит наблюдениям. Какая топология истинна, зависит от средней кривизны пространства. Если кривизна положительна (случай сферы), существует лишь одна возможность – трехмерный аналог поверхности сферы в двумерной топологии. Если средняя кривизна пространства нулевая (случай плоскости), то для конечной Вселенной есть лишь одна возможность: трехмерный аналог поверхности тора (пончика) в двумерной топологии. Если кривизна отрицательна (случай седла), для ее топологии существует бесконечный ряд возможностей. (Они слишком сложны, чтобы их описывать здесь.) Их каталогизация – триумф математики конца XX века.

Предложение Эйнштейна – это гипотеза, которая должна быть подтверждена. Если Вселенная замкнута и достаточно мала, свет должен обогнуть ее несколько раз, и мы должны увидеть несколько изображений одних и тех же далеких галактик. Это до сих пор не обнаружено. Есть, однако, веские причины считать, что космологическая теория моделируется в пространстве-времени, пространство которого замкнуто. Если Вселенная не замкнута, она бесконечна. Это противоречит интуиции и означает, что в космосе есть граница. Она бесконечно далеко, но, тем не менее, информация не может ее преодолеть¹⁷⁶.

¹⁷⁶ Вообразите двумерную плоскость. Выберите на ней точку, затем направление из этой точки. Это луч. Следуйте по лучу настолько далеко, насколько это возможно. Луч простирается на бесконечное расстояние, но мысленным взором, тем не менее, можно проследить, куда он уходит. То, куда он идет, называется точкой на бесконечности. Выберите другое направление из исходной точки. Вы получите другой луч и также, следуя его направлению, придете в точку на бесконечности. Точки на бесконечности составляют окружность. Направления на плоскости определяют круг. То же происходит в трехмерном пространстве, но точки на бесконечности составляют сферу. Это также получится, если пространство бесконечно и отрицательно

Следовательно, пространственно бесконечная Вселенная не может считаться самодостаточной системой и должна считаться частью большей системы, которая включает любую информацию, приходящую от границы.

Если бы границы находились на конечном расстоянии от нас, вы могли бы представить, что вне видимой Вселенной есть еще пространство. Информация о границе может быть передана через то, что поступает из мира за пределами этой границы¹⁷⁷.

Бесконечно удаленная граница не позволяет представить мир за ней. Мы просто должны указать, какая информация приходит, а какая исходит от нас, но выбор произволен. Не может быть дальнейших объяснений. Следовательно, ничто не может быть объяснено в рамках любой модели Вселенной с бесконечно удаленными границами. Принцип замкнутости объяснений нарушается, и с ним нарушается принцип достаточного основания.

Здесь есть технические тонкости. Но этот аргумент решающий, хотя его, насколько я могу судить, и игнорируют космологи, считающие, что Вселенная пространственно бесконечна. Я не вижу иного выхода кроме этого: любая модель Вселенной должна быть пространственно замкнутой и без границ. Нет ничего бесконечно далекого, как нет и бесконечного пространства.

Теперь поговорим о бесконечности времени.

Литература по космологии полна дум о будущем. Если Вселенная похожа скорее на модель Лейбница, чем Больцмана, то, может быть, время ее существования конечно? Возможно, в долгосрочной перспективе умрем не только мы, но и Вселенная? Предположение о том, что она конечна в пространстве, избавляет нас от парадоксов, присущих Вселенной Больцмана. Однако не от всех. Пространственно конечная и закрытая Вселенная может жить бесконечно долго, и если она не сожмется, то будет расширяться вечно. Есть бесконечно много времени для достижения теплового равновесия. Если так, не важно, сколько времени это займет. Все равно останется время для появления флуктуаций и создания невероятных структур. Таким образом, мы можем утверждать, что все, что может произойти, произойдет бесконечное число раз. Это снова приводит к парадоксу больцмановского мозга. Если должны выполняться принципы достаточного основания и тождества неразличимых, Вселенная должна избежать такого парадоксального конца.

В научной литературе предпринимались попытки рассуждений о далеком будущем Вселенной. Но чтобы рассуждать о далеком будущем, вы должны сделать некоторые

изогнуто, как седло. Если вы задались целью решить уравнения ОТО, вы должны дать информацию о том, что происходит на этой границе. Вы должны указать, что проходит к вам через границу, и то, что выходит за ее пределы. Необходимость уточнения информации о том, что происходит на бесконечно удаленной границе является обязательной и требуется в теории. (Для экспертов: уравнения Эйнштейна для пространственно бесконечной Вселенной не могут быть получены из вариационного принципа, пока не заданы граничные условия на бесконечности.) Вы не можете описать, что происходит во Вселенной, не описав то, что входит во Вселенную через границу и выходит из нее. Даже если граница бесконечно далеко.

¹⁷⁷ В ОТО мы часто используем пространство с бесконечно удаленными границами в качестве удобной модели замкнутой системы. Рассмотрим галактики. Это небольшая часть Вселенной, но мы могли бы построить ее модель как замкнутой системы. Например, мы хотим моделировать взаимодействие черной дыры в центре со звездами в галактическом диске. Для этого мы ограничим объем галактики и найдем решение уравнений ОТО, содержащее только то, что находится внутри этих границ. Но существуют некоторые технические трудности, связанные с описанием границ конечных размеров. Поэтому для удобства мы идеализируем ситуацию и раздвигаем эти границы до бесконечности. Это упрощает описание. Ничто не может войти или выйти через эти бесконечно удаленные границы, за исключением гравитационных волн и света, который мы можем использовать для наблюдения за поведением галактики. Такое использование бесконечного пространства оправданно. Тот факт, что информация должна быть указана вблизи бесконечной границы, напоминает о том, что мы имеем дело с идеализацией, в которой мы вырезали часть Вселенной и описали ее так, как если бы галактика – это все, что есть во Вселенной. Бессмысленно так моделировать всю Вселенную, однако приходится это делать, если мы принимаем ОТО в качестве космологической теории и допускаем, что Вселенная пространственно бесконечна.

существенные предположения. Одно из них – что законы природы не должны изменяться, поскольку если бы они менялись, мы оказались бы неспособны предсказать что-либо. И неоткрытых явлений, которые могут изменить ход истории Вселенной, не должно быть. Например, могут существовать силы настолько слабые, что мы до сих пор их не обнаружили, но, тем не менее, они вступают в игру на больших расстояниях и больших временных интервалах, превышающих нынешний возраст Вселенной. Это возможно. Но такой сценарий сводит на нет любое предсказание, сделанное исходя из имеющихся знаний. Не должно быть сюрпризов вроде космических “пузырей”, идущих на нас со скоростью света из-за горизонта.

Итак, мы можем надежно вывести следующее.

Галактики перестанут порождать звезды. Галактики – гигантские машины для превращения водорода в звезды. И не очень эффективные: типичная спиральная галактика ежегодно производит лишь около одной звезды. Сейчас Вселенная (возраст – почти 14 миллиардов лет) в основном состоит из изначального водорода и гелия. Несмотря на то, что водорода много, из него выйдет конечное число звезд. Даже если весь водород превратится в звезды, всегда будет последняя звезда. И это верхний предел. Скорее всего, неравновесные процессы, участвующие в звездообразовании, прекратятся задолго до того, как закончится водород.

Последние звезды выгорят. У звезд ограниченный срок жизни. Массивные звезды живут несколько миллионов лет и умирают, превращаясь в сверхновые. Большинство звезд живут миллиарды лет и заканчивают как белые карлики. Наступит время, когда погаснет последняя звезда. И что тогда?

Вселенная будет заполнена материей и темной материей, излучением и темной энергией. Что произойдет во Вселенной в долгосрочной перспективе, во многом зависит от темной энергии, о котором мы знаем меньше всего. Она ассоциируется с пустым пространством. По последним данным, она составляет около 73 % всей массы-энергии Вселенной. Ее природа пока не известна, однако мы наблюдаем ее влияние на движение далеких галактик. В частности, темная энергия нужна для объяснения недавно обнаруженного ускорения всеобщего расширения. Кроме этого, мы ничего не знаем о темной энергии. Она может быть просто космологической постоянной или экзотической формой энергии с постоянной плотностью. Хотя плотность темной энергии находится примерно на одном уровне, мы не знаем, действительно ли это так – или же она меняется медленнее, чем мы регистрируем.

Варианты будущего Вселенной сильно различаются в зависимости от плотности темной энергии. Рассмотрим сначала сценарий, в котором плотность темной энергии сохраняется по мере расширения Вселенной. Если плотность постоянна, то она ведет себя как космологическая постоянная Эйнштейна. Она не уменьшается, несмотря на то, что Вселенная продолжает расширяться. Плотность остального – вся материя и все излучение – уменьшается, поскольку Вселенная расширяется и плотность энергии этих источников неуклонно снижается. Спустя несколько десятков миллиардов лет все станет незначительным, кроме плотности энергии, связанной с космологической постоянной.

Скопления галактик вследствие экспоненциального расширения расформируются настолько быстро, что вскоре они смогут видеть друг друга. Фотоны, оставив одно скопление и распространяясь со скоростью света, движутся недостаточно быстро для того, чтобы догнать другие скопления. Наблюдатели в каждом скоплении окружены горизонтом, скрывающем соседей. Каждое скопление превратится в замкнутую систему. Каждый горизонт как ящик, стенки которого отделяют подсистему от Вселенной. Поэтому методы физики “в ящике” применимы к такой подсистеме, и мы можем применять к ним методы термодинамики.

В этом месте проявляется новый эффект квантовой механики, за счет которого внутри каждого горизонта пространство заполнено газом фотонов в тепловом равновесии: своеобразный туман, образованный аналогично тому, как образуется излучение черной дыры Хокинга. Температура и плотность *горизонта излучения* экстремально низки, но остаются

неизменными по мере расширения Вселенной. Между тем, все остальное, включая материю и реликтовое излучение, становится все менее плотным, и спустя достаточно большое время единственное, что будет наполнять Вселенную – это излучение горизонта. Вселенная должна навсегда прийти в равновесие. Будут, конечно, возникать флуктуации и их рецидивы, и время от времени то одна, то другая конфигурация Вселенной будет в точности повторяться (в том числе парадокс Больцмановского мозга, который я описал в главе 16 как *reductio ad absurdum* ньютоновой парадигмы). Согласно этому сценарию, кажущаяся сложность нашей Вселенной – лишь короткая вспышка перед переходом к вечному равновесию.

Мы почти с уверенностью можем сказать, что мы не Больцмановские мозги, поскольку тогда, наверное, мы не видели бы большую упорядоченную Вселенную. Это означает, что сценарий будущего Вселенной не соответствует действительности. Принцип достаточного основания, действуя через принцип тождества неразличимых, также его отвергает.

Самый простой способ избежать смерти Вселенной – остановить ее расширение. Это возможно, если плотность материи достаточна, чтобы вызвать сжатие. Материя гравитационно притягивает материю, и это замедляет расширение, так что если есть достаточно много материи, Вселенная сожмется до сингулярности. Или, возможно, квантовые эффекты остановят коллапс, превратив сжатие в расширение, и приведут к возникновению новой Вселенной. Но, вероятно, материи для замедления расширения окажется мало.

Следующий простейший способ избежать “тепловой смерти” реализуется в сценарии, в котором космологическая константа не является постоянной. В то время как имеются доказательства того, что темная энергия (которая для наших целей отождествляется с космологической постоянной) не менялась за время жизни нашей Вселенной, нет доказательств того, что она не будет меняться в долгосрочной перспективе. Это изменение может быть следствием более глубоких законов, которые действуют настолько медленно, что их следствия видны лишь на длительных временных масштабах, или изменение может быть просто следствием общей тенденции изменения самих законов. Действительно, принцип взаимного воздействия гласит, что космологическая константа должна находиться под влиянием Вселенной, на которую она сама решительно влияет.

Космологическая постоянная может уменьшиться до нулевого значения. Если так, то расширение Вселенной замедлится, но, скорее всего, не обратит его в сжатие. Вселенная может существовать вечно, однако быть статичной. По крайней мере, это поможет избежать парадокса Больцмановского мозга.

Будет ли Вселенная без космологической постоянной вечно расширяться или коллапсирует, зависит от начальных условий. Если энергии расширения окажется достаточно для преодоления взаимного гравитационного притяжения всей материи во Вселенной, последняя не будет сжиматься. Но даже если Вселенная вечна, есть широкие возможности для перерождения, поскольку каждая черная дыра может привести к появлению зародыша Вселенной. Как отмечалось в главе 11, имеются надежные теоретические указания на то, что это должно произойти. Если так, наша Вселенная, которая еще далеко не при смерти, уже произвела миллиард миллиардов потомков. Каждая из новых Вселенных произведет потомство, и то обстоятельство, что она после этого может погибнуть, уже несущественно.

Есть возможности для возрождения, в котором участвуют не только черные дыры, но вся Вселенная. Эта гипотеза исследовалась в классе космологических моделей, называемых циклическими. Данную задачу решает один из видов циклической модели Пола Стейнхардта из Принстонского университета и Нила Турока из института “Периметр”. Предполагается, что космологическая постоянная уменьшается до нуля, а затем продолжает уменьшаться до значительных отрицательных величин¹⁷⁸. Это приводит к коллапсу Вселенной. Тем не

¹⁷⁸ См.: Steinhardt, Paul J., and Neil Turok *Endless Universe: Beyond the Big Bang*. New York: Doubleday, 2007.

менее Стейнхардт и Турок утверждают, что коллапс сопровождается расширением. Это может происходить благодаря эффектам квантовой гравитации, или конечная сингулярность может не быть достигнута из-за экстремальных значений темной энергии.

Теоретические указания на то, что космологическая сингулярность не будет достигнута из-за квантовых эффектов, ведущих к новому расширению Вселенной, сильнее, чем в случае сингулярности, связанной с черной дырой¹⁷⁹. В теории петлевой квантовой гравитации исследованы несколько моделей квантовых эффектов вблизи космологической сингулярности. Выяснилось, что такой отскок является универсальным феноменом. Следует, однако, оговориться, что это лишь модели и они основываются на существенных допущениях. Ключевым является предположение, что Вселенная пространственно-однородна. Мы знаем надежно, что однородные области – без гравитационных волн и черных дыр – не могут порождать новые Вселенные.

В худшем случае в сильно неоднородных областях не произойдет отскока. Они просто свернутся в сингулярность, где время остановится. Тем не менее это дает нам принцип, позволяющий определить, в каких частях Вселенной произойдет отскок и Вселенная воспроизведет себя. Если отскок может происходить лишь в более однородных областях, при рождении новых Вселенных, сразу после отскока, эти Вселенные также будут высоко однородны¹⁸⁰. Это позволяет предсказать, что ранняя Вселенная сразу после отскока в высшей степени однородна и в ней нет ни черных, ни белых дыр, нет никаких гравитационных волн (случай нашей Вселенной).

Но чтобы циклический сценарий был научным, необходимо по крайней мере одно проверяемое предсказание, с помощью которого гипотезы могут быть протестированы. Существует по меньшей мере два сценария, связанных со спектром флуктуаций МФИ. Циклические сценарии предлагают объяснение тех флуктуаций, которые не требуют короткого периода экстремально быстрой инфляции (это нередко принимается в качестве основной причины флуктуаций). Наблюдаемый спектр флуктуаций успешно воспроизводится, но между предсказаниями циклической и инфляционной моделей есть два отличия, и эти предсказания могут быть экспериментально проверены сейчас или в ближайшем будущем. Во-первых, будут ли наблюдаться в спектре МФИ гравитационные волны? Инфляционная модель утверждает, что да, а циклические модели это отрицают. Последние предсказывают, что спектр реликтового излучения не совсем случаен, то есть что форма такого спектра будет отклоняться от формы распределения Гаусса.

Циклические модели – удачные примеры того, как постулирование фундаментального характера понятия времени (в том смысле, что время не начинается с Большого взрыва, а существовало прежде) ведет к космологии, способной делать надежные предсказания. Флуктуации МФИ также описываются в рамках теорий, предполагающих, что в ранней Вселенной скорость света была выше нынешней. Эти теории с переменной скоростью света выбирают выделенное понятие времени так, что оно нарушает принцип теории относительности. Они не так популярны, но также предлагают объяснение флуктуаций МФИ, не привлекая для этого инфляцию.

Роджер Пенроуз предложил другой сценарий: Вселенная дает начало новой Вселенной¹⁸¹. Пенроуз принимает сценарий вечной Вселенной Больцмана с фиксированной

¹⁷⁹ Bojowald, Martin *Isotropic Loop Quantum Cosmology* // arXiv: gr-qc/0202077v1 (2002); Bojowald, Martin *Inflation from Quantum Geometry* // arXiv: gr-qc/0206054v1 (2002); Bojowald, Martin *The Semiclassical Limit of Loop Quantum Cosmology* // arXiv: gr-qc/0105113v1 (2001); Bojowald, Martin *Dynamical Initial Conditions in Quantum Cosmology* // arXiv: gr-qc/0104072v1 (2001); Tsujikawa Shinji, Singh, Parampreet, and Roy Maartens *Loop Quantum Gravity Effects on Inflation and the CMB* // arXiv: astro-ph/0311015v3 (2004).

¹⁸⁰ Lehnerns, Jean-Luc *Diversity in the Phoenix Universe* // arXiv:1107.4551v1 [hep-ph] (2011).

¹⁸¹ Penrose, Roger *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*. New York: Knopf, 2011.

космологической постоянной и спрашивает, что произойдет бесконечное время спустя. (Лишь Роджер мог задать такой вопрос!) Что если после того, как все элементарные частицы, обладающие массой (в том числе протоны, кварки и электроны) распадутся, останутся лишь фотоны с другими безмассовыми частицами? Если так, то переход к вечности обнаружить невозможно, поскольку фотоны, распространяющиеся со скоростью света, во времени не нуждаются. Для фотона вечность поздней Вселенной неотличима от ранней – разница лишь в температуре. Правда, эта разница огромна. Пенроуз считает, что это не имеет значения. В рамках реляционного описания фотонного газа имеют значение лишь соотношения между объектами, которые существуют в это время, так как отсутствует чувствительность к общей шкале. Поздняя Вселенная, заполненная газом холодных фотонов и других безмассовых частиц, неотличима от ранней, заполненной горячим газом тех же частиц. Согласно принципу тождества неразличимых, поздняя Вселенная – то же самое, что вновь рожденная.

Сценарий Пенроуза осуществляется лишь по окончании бесконечного периода времени и не решает парадокс Больцмановского мозга. Однако он предсказывает, что в остатках Большого взрыва присутствуют следы прежней Вселенной. Хотя большая часть информации будет уничтожена в течение бесконечного времени, проведенного в состоянии теплового равновесия, один носитель информации никуда не исчезнет – гравитационное излучение. Информация, переносимая гравитационными волнами, не исчезает и в циклических моделях. Она сохраняется в момент отскока и передается новой Вселенной.

Самым мощным из сигналов, передаваемым с помощью гравитационных волн, является отпечаток столкновения больших черных дыр, которые находились в центре давно потухших галактик. Эти сигналы, как рябь на воде, расходятся по новой Вселенной. Следовательно, полагает Пенроуз, круги должны быть заметны в МФИ, структура которого была зафиксирована на раннем этапе эволюции нашей Вселенной. Это тени событий в прежней Вселенной.

Кроме того, Пенроуз предполагает наличие множества концентрических кругов, происходящих от скопления галактик, в которых произошли столкновения более одной пары галактических черных дыр. Это поразительное предсказание весьма отличается от сделанных на основе большинства космологических сценариев для МФИ.

Сейчас идет спор о том, можно или нет наблюдать в МФИ концентрические круги Пенроуза¹⁸². Однако, как мы видим, космологические сценарии, в рамках которых наша Вселенная произошла от существовавшей до Большого взрыва, способны к предсказаниям, которые могут быть подтверждены или опровергнуты. Напротив, в сценариях, в которых Вселенная – это один из множества одновременно существующих миров, нет и скорее всего не будет никаких проверяемых предсказаний.

В главе 10 я утверждал: рациональное объяснение того, почему конкретные законы и начальные условия, реализованные в нашей Вселенной, требует, чтобы выбор был сделан несколько раз. В противном случае мы могли бы знать, почему именно такой выбор сделан, ведь нет причин для выбора одинаковых начальных условий и одинаковых законов природы, сделанного много раз подряд. Я рассматривал два сценария с множеством Больших взрывов – одновременный и последовательный. Лишь в последнем случае мы можем построить космологическую модель, которая ответила бы, почему выбраны именно эти законы, и при этом осталась бы научной в смысле способности к экспериментально проверяемым

¹⁸² О том, что круги обнаружены, см.: Gurzadyan, V. G., and R. Penrose *CCC-Predicted Low-Variance Circles in CMB Sky and LCDM* // arXiv:1104.5675v1 [astro-ph.CO] (2011); Gurzadyan, V. G., and R. Penrose *More on the Low-Variance Circles in CMB Sky* // arXiv:1012.1486v1 [astro-ph.CO] (2010); Gurzadyan, V. G., and R. Penrose *Concentric Circles in WMAP Data May Provide Evidence of Violent Pre-Big-Bang Activity* // arXiv:1011.3706v1 [astro-ph.CO] (2010). В нескольких работах утверждается, что это согласуется с уровнем шума: Wehus, I. K., and H. K. Eriksen *A Search for Concentric Circles in the 7-year WMAP Temperature Sky Maps* // arXiv:1012.1268v1 [astro-ph.CO] (2010); Moss, Adam, Scott, Douglas, and James P. Zibin *No Evidence for Anomalously Lowvariance Circles on the Sky* // arXiv:1012.1305v3 [astro-ph.CO] (2011); Hajian, Amir *Are There Echoes from the Pre-Big Bang Universe? A Search for Low-Variance Circles in the CMB Sky* // arXiv:1012.1656v1 (2010).

предсказаниям. В данной главе я вернулся к этому вопросу, и мы увидели: лишь в случае последовательного перерождения Вселенных могут быть получены предсказания, проверяемые в эксперименте.

Таким образом, когда мы работаем с временем как с фундаментальным понятием, космологическая модель становится научной, а идеи проверяемыми. Те, кто обременен метафизическими предположениями, будто цель науки – открывать вечные истины, могут думать, что, устранив время и сделав Вселенную похожей на математический объект, они придут к научной космологии. Но, оказывается, все наоборот. Чарльз С. Пирс больше века назад понял: мы можем объяснить законы природы, если они эволюционируют.

Глава 19

Будущее времени

В части II мы вернули времени достойное место в картине мира. Доводы в пользу его нереальности веские, но они зависят от распространения ньютоновой парадигмы на Вселенную в целом. Как мы видели, особенности, делающие эту парадигму пригодной для описания малых частей Вселенной, делают невозможным ее применение к Вселенной в целом. Для прогресса в космологии и фундаментальной физике нужна новая концепция законов, действующих на космологических масштабах, которая позволит избежать ошибок, заблуждений, дилемм, парадоксов и ответить на вопросы, которые в рамках традиционной науки невозможно даже поставить. Кроме того, теория должна быть научной, то есть обладать реальной предсказательной силой.

В главе 10 я начал искать основу такой концепции. Первостепенным принципом поиска стал принцип достаточного основания, заставляющий нас находить рациональное объяснение каждому выбору, который Вселенная делала в истории, чтобы стать такой, какой ее видим мы. Это предполагает справедливость принципов тождества неразличимых, замкнутости объяснения, взаимного воздействия. Они закладывают основу глубокого реляционного подхода к описанию свойств всего в природе.

Я утверждаю, что единственный способ реализовать эти принципы и построить работоспособную космологическую теорию – это предположить, что законы изменяются с течением времени. Для этого необходимо, чтобы время было и реальным, и глобальным. Одним из перспективных направлений развития является формодинамика, которая (см. главу 14) в рамках общей теории относительности вводит понятие выделенного глобального времени.

Понятие реального времени, с течением которого эволюционируют законы, в совокупности с нашими принципами закладывает основу новой космологической теории. Рассуждения из глав 11–18 еще не составляют теории. Каждое из приведенных рассуждений носит спекулятивный характер, однако позволяет сделать несколько реально проверяемых предсказаний. Не так важно, подтвердятся ли они. По крайней мере, они демонстрируют, что гипотеза о реальности времени ведет к научной космологии. Понятие реального и глобального времени помогает решить и другие проблемы. Например, мы должны выйти за рамки статистического характера предсказаний квантовой механики для описания и объяснения того, что происходит в отдельных ситуациях. В главах 12 и 13 я описал два новых подхода к более глубокой теории квантовых явлений. В обоих требуется, чтобы время было фундаментальным. Эти подходы в достаточной степени отличаются от традиционной квантовой механики, чтобы их можно было экспериментально подтвердить или опровергнуть.

Еще одной сферой, в которой работает понятие реального времени, является описание поведения макросистем, где в рамках термодинамики возникают такие понятия, как температура, давление, плотность и энтропия. На неквантовом уровне время проявляет свойство направленности, и мы можем различить несколько стрел времени, которые

отличают прошлое от будущего. В теории, где время несущественно или второстепенно, невозможно объяснить это свойство время-асимметричной Вселенной, что вынуждает нас объяснять очевидные особенности мира крайне маловероятным выбором начальных условий. Этого можно избежать, предполагая, что время реально и что фундаментальная теория асимметрична во времени, как и Вселенная.

Однако мало сказать, что время реально: имеет смысл говорить о том, что происходит “сейчас” во всей Вселенной, то есть синхронно с нашим ощущением хода времени. Идея глобального времени означает, что наше ощущение хода времени является общим для всей Вселенной, но, конечно, это противоречит относительности одновременности в специальной (СТО) и общей теориях относительности. Это противоречие необходимо устранить, потому что из относительности одновременности (см. главу 6) вытекает блочная картина Вселенной, в которой самый основной аспект нашего ежедневного опыта – течение времени – представляется иллюзорным.

Можно представить ситуацию, в которой время реально и которая не противоречит относительности одновременности. Но это потребует либо солипсизма, либо введения понятия реальности, зависящей от наблюдателя. В такой ситуации различие между реальным настоящим и еще не произошедшим реальным будущим не является объективным для всех наблюдателей. Как я указывал, гипотеза глобального времени помогает выйти за рамки квантовой теории и принять пространство как второстепенное, возникающее понятие. Также важно отметить, что гипотеза глобального времени не должна противоречить экспериментальным данным, подтверждающим выводы СТО. Мы убедились, что это выполнимо в формодинамике. В конце концов, верна ли гипотеза, что в природе существует выделенное глобальное время, должно быть проверено. Поэтому я выдвигал гипотезы, на основе которых можно сделать экспериментально проверяемые предсказания.

Мысль о том, что законы природы эволюционируют во времени, многое обещает применительно к фундаментальной физике. Но возникает вопрос: есть ли закон, регулирующий эволюцию законов природы? Можно назвать *метазаконом* такой закон природы, который действует на другие законы, а не на элементарные частицы непосредственно. Возможно, действие метазакон трудно заметить, так как он может действовать лишь в таких экстремальных ситуациях, как Большой взрыв. Однако если мы хотим объяснения Вселенной, которое совершенно соответствует принципу достаточного основания, метазакон должен существовать.

Предположим, что он существует. Но не должны ли мы узнать, почему именно этот, а не другой метазакон регулирует эволюцию законов в нашей Вселенной? И если метазакон может влиять на законы, управлявшие миром в прошлом, часть объяснения того, почему именно эти законы действуют в настоящее время, будет зависеть от того, какими были прежние законы. Мы не можем избежать вопроса *о выборе начальных условий*. Гипотеза о метазаконе может вести к бесконечной регрессии (на вопрос, *почему действует именно этот метазакон*, можно ответить: таков метаметазакон, и так далее). Это один аспект. Другой – вероятность того, что никакого метазакон не существует. Тогда в эволюции законов появляется элемент случайности, и снова объяснимо не все, а принцип достаточного основания в науке не соблюдается на фундаментальном уровне. Мангабейра Унгер и я называем это *дилеммой метазакон*.

Похоже на тупик. Но я думаю, что дилемма метазакон, напротив, открывает большие возможности, провоцирует на построение нового вида теории. Я убежден, что ее решение станет ключевым для прорыва в космологии и фундаментальной физике в XXI веке.

Дилемму метазакон можно временно обойти с помощью гипотезы космологического естественного отбора (см. главу 11), предполагающей действие ограниченного метазакон статистической природы. Когда я писал, что параметры стандартной модели изменяются случайным образом при каждом перерождении Вселенной, я описал своего рода метазакон, который частично обходит эту дилемму. Конечно, мы хотим знать больше о том, как это происходит, и описать механизм генерации случайных параметров такого изменения.

Возможно, разобраться поможет теория квантовой гравитации, например, теория петлевой квантовой гравитации или теория струн. Но и без дальнейших теоретических построений гипотеза космологического естественного отбора является рабочей, экспериментально проверяемой.

Другой подход к дилемме метазаконів основан на *правиле прецедента*. Будучи частично статистическим, оно тоже обходит или откладывает разрешение дилеммы. Даже отсрочка может быть плодотворной. Но в конечном счете динамика, которая определяет эволюцию законов, должна отличаться от знакомых нам законов, не должны возникать вопросы: “Почему действует именно этот метазакон?”, “Почему имеются именно эти начальные условия?”

Вот один из подходов, который решает дилемму. Предположим, два любых предложения для метазаконів эквивалентны друг другу, то есть одинаково определяют процесс эволюции законов¹⁸³. Возможно, существует принцип универсальности метазаконів, как в вычислительной технике. Там универсальность означает, что любая функция, которая может быть вычислена с помощью одного компьютера, может быть вычислена и с помощью любого другого, неважно, в какой операционной системе тот работает. Идея универсальности для метазаконів аналогична. Неважно, какой метазакон работает: все экспериментально проверяемые предсказания одинаковы.

Еще одним подходом к космологии, которая выходит за рамки ньютоновой парадигмы, является объединение понятий законов природы и конфигурации. Не существует отдельных понятий закона и конфигурации, а есть лишь одно понятие, которое объединяет их в *метаконфигурации* и содержит информацию о них обоих. Эта идея согласуется с гипотезой, что все реальное реально в настоящий момент. Пока этот закон действует, его спецификация является частью настоящего момента. Спецификации закона и конфигурации не могут быть слишком разными, поэтому мы объединяем их в одну метаконфигурацию, как Галилей объединил небесную и земную сферы. Возможно, понадобится время, чтобы стереть различие между вневременным законом и конфигурацией, привязанной ко времени.

Эволюция метаконфигурации будет определяться настолько простыми правилами, что она объясняется с помощью принципа универсальности. Выбор начальной конфигурации определял бы и начальные законы, и начальные условия. Будут существовать и свойства конфигурации, которые развиваются быстро, и свойства, которые развиваются гораздо медленнее. Первые можно было бы рассматривать как состояние, которое будет развиваться под действием законов – медленно изменяющегося аспекта метаконфигурации. Но на более длинном отрезке времени различие между законами и конфигурациями размыто. Я разработал модель, которая представляется не такой уж нереалистичной¹⁸⁴.

Эти две идеи вкупе с правилом прецедента и теорией космологического естественного отбора дают уже четыре пути разрешения дилеммы метазаконів. Не будет преувеличением сказать, что направление развития космологии XXI века определится с разрешением дилеммы метазаконів.

Во вводной главе я поднял ряд вопросов о роли математики в науке. Сейчас я хочу кратко вернуться к этой теме: концепция реальности времени приводит к важным последствиям для математики.

В рамках ньютоновой парадигмы вневременное конфигурационное пространство может быть описано как математический объект. И законы природы, и результаты их действия могут быть представлены как математические объекты, как возможная история

¹⁸³ Эта идея реализована в модели: Smolin, Lee *Matrix Universality of Gauge and Gravitational Dynamics* // arXiv:0803.2926v2 [hep-th] (2008).

¹⁸⁴ Smolin, Lee *Unification of the State with the Dynamical Law* // arXiv:1201.2632v1 [hep-th] (2012).

системы. Математика соответствует не реальным физическим процессам, а их записи в виде данных, существующих вне времени. Но мир всегда будет представлен набором процессов, происходящих во времени, и лишь малая его часть представлена вневременными математическими объектами.

Поскольку ньютонову парадигму невозможно распространить на Вселенную, нет математического объекта, соответствующего точной истории всей Вселенной. Для Вселенной не должно существовать вневременного конфигурационного пространства вечных законов.

Джон А. Уилер любил, записывая уравнения на доске, сказать: “Теперь я хлопну в ладоши, и возникнет Вселенная”. Конечно, никакой Вселенной не возникало¹⁸⁵. Стивен Хокинг в “Краткой истории времени” поставил вопрос: “Что вдыхает жизнь в уравнения и заставляет Вселенную подчиняться им?” Такие высказывания раскрывают абсурдность мнения, будто математика имеет примат над природой. На самом деле она второстепенна. У нее нет порождающей способности. Другой способ выразить ту же мысль – сказать, что в математике результат выводится логически, а в природе события генерируются последовательностью причинно-связанных процессов, действующих во времени. Это не одно и то же. Логические следствия могут моделировать причинно-связанные процессы, но они не идентичны им. Логика – не зеркало каузальности.

Логика и математика отражают природу, но не подменяют ее. Некоторые аспекты Вселенной не могут быть описаны математически, например такой: в мире всегда некий момент времени. Поэтому природу нельзя поместить в рамки логической или математической системы. Вселенная просто есть (или – еще лучше – происходит). Она уникальна, как и каждое событие. Почему так? Почему существует нечто, а не ничего? Наверное, на эти вопросы нет ответа. Возможно, существовать значит состоять в отношении к другим объектам, так что Вселенная является просто набором всех этих отношений. Вселенная не имеет отношения к чему-либо вне себя. Вопрос, почему она существует, выходит за рамки принципа достаточного основания.

Как должны быть представлены результаты открытий в космологии, если не работает ни один математический закон? От этого зависит будущее космологии.

Примеры космологического естественного отбора и правила прецедента демонстрируют, что мы можем представить проверяемые на опыте научные теории, которые выходят за рамки ньютоновой парадигмы. Необходимо заметить, что в истории науки существовало много гипотез, в математической формулировке которых не было необходимости. В отдельных случаях для представления их следствий не требовалась математика. Примером может служить теория естественного отбора. Некоторые ее аспекты описаны с помощью простых математических моделей, но ни одна не отражает разнообразие механизмов, с помощью которых происходит отбор в природе.

Стоящие перед нами задачи не стоит недооценивать. Космологическая наука в кризисе, и можно быть уверенным лишь в том, что методология, которая до сих пор нам служила, никуда не приведет. Поэтому мы должны идти вперед, в неизвестность. Решить, какой из путей верен, поможет эксперимент. Мы также ожидаем, что новая теория должна объяснять уже известные, пусть загадочные, факты. Стоит поощрять разнообразные подходы к решению сложных вопросов.

Тем не менее, выбор сложен. Чтобы это подчеркнуть, приведу список пар противоречащих друг другу утверждений. Это следствия противоположных точек зрения на природу времени.

¹⁸⁵ Уилер также говорил, что “ни один феномен не является реальным, пока он наблюдаем”. Должен сказать, что с возрастом я все охотнее принимаю его постановку проблемы.

Время иллюзорно. Истина и реальность – вне времени.

Пространство и геометрия реальны.

Законы природы вечны и необъяснимы, за исключением объяснений, основанных на антропном принципе.

Будущее предопределено законами физики и начальными условиями.

Во всех аспектах история Вселенной являет собой математический объект.

Вселенная бесконечна в пространстве. Вероятностные предсказания проблематичны, поскольку основаны на отношении двух бесконечных величин.

Время начинается в момент Большого взрыва (если оно вообще определено), природа которого необъяснима.

Наблюдаемая Вселенная – одна из бесконечной коллекции Вселенных, не наблюдаемых и существующих одновременно.

Равновесие есть естественное состояние, в которое с неизбежностью придет наша Вселенная. Наблюдаемая сложная структура Вселенной – результат маловероятной флуктуации.

Квантовая механика – окончательная и верная теория. Ее интерпретация связана с существованием бесконечного количества альтернативных событий.

В науке нет ничего определенного. Но перед лицом этой неопределенности, однако, мы можем попытаться привести разумные доводы в пользу той или иной гипотезы. Поскольку самым веским доводом является эксперимент, мы можем судить о качестве гипотез с точки зрения их возможности делать проверяемые экспериментально предсказания.

Время – наиболее реальный аспект нашего восприятия мира. Все, что истинно и реально, относится к конкретному моменту времени.

Пространство второстепенно, возникающее и приблизительно.

Законы природы эволюционируют во времени и могут быть объяснены в свете своей предыстории.

Будущее предсказуемо лишь отчасти.

Большинство регулярностей в природе может быть описано с помощью математических моделей. Но не все.

Вселенная конечна в пространстве. Вероятности – обычные отношения частот появления событий.

Большой взрыв – это по сути отскок, который находит свое объяснение в предыстории Большого взрыва. Следы предыдущих эпох наблюдаемы.

Лишь небольшие части Вселенной приходят в тепловое равновесие. Гравитационно-связанные системы превращаются со временем в гетерогенные структурированные конфигурации.

Вселенная под действием гравитационных сил – это самоорганизующаяся система, которая со временем усложняется.

Квантовая механика – это приближительная теория, вытекающая из более глубокой космологической теории.

Более двух десятилетий существует программа исследований, основанная на квантово-механическом подходе к вневременной Вселенной и теории мультивселенной. В лучшем случае эти исследования породили спекулятивные предсказания новых явлений, таких как столкновения Вселенных-“пузырей”, отголоски, которых можно, если повезет, зарегистрировать. Основные трудности этой программы не были устранены, несмотря на долгие годы работы ученых. Трудности связаны, во-первых, с проблемой предсказаний в случае, если наша Вселенная – одна из бесконечного множества Вселенных, но ни одна из них (кроме нашей) не наблюдаема; во-вторых, с определением вероятности, когда имеется бесконечное количество копий каждого события; в-третьих, с тем, что ни теория, ни наблюдения не ограничивают изобретение сценариев о событиях, которые могут происходить за пределами возможности наших наблюдений.

Нельзя быть уверенным, что из этих исследований ничего не выйдет, но похоже, что история спишет их как заблуждения, совершенные из-за ложного подхода к основополагающему вопросу в науке. Это заблуждение возникло оттого, что метод,

подходящий для изучения малых частей Вселенной, был перенесен на Вселенную в целом. Эта ошибка не может быть исправлена другим сценарием того же рода. Космологические вопросы о выборе законов и начальных условий остаются без ответа в рамках подхода, который принимает законы природы и начальные условия в качестве входных данных. Курс должен быть радикальным и предполагать не просто построение новой теории, но и новый метод, – следовательно, и теорию нового рода.

Хотя задача непростая, уже есть несколько рабочих гипотез. Первая – об эволюции законов – предполагает существование истории Вселенной до Большого взрыва. Из этой гипотезы вытекают надежные и экспериментально проверяемые предсказания. Они включают предсказания теории космологического естественного отбора и предсказания, сделанные в рамках циклической космологии. Пока рано говорить о том, истинны ли они, но важно знать, что сейчас и в ближайшем будущем результаты наблюдений могут опровергнуть эти предсказания. Эти примеры показывают, что сценарии, в которых Вселенная – лишь этап, проверяемые и, следовательно, научные.

Другими доводами в нашу пользу стала мудрость Лейбница, Маха и Эйнштейна. У них мы позаимствовали несколько принципов для развития физики. Наиболее радикальным явилось утверждение о реальности настоящего момента времени и принцип: все, что реально, существует в настоящий момент времени. Отсюда следует, что физику нельзя рассматривать как поиск точной математической модели Вселенной. Эти метафизические фантазии вдохновляли поколения теоретиков, но теперь они препятствуют прогрессу. Математика будет служанкой науки – но не королевой.

Взамен мы получим более демократичное видение физических теорий. Точно так же, как много лет назад было стерто различие между дворянами и простолюдинами, мы должны выйти за пределы абсолютного различия между конфигурацией и законами, согласно которым мир развивается во времени. Абсолютные, вечные законы более не могут диктовать эволюцию конфигурации мира. Если все, что реально, существует в реальное мгновение, различие между законами и конфигурацией должно быть относительным, возникающим и выражающимся в относительно спокойные космологические эпохи вроде нашей. В другие эпохи это различие исчезает и появляется динамическое описание мира – рациональное и соответствующее принципу достаточного основания.

Позволяя законам эволюционировать, мы открываем новые возможности для их объяснения. Может показаться, что это ослабит нас. На самом деле это усиливает науку – в отличие от применяемых в космологии идей, основанных на ньютоновой парадигме. Если мы примем концепцию природы, включающую эволюцию ее законов и фундаментальность понятия времени, мы станем способны понять таинственный мир, в котором живем.

Приведет ли эта дорога к успеху? Время покажет.

Эпилог О времени

Прогресс цивилизации, от первых орудий труда до новейших квантовых технологий, – это наше воплощенное воображение. Воображение позволяет нам избегать опасностей и не упускать благоприятные возможности. Это приспособление к реальности времени. Мы превосходные охотники, собиратели и обработчики информации, но также мы способны предугадывать ситуацию, которая не следует из имеющихся данных. Человек не мог сравниться с тигром, “светло горящим в глубине полночной чаши”, и ничего не мог поделаться, когда тигр набрасывался на его детей. Но поскольку люди все это живо себе представляли, они разожгли костер, чтобы тигр держался подальше.

Сейчас никого не удивит умение развести костер, но подумайте о человеке, который сделал это впервые. Тогда, наверное, казалось безумием защищаться от одной смертельной опасности с помощью другой. Мысль о том, что пожар может быть управляемым, требует

сильного воображения и смелости. Сейчас мы даже не помним об огне (пока на полпути на работу не задаемся вопросом, выключили мы духовку или нет). Но если бы мы не произошли от людей, которые сотни тысяч лет назад одолели огонь, мы и сейчас оставались бы добычей. Добиваться успеха на пороге неопределенности – это потрясающая черта человека. Мы живем между возможностями и опасностями. Мы живем, понимая, что не можем держать под контролем абсолютно все.

Другие животные эволюционировали, адаптируясь к среде, и перемены почти всегда представляют для них угрозу. Наши же предки обзавелись “органом воображения”, которое предоставило людям возможность извлечь из перемен пользу и заселить всю планету.

Около 12 тысяч лет назад охотники и собиратели стали земледельцами. Со временем влияние человека на экосистемы стало настолько сильным, что превратилось в угрозу нам самим. За это ответственно наше воображение – и лишь оно поможет нам найти выход.

Воображение привело нас к пониманию трагизма жизни: мы сознаем свою смертность. Желая прожить как можно дольше, мы всеми силами пытаемся отсрочить неизбежное – и в этом тоже перегибаем палку. Одним из результатов явился расцвет цивилизации, науки, искусства, техники – всего, что мы принимаем почти как должное. Другой – перепроизводство: самой надежной гарантией против экспоненциального упадка является экспоненциальный рост. Так вид, которому предназначалась относительно узкая ниша, заселил планету. Наши ближайшие родственники почти исчезающих видов прозябают в редущих лесах Африки, а нас уже несколько миллиардов. Нередко говорят, что от других приматов нас отличает “культура”, однако разве это не еще одно название для нашего неумного воображения и стремления к лучшей жизни?

Мы можем вообразить не требующих многого людей и народы, мудро живущие в гармонии с миром. Некоторые хотят стать именно такими. Жить просто – это достойно, но вообще-то это не для человека. Наш удел – стремиться к большему, к иному, чем мы есть. Быть человеком – значит пробовать то, что нельзя, нарушать границы возможного.

Существует романтическое представление, будто избыточность, нарушение равновесия с окружающей средой – это патология, присущая капитализму и технически развитому обществу. Это не так. В каменном веке люди заселили Северную Америку, попутно истребив почти всех крупных млекопитающих на континенте. И в межплеменных стычках пало гораздо больше охотников и собирателей, чем европейцев в двух мировых войнах.

Как вид, мы, кажется, на пике могущества и потребления ресурсов. Мы знаем, что ситуация неустойчива. К этому все и шло, поскольку неустойчивость всегда результат экспоненциального роста. Просто пока нам везет. Мы живем в период между расцветом и кризисом, который наступит, если мы не научимся действовать разумнее. Если же мы будем продолжать мыслить вне времени, то не преодолеем беспрецедентные трудности, вызванные изменениями климата. Мы не можем более полагаться на привычные политические решения, поскольку эти проблемы вызваны крахом нашей политической системы. Лишь мышление во времени дает нам шанс на дальнейшее процветание.

Очень давно кто-то взял на вооружение огонь и защитил своих детей. Кому теперь хватит мужества признать, что безопасность наших детей может зависеть от того, научимся ли мы управлять климатом?

2080 год. Проблемы климатических изменений практически решены. Наши дети уже пожилые люди – или, напротив, благодаря прогрессу медицины находятся в расцвете сил. Как предотвращенная катастрофа повлияла на их мышление? (Проще представить их точку зрения, если мы ничего не сделаем для того, чтобы удержать эмиссию CO₂. Они столкнутся с повышением температуры и уровня моря, с засухой и неурожаем, а города Севера наводнят беженцы с Юга. Понятно, что наши дети сказали бы нам.) Предположим, однако, что удалось всего этого избежать. Что мы узнали бы нового? Что положительного (кроме спасения) получит общество при разрешении этого кризиса? Книжки об изменении климата, как правило, полны ужасов. Снова и снова мы читаем о последствиях бездействия, но нигде

не найдем рассуждений о выгодах, если мы решим эту проблему. Люди, желающие быть здоровыми, занимаются спортом и правильно питаются, и это перевешивает желание избежать болезней и ранней смерти. Возможно, преимущества есть и у экономики, которая способствует сохранению здоровья планеты.

Последствия преодоления климатического кризиса сложно предсказать. Чтобы преуспеть, мы должны не только решить глобальные проблемы, но и сделать гораздо больше. Даже среди тех, кто видит всю серьезность положения, приверженность той или иной точке зрения (обе они, кстати, неверны) приводит к задержке прогресса. Для тех, кто оценивает мир с позиций экономики, природа – это ресурс, а изменение климата – просто сельскохозяйственная проблема в более широком масштабе, которая решается путем анализа издержек и прибыли. А для защитников окружающей среды первостепенное значение имеет природа, требующая защиты от цивилизации. И те, и другие ошибочно считают, что природа и техника – взаимоисключающие категории. Адекватное решение требует устранения различия между естественным и искусственным. Нужно не выбирать между природой и техникой, а изменить их отношение друг к другу.

Подавляющее большинство ученых пришло к консенсусу о том, что именно мы дестабилизируем климат, но верно и то, что климат внезапно пережил флуктуацию, переход между двумя очень разными состояниями. Если это произойдет снова (и неважно, будем ли мы к этому причастны), нам придется нелегко. И если мы в состоянии предотвратить или смягчить последствия изменения климата, мы должны это сделать – по той же причине, в силу которой мы должны искать и уничтожать астероиды, могущие столкнуться с Землей. После того, как мы решим эту важнейшую проблему, мы будем обязаны непрерывно регулировать климат. Это означает объединение техники с природными циклами и системами, которые участвуют в регулировании климата.

Когда мы поймем, как природа регулирует климат, и начнем работать с техникой, развивать экономику в гармонии с природой, мы преодолеем в планетарном масштабе разрыв между естественным и искусственным. Экономика и климат – элементы одной системы. Чтобы пережить кризис, мы должны добиться симбиоза природных процессов, определяющих климат, и цивилизации.

Мы привыкли видеть себя отчужденными от природы и воспринимать технику как приложение к ней. Но что произойдет, когда ресурс концепции раздельного существования будет выработан? Если мы хотим выжить как вид, нужно по-новому взглянуть на мир, в котором мы и все, что мы делаем, естественно.

Но сначала следует понять, где корни различия между искусственным и естественным. Проблема упирается во время. Все, что связано со временем, мы ошибочно считаем иллюзией, а вечное – реальным. Мы делим мир на естественный и искусственный. Некоторые считают, что искусственное (в отличие от природного) ближе к совершенству и вечности. Другие видят достоинства природного мира в чистоте, которой не хватает искусственному. Как избавиться от деления мира на естественное и искусственное? Чтобы не угодить в эту концептуальную ловушку, мы должны уйти от мысли, что нечто может существовать вне времени. Мы должны видеть все, включая нас самих и технику, частью существующей во времени большой, постоянно развивающейся системы. Мир без времени – это мир с фиксированным набором возможностей, которые не могут быть преодолены. А если время реально и все зависит от времени, нет никаких препятствий для подлинно новаторских идей. И чтобы преодолеть различие между естественным и искусственным, создать систему, в которой и то, и другое присутствует одновременно, мы должны поместить себя во время.

Нам нужна новая философия, объединяющая естественное и искусственное на основе слияния естественнонаучного и социального знания, в которой человечество займет свое законное место. Это не релятивизм, в котором истинно все, что мы желаем видеть истинным. В решении проблемы изменения климата очень важно, что есть истина. Мы должны отвергнуть модернистское понимание истины и красоты как формального и

постмодернистский бунт, согласно которому реальность и этика – лишь социальные конструкции. Нам нужен реляционизм: будущее ограничено, но не определяется настоящим полностью, так что новизна и открытия возможны. Это подлинно оптимистический взгляд на постоянно расширяющуюся сферу человеческой деятельности в космосе с открытым будущим.

Одной из задач новой философии является избавление от псевдонаучного подхода в космологии и признание ключевой роли времени в космологических масштабах. Не менее важно, что цивилизация, ученые и философы которой учат нас, что время есть иллюзия, что будущее предопределено, вряд ли способна мобилизовать творческие силы, чтобы объединить политику, технику и природные процессы. А такое объединение необходимо, если мы хотим процветать еще не одно столетие.

Вероятно, метафизические представления о нереальности времени наибольший вред принесли экономике¹⁸⁶. Порок мышления многих экономистов состоит в том, что рынок – это система с одним равновесным состоянием, в котором цены скорректированы так, что производство полностью удовлетворяет спрос (согласно закону спроса и предложения). Есть даже теорема, утверждающая, что в состоянии равновесия никто не может стать довольнее без того, чтобы сделать кого-то менее довольным¹⁸⁷.

Если на рынке одна и только одна точка равновесия, мудро и этично предоставить рынок самому себе, чтобы он сам достиг этой точки. Рыночных сил должно быть для этого достаточно. Последняя версия этой концепции представляет собой *гипотезу эффективного рынка*, согласно которой цены отражают всю информацию, имеющую отношение к рынку. В ситуации, когда на рынке много игроков, каждый своими знаниями и мнением влияет на покупку и продажу, и невозможно, чтобы какой-либо актив в долгосрочной перспективе был неверно оценен. Примечательно, что эти рассуждения подкреплены элегантно математической моделью, указывающей на то, что точка равновесия существует всегда. То есть всегда существует такая цена, при которой достигается баланс спроса и предложения.

Эта простая картина, в рамках которой рынок стремится к равновесию, опирается на предположение, что есть лишь одно состояние равновесия. Но это не так. С 70-х годов XX века экономистам известно, что математические модели рынков, как правило, содержат много точек равновесия, в которых предложение уравнивает спрос. Сколько таких точек? Трудно сказать, но, безусловно, их число растет по крайней мере пропорционально и числу производителей, и числу потребителей (если не быстрее). В сложной модели современной экономики со многими товарами многих фирм и многими покупателями есть множество способов установить цены, которые отвечают балансу спроса и предложения¹⁸⁸.

Поскольку существует множество точек, в которых рыночные силы находятся в равновесии, они не могут быть все абсолютно стабильными. Возникает вопрос: как общество выбирает какое-либо равновесное состояние? Этот выбор нельзя объяснить исключительно влиянием рыночных сил, потому что спрос и предложение сбалансированы в каждом из множества состояний равновесия. Законодательство, культура, этика, политика играют значительную роль в эволюции рыночной экономики.

Как получилось, что влиятельные экономисты десятилетиями доказывали

¹⁸⁶ См.: Smolin, Lee *Time and Symmetry in Models of Economic Markets* // arXiv:0902.4274v1 [q-fin.GN] (2009).

¹⁸⁷ См.: Starr, Ross M. *General Equilibrium Theory*, 2nd edition. New York: Cambridge University Press, 2011.

¹⁸⁸ Об этом свидетельствует теорема Зонненшайна – Мантела – Дебре, доказанная в 1972 году тремя весьма влиятельными экономистами. См.: *Market Excess Demand Functions* // *Econometrica*, 40:3, 549–563 (1972). Debreu, G. *Excess Demand Functions* // *Journal of Mathematical Economics* 1: 15–21, doi:10.1016/0304-4068(74)90032-9; Mantel, R. *On the Characterization of Aggregate Excess Demand* // *Journal of Econ. Theory* 7: 348–353, doi:10.1016/0022-0531(74)90100-8.

существование уникального равновесия, тогда как результаты их выдающихся коллег доказывали, что это неверно? Я считаю, что причина в преобладании вневременного над временным. Если существует лишь одно устойчивое равновесие, динамика рынка представляется не слишком интересной. Что бы ни случилось, рынок всегда придет к равновесию, и если он колеблется, он будет колебаться вокруг этого равновесия. Не нужно знать что-либо еще.

Если есть уникальное устойчивое равновесие, не так уж много остается свободы, и лучшее, что можно сделать – предоставить рынок самому себе. Но если существует много состояний равновесий, ни одно из которых не является совершенно стабильным, человеческий фактор может влиять на динамику рынка так, чтобы он выбрал одну из возможностей. Гуру от экономики отдают дань уважения мифическому вневременному состоянию природы и пренебрегают человеческим фактором. Эта концептуальная ошибка открыла путь для ошибок в политике, а они привели к экономическому кризису.

То же самое можно выразить через “эффект колеи”. Ситуация зависит не только от того, где мы, но и как мы попали сюда. Система вне “колеи” зависит лишь от текущей конфигурации. В системах без памяти время и динамика играют незначительную роль, потому что в любой момент такая система находится в одном из уникальных состояний или совершает колебания вокруг него. В “колее” время играет важную роль.

Неоклассическая экономика не зависит от предшествующего развития системы. Эффективный рынок – также: это рынок с единственным состоянием равновесия. В системах вне “колеи” невозможно зарабатывать деньги исключительно торговлей, не производя ничего. Такая деятельность называется арбитражем, и основные финансовые теории утверждают, что на эффективном рынке он невозможен. Действительно, ведь цена уже пришла к равновесному значению. Вы не можете продать доллары за иены, обменять их на евро, продать евро за доллары и получить прибыль. Тем не менее, хедж-фонды и инвестиционные банки заработали немало денег на валютных рынках. Их успех должен быть невозможен на эффективном рынке, но это, кажется, не беспокоит теоретиков.

Несколько десятилетий назад экономист Брайан Артур, в то время молодой завкафедрой в Стэнфордском университете, предположил, что экономика обладает памятью¹⁸⁹. Его доводы основывались на том, что закон убывающей доходности (чем больше вы производите товара, чем меньше прибыли получите в пересчете на его единицу) не всегда соблюдается. Например, в бизнесе программного обеспечения распространять ПО почти ничего не стоит, так что все издержки приходятся на начальный этап. Артура сочли еретиком – и действительно, без предположения о снижении доходности некоторые математические доказательства в неоклассической экономической модели разваливаются.

В середине 90-х годов аспирантка экономического факультета Гарварда Пиа Маланей, работавшая с математиком Эриком Вайнштейном, нашла математическое представление экономики с памятью. В геометрии и физике существует хорошо изученный метод исследования систем, обладающих памятью. Это *калибровочные поля*, которые лежат в основе нашего понимания всех взаимодействий в природе. Маланей и Вайнштейн применили этот метод в экономике. В самом деле, есть легко вычисляемая величина, называемая кривизной, являющаяся мерой памяти. Маланей и Вайнштейн обнаружили, что эта величина не равно нулю для типичных моделей рынков, где цены и потребительские предпочтения меняются. Следовательно, модели рынка (как Земля или геометрия пространства-времени) обладают кривизной. В диссертации Маланей применила модель к расчету индекса потребительских цен и нашла, что его увеличение неверно высчитано экономистами, не принимавшими во внимание “эффект колеи”¹⁹⁰.

¹⁸⁹ Arthur, W. Brian *Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events* // Econ. Jour. 99:394, 116–131 (1989).

¹⁹⁰ Malaney, Pia *The Index Number Problem: A Differential Geometric Approach*. Harvard PhD thesis, 1996.

Экономисты проигнорировали работу Маланей и Вайнштейна, но с тех пор этот эффект был неоднократно переоткрыт физиками. Они естественным образом применяли к описанию рынков теорию калибровочных полей¹⁹¹. Нет способа узнать, как хедж-фонды зарабатывают деньги, определяя возможности перепродажи путем измерения кривизны, но именно это и происходит.

Рынок, обладающий памятью – это такой рынок, для которого время имеет значение. Как неоклассическая экономическая теория обходится с тем, что в реальности рынки развиваются во времени, реагируя на изменения техники и предпочтений, постоянно открывая возможности заработать на том, что не должно существовать? Она абстрагируется от времени. Здесь потребителя моделируют с помощью функции полезности (она имеет численное значение для каждой возможной комбинации товаров и услуг, которые могут быть приобретены). Она имеет огромный набор значений, что, впрочем, для математики не страшно. Суть в том, что чем полезнее для вас совокупность товаров и услуг, тем сильнее вы хотите покупать. Модель предполагает, что вы покупаете товары и услуги, которые максимизируют удовлетворение ваших желаний, измеряемое с помощью функции полезности и с учетом того, сколько вы можете себе позволить.

А как насчет времени? Перечни включают в себя все товары и услуги, которые вы, возможно, захотите купить в жизни. Поэтому бюджетные ограничения складываются из суммарного дохода за всю жизнь. Это глупо. Как можно знать заранее, что вам понадобится или сколько денег вы заработаете за свою жизнь? Математические модели пренебрегают такими мелочами. Они предполагают, что есть определенная цена за каждый возможный набор товаров и услуг в каждый момент времени и в любой ситуации, которая может возникнуть (даже десятилетия спустя). Например, определяется цена не только “Мустанга”, но и его же в 2020 году. Предполагается также, что не только цены на товары и услуги, которые мы можем приобрести сейчас, находятся в равновесии, но и что всякая будущая цена при всех возможных условиях будет равновесной. Более того, модели предполагают, что инвесторы покрывают все пространство возможных нештатных ситуаций и позиций, в то время как исследователи обнаружили: внимание большинства продавцов привлекает небольшое число позиций¹⁹².

То, что неоклассические модели абсурдны, так как они абстрагируются от времени, лишь доказывает, насколько оно важно. Есть непреодолимое влечение к теории, в которой время не играет роли – возможно потому, что такие теории вселяют чувство причастности к вечной истине, в сравнении с которой время и случайности выглядят бледно. Мы живем в мире, где невозможно предвидеть большинство ситуаций. Изменения ни в политике, ни в науке, ни в моде, ни в погоде, ни в климате не могут быть точно предсказаны. Невозможно учесть все. Чтобы построить модель экономики без мифологических элементов, мы должны исходить из теории, в которой время реально, а будущее не предначертано даже в принципе.

Кроме того, чтобы объединить экономику и экологию, мы должны рассматривать их как открытые сложные эволюционирующие системы с памятью, многочисленными состояниями равновесия, обратными связями. Это подходит под описание реальной экономики, а также служит теоретической базой для экологии¹⁹³.

¹⁹¹ Идеи Маланей и Вайнштейна побудили Самуэля Васкеса измерить зависимость реальных рыночных данных от памяти. То, что он сделал, было невозможно и считалось ересью в рамках неоклассической экономической теории, но само существование фондов, успешно использующих арбитражные стратегии, доказывает, что такая зависимость существует. См.: Vazquez, Samuel E., and Simone Farinelli *Gauge Invariance, Geometry and Arbitrage* // arXiv:0908.3043v1 [q-fin.PR] (2009).

¹⁹² Darley, Vince, and Alexander V. Outkin *A NASDAQ Market Simulation: Insights on a Major Market from the Science of Complex Adaptive Systems*. World Scientific, 2007.

¹⁹³ Я вижу многообещающее начало в том, что биолог-теоретик Стюарт А. Кауфман и философ права

Одна из трудностей, с которой мы сталкиваемся, когда пытаемся рассуждать о будущем, состоит в том, что современная культура характеризуется несогласованностью. Специалист в одной области знаний не понимает, о чем говорят коллеги из других областей. Большинству физиков кое-что известно о прорыве в биологии, но знают ли они о происходящем на переднем крае социальной теории, не говоря о том, что волнует артистов и художников? Если цивилизация желает процветать и дальше, полезно основывать решения на согласованном представлении о мире, в котором для начала будет достигнуто взаимопонимание между науками о природе и науками о человеке. Реальность времени может стать основой объединения, при котором будущее открыто и новизна возможна в любом масштабе, от фундаментальных законов физики до организации экономики и экологии.

В прошлом крупные концептуальные успехи в физике находили свое отражение в социальной науке. Идея абсолютного времени и пространства Ньютона, говорят, повлияла на политическую теорию его современника Джона Локка. Мысль о том, что положение частиц определено не по отношению друг к другу, а в абсолютном пространстве, отразилась в концепции прав гражданина на абсолютном фоне незыблемых принципов справедливости.

Общая теория относительности привнесла в физику реляционную теорию пространства и времени, в которой все свойства определены посредством отношений. Нашло ли это отражение в социальной теории? Отражение этого можно найти в трудах Мангабейры Унгера и ряда других социальных теоретиков. Они изучают последствия реляционной философии, согласно которой свойства, приписываемые субъектам в социальной системе, вытекают из их отношений и взаимодействий. Как и в космологии Лейбница, здесь нет внешних, вневременных категорий или законов. Будущее открыто, потому что нет предела совершенствованию организации, пока человечество сталкивается с проблемами и с выгодными возможностями.

Новая социальная теория пытается превратить демократию в глобальную форму политической организации, способную направлять эволюцию многонационального, мультикультурного общества. Такая демократия должна соответствовать задаче принятия необходимых решений, чтобы выжить в условиях глобальных кризисов, вызванных изменениями климата.

И демократическое общество, и научное сообщество имеют дело с фактами о человеке. Мы умны, однако испорченны. Мы определяем свое место в мире в течение одной жизни и много поколений накапливаем знания. Еще мы умеем быстро думать и скоропалительно действовать. Это означает, что мы часто ошибаемся и обманываем себя. Чтобы по возможности избегать ошибок, мы создали общество, в котором на благо будущих поколений сосуществуют консерватизм и революционный подход. Будущее непознаваемо, но мы можем быть уверены в одном: потомки будут знать больше нас. В коллективе мы можем добиться большего, чем в одиночку. Прогресс требует рисковать, предлагать и апробировать новые идеи.

Демократические общества и порожденные ими научные сообщества успешно развиваются, пока основываются на двух принципах¹⁹⁴:

- 1) Если для решения проблемы достаточно общепринятых разумных суждений, проблема должна рассматриваться как решенная.
- 2) Если общепринятых разумных суждений для принятия решения не

Роберту Мангабейра Унгер говорит о необходимости подхода в своих областях в близких друг к другу терминах, а не в абстрактных понятиях вневременного пространства всевозможных конфигураций.

¹⁹⁴ Следствия из этих двух принципов получили развитие в моей книге 2006 года “Неприятности с физикой” (глава 17).

хватает, сообщество должно поощрять выработку разносторонних мнений и гипотез для формирования убедительной общепринятой аргументации.

Это принципы *открытого будущего*, лежащие в основе плюралистического общества новой эпохи Просвещения. Мы уважаем силу аргументации, когда она однозначно помогает справиться с проблемой. Когда ее недостаточно, мы уважаем тех, кто добросовестно отстаивает альтернативные точки зрения. Такие сообщества идут по пути интеллектуального прогресса и стремятся принимать мудрые решения о не вполне познаваемом будущем.

Но даже если принципы открытого будущего будут соблюдаться, наука едва ли ответит на некоторые вопросы, ответы на которые мы сильнее всего желаем знать.

Почему мир существует? Я не могу представить себе ответ, не говоря уже об ответе, подкрепленном доказательствами. Даже религия здесь бессильна: если ответ – Бог, то что было до Бога? Или: если у времени нет начала, уходит ли цепочка причин-следствий в бесконечное прошлое? Существует ли конечная причина всего? Это важные вопросы, но если на них есть ответы, они, вероятно, остаются вне сферы науки. Есть и такие вопросы, на которые наука не может ответить сейчас, но когда-нибудь, следует надеяться, сможет.

Я утверждал, что все, что реально и истинно, принадлежит некоторому моменту времени. Но что означает “быть реальным”?

Мы можем согласиться с тем, что Вселенная не является идентичной либо изоморфной математическому объекту, и я утверждал, что не существует копий Вселенной, так что нет и ничего, на что может быть похожа Вселенная. И что тогда Вселенная? Хотя любая метафора будет неудачной, а математическая модель – неполной, мы желаем знать, каков мир. Не на что он похож, а что он такое, в чем его суть. Мы думаем о материи как о простой и инертной, но не знаем, что она на самом деле. Мы знаем лишь, как материя взаимодействует. В чем смысл существования камня? Это тайна, и каждое новое открытие – атомы, ядра, кварки и так далее – лишь усложняет ситуацию.

Я очень хотел бы узнать ответ. Иногда, когда я пытаюсь заснуть, я думаю о том, что такое камень, и рад уже тому, что на вопрос о природе Вселенной должен иметься ответ. Но я не знаю, как найти его: в науке или где-либо. Книжные полки полны метафизических предположений на этот счет, но мы хотим знания, и это значит, что должен быть способ верифицировать ответ. Это заставляет нас оставаться в рамках науки. Если есть другой путь к надежному познанию мира, кроме науки, я вряд ли приму его: моя жизнь сосредоточена вокруг науки, и я остаюсь верен научной этике.

Что касается самой науки, то мы не можем предсказывать будущее (и об этом моя книга), но реляционизм заставляет меня сомневаться в том, что наука скажет, каков мир. Реляционизм утверждает, что физические величины, которые можно измерить и описать, рассматриваются с точки зрения их отношений и взаимодействий. Когда мы вопрошаем о сути материи или мира, мы интересуемся, каковы они в отсутствие отношений и взаимодействий¹⁹⁵. Но реляционизм утверждает, что в мире нет ничего реального, кроме свойств, которые определяются отношениями и взаимодействиями. Иногда это мне нравится, а иногда кажется абсурдным: вопрос о том, каковы вещи на самом деле, остается без внимания. Но есть ли смысл двум телам взаимодействовать, если они – ничто?

Может быть, существование – это взаимоотношения. Но почему? Эти вопросы слишком глубоки для меня. Кто-нибудь другой, с иными знаниями и темпераментом, сможет добиться прогресса в поиске ответов. Единственное, что я не могу сделать, – закрыть вопрос

¹⁹⁵ Обратите внимание, что взаимоотношения выражаются на языке математики. Сами числа не имеют сущности, как и точки в пространстве. Они определяются исключительно по их положению в системе чисел или в наборе точек – все их свойства связаны с их отношениями к другим числам или точкам. Эти отношения задаются с помощью аксиом, которые определяют математическую систему. Больше, нежели отношения и взаимосвязи, выходит за рамки математики.

о том, каков мир, назвав его нелепым вопросом. Некоторые защитники науки настаивают, что вопросы, на которые наука не может ответить, не имеют смысла, но я нахожу это неубедительным. Наука привела меня к выводу, что будущее открыто и новизна реальна. Поскольку я определяю науку скорее как этику, а не метод, я должен допустить существование научной методологии, о которой пока нам ничего не известно.

Это подводит нас к очень сложной проблеме – проблеме сознания. Я получаю много писем с вопросами о сознании. На большинство я отвечаю так: если у сознания есть тайны, они пока за рамками известного науке. Мне, физику, нечего об этом сказать.

Лишь с одним человеком я позволяю себе говорить о проблеме сознания – Джеймсом Джорджем. Джим – бывший дипломат. Он служил верховным комиссаром Канады в Индии и Шри-Ланке, послом в Непале и Иране, странах Персидского залива и других местах. Он, как мне рассказывали, легендарный представитель канадской дипломатии эпохи Пирсона и Трюдо, когда Канада распространяла идеи миротворчества. Сейчас, в свои 90 лет, Джим пишет книги о духовных основах экологических проблем и помогает работе экологического фонда¹⁹⁶. Им восхищаются многочисленные друзья и знакомые. Он один из тех не многих в моем окружении, кто живет мудро, что мне вряд ли удастся.

Джим говорит: “То, что вы рассказываете о смысле времени в физике, увлекательно, но вы упускаете из виду ключевой элемент, на который указывают все ваши мысли – роль сознания во Вселенной”. Я слушаю, но сказать мне нечего. Я приблизительно понимаю, о чем он. Так вот, рассуждая о проблеме сознания, я имею в виду не искусственный интеллект. И не то, как развивается сеть химических реакций, чтобы стать автономной и принимать выгодные для себя решения. Это трудные проблемы, но они, похоже, разрешимы в рамках науки.

Под проблемой сознания я имею в виду следующее. Если я опишу вас на языке физических и биологических наук, все равно что-то останется за рамками описания. Мозг – это сеть примерно из 100 миллиардов клеток, каждая из которых представляет собой сложную систему, контролирующую цепь химических реакций. Я мог бы описать это очень подробно, но и близко не подошел бы к объяснению внутреннего опыта, потока сознания. Если бы я не знал, что обладаю сознанием, все мои познания о ваших нейрональных процессах не дали бы мне оснований подозревать, что сознание есть и у вас.

Самое загадочное, конечно, – не психика, а сам факт того, что мы обладаем сознанием. Лейбниц представлял себе, что, уменьшившись, он смог бы ходить внутри чужого мозга, как внутри мельницы (мы бы сказали – “фабрики”). В случае мельницы вы дали бы описание ее устройства. В случае мозга – нет.

Один из способов сказать, что нечто осталось за рамками описания работы мозга, – это отметить некоторые вопросы, на которые физическое описание не дает ответа. Вы и я смотрим на женщину в красном за соседним столиком. Испытываем ли мы одно и то же ощущение (я о красном цвете)? Возможно, то, что вы видите как красный, я вижу как синий?

Предположим, ваш видимый спектр продлен в ультрафиолетовую область. Как выглядели бы цвета? Какими стали бы ощущения?

Описанию красного цвета как волны определенной длины или нейронального возбуждения не хватает сути – опыта восприятия красного. Философы называют это квалиа (*qualia*). Почему, когда наши глаза поглощают фотоны волны определенной длины, мы ощущаем квалиа красного? Философ Давид Чалмерс называет это трудной проблемой сознания.

Вот еще один способ задать вопрос о природе сознания. Предположим, мы скопировали нейрональные сети вашего мозга на кремниевый чип и “загрузили” мозг в компьютер. Станет ли компьютер сознательным существом? Проявились ли бы квалиа?

¹⁹⁶ См.: George, James *Asking for the Earth*. Barrytown NY: Station Hill Press, 2002; George, James *The Little Green Book on Awakening*. Barrytown NY: Station Hill Press, 2009.

Жили бы тогда два сознательных существа с вашими воспоминаниями и разным (с момента копирования) будущим?

Наука, кажется, не в состоянии решить проблему квалиа, или сознания, потому что этот аспект мира не затрагивается, когда мы описываем физические взаимодействия между частицами. Этот вопрос сродни следующему: каков мир на самом деле (а не как он может быть смоделирован)?

Некоторые философы утверждают, что квалиа идентичны определенным нейрональным процессам. Мне кажется, это неверно. Квалиа могут быть сопоставлены с нейрональными процессами, но они не являются таковыми. Нейрональные процессы описывают физики и химики, но ни одно описание в рамках этих отраслей не ответит, что такое квалиа, и не объяснит, почему мы их воспринимаем.

Я не сомневаюсь, что мы многое можем узнать об отношениях квалиа и мозга и что это подведет нас к формулированию проблемы сознания. Мы можем проводить эксперименты на сознательных существах, которые нас научат, какие функции или аспекты нейрональных процессов связаны с квалиа. Это научные вопросы, лежащие в области методологии.

Проблема сознания остается тайной, разгадка которой пока не под силу науке. Не знаю, справится ли она. Возможно, когда мы узнаем больше о биологии и мозге, это приведет нас к революционному преобразованию языка, которым мы пользуемся для описания жизни и мышления животных. После этой революции мы, возможно, будем обладать недоступными сейчас понятиями и языком, которые позволят сформулировать проблемы сознания и квалиа как научные вопросы.

Проблема сознания является частью вопроса, что такое мир. Мы не знаем, что такое на самом деле камень, атом или электрон. Мы можем лишь наблюдать, как они взаимодействуют с другими объектами, и описывать их свойства. Возможно, у всего есть как внешние, так и внутренние свойства. Внешние свойства наука может описывать посредством взаимодействий. Сущность невозможно выразить на языке взаимодействий и отношений. Сознание, чем бы оно ни было, – аспект сущности мозга.

Кроме того, сознание разворачивается во времени. Когда я утверждаю, что в мире всегда некоторое время, я исхожу из того, что мой опыт всегда связан со временем. Но что я имею в виду, когда говорю об опыте? Я могу говорить о нем как о моментах записи информации. Тогда нет необходимости упоминать о сознании или квалиа. Но это лишь отговорка. Поэтому я убежден, что реально то, что реально в настоящий момент, и думаю, что и квалиа реальны.

Наука – одно из великих человеческих приключений. Познание мира – неотъемлемая часть истории. Будущее непредсказуемо (в противном случае не было бы никакой науки), и мы уверены лишь в том, что будем знать еще больше. В любом масштабе, от квантового состояния атома до Вселенной, на каждом уровне сложности, от фотона из ранней Вселенной до личности и общества, ключевым является время – и открытое будущее.

Библиографический список

Ниже я перечислил некоторые из наиболее популярных работ о времени в физике и космологии (а также книги на смежные темы). Многие авторы излагают идеи, не совпадающие или противоречащие изложенным здесь мною.

Bacciagaluppi, Guido, and Antony Valentini *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. New York: Cambridge University Press, 2009.

Bak, Per *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus, 1996.

Barbour, Julian B. *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. New York: Oxford University Press, 2000.

- Barbour, Julian B. *The Discovery of Dynamics: A Study from a Machian Point of View of the Discovery and the Structure of Dynamical Theories* . New York: Oxford University Press, 2001.
- Bell, J. S. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2004.
- Brown, James Robert *Platonism, Naturalism, and Mathematical Knowledge* . Oxford, U. K.: Routledge, 2011.
- Carr, Bernard, ed. *Universe or Multiverse?* New York: Cambridge University Press, 2007.
- Carroll, Sean *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Arrow of Time* . New York: Dutton, 2010.
- Davies, P. C. W. *The Physics of Time Asymmetry* . San Francisco: University of California Press, 1974.
- Deutsch, David *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes – and Its Implications* . New York: Allen Lane/Penguin Press, 1997.
- Falk, Dan *In Search of Time: The History, Physics and Philosophy of Time* . New York: St. Martin's, 2010.
- Frank, Adam *About Time: Cosmology and Culture at the Twilight of the Big Bang* . New York: Free Press, 2011.
- Gambini, Rodolfo, and Jorge Pullin *A First Course in Loop Quantum Gravity* . New York: Oxford University Press, 2011.
- Gleiser, Marcelo *A Tear at the Edge of Creation: A Radical New Vision for Life in an Imperfect Universe* . New York: Free Press, 2010.
- Greene, Brian *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos* . New York: Knopf, 2011.
- Hawking, Stephen W., and Leonard Mlodinow *The Grand Design* . New York: Bantam, 2010.
- Kauffman, Stuart A. *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* . New York: Oxford University Press, 1995.
- Kauffman, Stuart A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* . New York: Oxford University Press, 1993.
- Kragh, Helge *Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology* . New York: Oxford University Press, 2011.
- Levin, Janna *How the Universe Got Its Spots: Diary of a Finite Time in a Finite Space* . Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002.
- Magueijo, João *Faster than the Speed of Light: The Story of a Scientific Speculation* . Cambridge, MA: Perseus, 2003.
- Mangabeira Unger, Roberto *The Self Awakened: Pragmatism Unbound* . Cambridge, MA: Harvard University Press, 2007.
- Morowitz, Harold *Energy Flow in Biology* . New York: Academic Press, 1968.
- Panek, Richard *The 4-Percent Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* . Boston, MA: Houghton Mifflin Harcourt, 2011.
- Penrose, Roger *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe* . New York: Knopf, 2011.
- Penrose, Roger *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe* . New York: Knopf, 2005.
- Penrose, Roger *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* . New York: Oxford University Press, 1989.
- Price, Huw *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time* . New York: Oxford University Press, 1996.
- Randall, Lisa *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* . New York: Ecco/HarperCollins, 2005.
- Rovelli, Carlo *The First Scientist: Anaximander and His Legacy* . Yardley, PA: Westholme Publishing, 2011.
- Saunders, Simon, et al., eds. *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* . New

York: Oxford University Press, 2010.

Smolin, Lee *The Life of the Cosmos* . New York: Oxford University Press, 1997.

Smolin, Lee *Three Roads to Quantum Gravity* . New York: Basic Books, 2001.

Smolin, Lee *The Trouble with Physics* . Boston, MA: Houghton Mifflin Harcourt, 2006.

Steinhardt, Paul J., and Neil Turok *Endless Universe: Beyond the Big Bang* . New York: Doubleday, 2007.

Susskind, Leonard *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* . New York: Little, Brown, 2005.

Vilenkin, Alex *Many Worlds in One: The Search for Other Universes* . New York: Hill & Wang, 2006.

Благодарности

Работа над этой книгой стала для меня приключением, отразившим мои многолетние поиски природы времени. Как и любой другой путешественник, я в долгу перед многими людьми, которые мне помогали, воодушевляли меня, давали советы и иногда вели за собой.

Приключения начались летом 1980 года. Я приехал на стажировку в Оксфорд по приглашению Роджера Пенроуза. Роджер сказал, что если я действительно интересуюсь природой времени, мне необходимо встретиться с его приятелем Джулианом Барбуром, жившим в деревне недалеко от Оксфорда. Я вместе с философом Амелией Рэчел-Кон посетил его. Джулиан стал моим наставником в философии. Он познакомил меня с сочинениями Лейбница и идеями реляционных пространства и времени. Я был одним из первых, но далеко не последним, кому Джулиан вправил мозги.

Мои поиски приняли неожиданный оборот в 1986 году, когда Эндрю Строминджер рассказал мне о своем открытии большого количества струнных теорий и поделился опасениями, что их многочисленность будет пресекать любые попытки построить стандартную модель физики элементарных частиц на основе принципов. Размышляя над этим, я представлял ландшафт струнных теорий, аналогичный адаптивному ландшафту в биологии, где аналогичный естественному отбору механизм регулирует эволюцию законов природы. Незадолго до трагической смерти моя подруга Лора Кукс, врач и драматург, вдохновила меня на сочинение первой книги “Жизнь космоса” (1992), в которой я развил идею космологического естественного отбора.

Когда я заканчивал “Жизнь космоса”, мой друг Друсилла Корнелл посоветовала мне работу бразильского философа Мангабейры Унгера по социальной теории, в которой он рассуждает и об эволюции законов в космологии. Друсилла познакомила нас. После захватывающего разговора в гарвардском кабинете Мангабейра Унгер предложил вместе написать научную книгу о реальности времени и эволюции законов природы. Этот проект (мы работаем над ним последние пять лет) дал толчок идеям, изложенным в этой книге. В основном благодаря Роберту я оценил радикальность предположения о реальности времени. Тем, кто пожелает ознакомиться с более строгой постановкой проблемы, настоятельно рекомендую обратиться к нашей будущей книге (рабочее название – “Сингулярная Вселенная и реальность времени”).

В 1986 году я начал работать над проблемой квантования в новой формулировке ОТО, которую годом ранее предложил Абэй Аштекар. Это привело к петлевой квантовой гравитации (это открытие мы сделали с Карло Ровелли). Мы постоянно спорили о природе времени с Абэем и Карло, а также с Луисом Крейном, Тедом Джекобсоном, Крисом Ишемом, Лораном Фрейделем, Жуаном Магейжу, Фотини Маркопулу, Джованни Амелино-Камелия, Ежи Ковальски-Гликманом, Ренате Лолл и многими другими. Я позднее некоторых своих друзей пришел к мысли, что на космологическом масштабе можно отказаться от принципа относительности одновременности. Энтони Валентини много лет назад понял, что этот отказ был той ценой, которую приходится заплатить за введение в теорию скрытых параметров, а Жуан Магейжу высказывал провокационные мысли о нарушении

относительности уже в 1999 году, когда мы встретились с ним в Лондоне. Фотини Маркопулу первым подчеркнула важность обратной задачи и решительно выступила в поддержку подхода к квантовой гравитации, в котором время является фундаментальным, а пространство второстепенным и возникающим. Благодаря ей возникли основные идеи, сформулированные в главе 15, в том числе идея о нарушении локальности и геометрогенезис.

Несмотря на то, что я физик, у меня множество друзей, занимающихся философией науки, и все эти годы они терпеливо выслушивали меня и критически оценивали мои попытки сформулировать мысль о природе времени. Это были: Саймон Сондерс, Стив Вайнштейн, Харви Браун, Патриция Марино, Джим Браун, Дженан Исмаил, Шерил Мизак, Иэн Хакинг, Джозеф Берковиц и Джереми Баттерфилд, а также Абнер Симони – мой первый наставник в философии физики. Я благодарю Джулиана Барбура, Джима Брауна, Друсиллу Корнелл, Дженана Исмаила, Роберту Мангабейру Унгера, Саймона Сондерса за то, что они любезно прочитали рукопись и одали множеством ценных советов.

Шон Кэрролл, Мэтт Джонсон, Пол Стейнхардт, Нил Турок и Алекс Виленкин помогли формированию моего взгляда на ряд космологических проблем. Моя работа по основам квантовой теории получила поддержку коллег из института “Периметр”, в частности Криса Фукса, Люсьена Арди, Адриана Кента, Маркуса Мюллера, Роба Спеккенса и Энтони Валентини.

Для меня всегда важны замечания моих коллег Сент-Клэра Семена, Джарона Ланира и Донны Мойлан.

Обеспокоенность изменением климата, высказанная в эпилоге, во многом возникла благодаря сообщению на семинаре на тему порогового поведения в политической науке, организованном институтом “Периметр” совместно с Томасом Гомером-Диксоном из Школы международных отношений им. Балсилли. Я благодарен Теду и другим участникам, в частности Маньяне Милкорейт и Татьяне Барляевой, за дискуссии и сотрудничество.

Лучше разобраться в вопросах экономики мне помогли те, кто работал со мной над организацией конференции по экономическому кризису и его последствиям для экономической науки (институт “Периметр”, май 2009 года). Я благодарен, в частности, Брайану Артуру, Майку Брауну, Эммануэлю Дерману, Дойну Фармеру, Ричард Фримену, Пиа Маланей, Нассиму Талебу и Эрику Вайнштейну.

Я признателен за дружбу, сотрудничество и помощь в формировании моих представлений о самоорганизации Стюарту Кауфману и Перу Баку.

Я благодарен Говарду Бертону и Майку Лазаридису за уникальную помощь в учреждении Института теоретической физики “Периметр”. Я также благодарен Нилу Туроку за постоянную поддержку наших усилий.

Мою работу щедро финансировали ННФ, ИСЕНИ, Фонд им. Джесси Филипса, Институт изучения фундаментальных вопросов и Фонд им. Темплтона. Всем этим организациям я благодарен за возможность делать свою работу, а также за их поддержку молодым ученым.

Значительно улучшить рукопись мне помогли ее первые читатели. Кроме уже упомянутых назову Яна Амбьорна, Брайана Артура, Крису Блейк, Говарда Бертона, Марину Кортес, Эммануэля Дермана, Майкла Дюшенеса, Лорана Фрейделя, Джеймса Джорджа, Дину Грейзер, Томаса Гомера-Диксона, Сабину Хоссенфельдер, Тима Козловски, Ренате Лолл, Фотини Маркопулу, Катерины Палечни, Натали Квалиотто, Генри Рейха, Карло Ровелли, Полину и Майкла Смолин, Риту Туркову, Энтони Валентини, Наташу Ваксман, Рика Янга.

Я охотно соглашаюсь с редактированием своих книг, поскольку понимаю, что они от этого лишь выигрывают. Обстоятельства сложились так, что ни одна из моих прежних книг не пользовалась вниманием столь многих профессиональных редакторов. Своей концепцией книга обязана усилиям Аманды Кук (сейчас она работает в “Краун паблишинг”). Кортни Янг из издательства “Хаутен – Миффлин – Харкурт” и Сара Липпинкотт – лучшие редакторы,

которых можно пожелать любому автору. Книга сильно выиграла благодаря Луизе Дэннис из “Кнопф Канада”. Я признателен Томасу Пенну за поддержку в критические моменты. Я очень благодарен Генри Рейху, выполнившему многие из рисунков. Как и прежде, я в огромном долгу перед Джоном Брокманом, Катинкой Мэтсон и Максом Брокманом. Без их веры в успех эта книга никогда бы не увидела свет.

Благодарю Родиллию Грегорио за терпение, такт и ответственность; благодарю Кая, от которого я узнал о времени все, что знаю и что здесь не обсуждал. Благодарю Полину, Майка и Лорну за любовь и доверие. Наконец, слов недостаточно, чтобы выразить мою благодарность Дине, которая с любовью и терпением помогала мне вовремя закончить эту книгу о времени.